

文章编号: 1001-3806(2015)06-0735-06

飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲控制 CO 分子取向

杨明惠, 金 琪, 刘劲松, 王可嘉*, 杨振刚

(华中科技大学 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了研究啁啾太赫兹脉冲诱导后的 CO 分子取向, 采用刚性转子近似求解含时薛定谔方程的方法, 进行了理论分析和数值仿真。为了在较低太赫兹场强时获得较好的取向效果, 采用了飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲的方案。结果表明, 分子取向程度可增强 81%。在有限温度条件下, 飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲诱导分子取向的效率随温度的升高而降低; 相对于少周期太赫兹脉冲, 啁啾太赫兹脉冲有诱导分子取向的优越性。这一结果对提高 CO 分子取向程度是有意义的。

关键词: 激光物理; 分子取向; 刚性转子模型; 啁啾太赫兹脉冲

中图分类号: TN241 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.06.001

CO molecular orientation controlled by combination of chirped THz pulse and femtosecond laser pulse

YANG Minghui, JIN Qi, LIU Jinsong, WANG Kejia, YANG Zhengang

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study the orientation behaviors of CO molecules induced by chirped terahertz pulse, the time-dependent Schrödinger equation was solved by means of rigid rotor approximation for theoretical analysis. In order to achieve high degree of molecular orientation in chirped terahertz pulse at a low intensity, the method by utilizing chirped terahertz pulse in combination with femtosecond laser pulse was proposed. The results show that the molecular orientation degree can be enhanced about 81%, and that the orientation efficiency decreases with the rise of temperature in finite temperature range. Compared with the few-cycle terahertz pulse, chirped terahertz pulse has more advantages in inducing molecular orientation. The result is meaningful to enhance the CO orientation degree.

Key words: laser physics; molecular orientation; rigid rotor model; chirped terahertz pulse

引 言

分子的各向异性和空间分布在许多物理及化学过程中起着重要作用, 如高次谐波产生^[1]、化学反应动力学^[2]、光电离及解离^[3-4]、超快分子成像^[5-6]等。近年来, 控制分子的准直及取向引起了人们的广泛关注。分子的准直指的是分子轴沿着某一固定的坐标轴, 如激光场的偏振方向。而分子的取向指的是在准直的基础上控制分子指向固定的方向, 这就意味着要打破分

子的反演对称性, 因而分子取向的实现要比准直更加困难。

目前, 控制分子取向的方法主要有以下几种。第 1 种是利用强静电场, 具体实现如六极静电法^[7-8]、强力场法^[9-11]。然而, 此类方法获得的分子取向程度相当小, 且强场引起的 Stark 效应会影响实验结果。第 2 种是结合强激光场与弱静电场^[12-14], 共同与分子相互作用, 由此得到的分子取向程度可以有很显著的增强, 然而电场的存在会极大地限制取向气体的应用, 因而无外场或过场的分子取向方法应运而生。目前主要有利用双色激光场^[15]、多色激光场^[16]、少周期太赫兹场^[17]等方法实现过场取向。近几年来, 许多研究结果证实了结合非共振激光与太赫兹脉冲^[18-19]在实现过场取向的同时可以极大地提高分子取向程度。其主要机制是先利用场强很高的非共振激光 Raman 激发分子激发至高能态, 再利用共振的太赫兹脉冲偶极激发分子至相邻的转动态。YANG 等人提出了一种新颖的方法^[20], 即利用啁啾太赫兹脉冲诱导 LiH 气体, 可在

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61177095; 61475054; 61405063); 湖北省自然科学基金资助项目(2012FFA074; 2013BAA002); 武汉市科技计划基金资助项目(2014010101010009); 中央高校基本科研业务费资助项目(2013KXYQ004; 2014ZZGH021; 2014QN023)

作者简介: 杨明惠(1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事太赫兹分子取向方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wktode@sina.com

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-03-16

相当低的场强下 ($6.0 \times 10^5 \text{ V/cm}$) 获得较高的分子取向 ($|\langle \cos\theta \rangle| = 0.85$) (θ 是分子轴与激光及太赫兹脉冲电场之间的夹角)。然而对于分子转动周期更大的气体,欲取得较高程度的分子取向,则需要非常高的场强。CO 是典型的双原子极性分子气体,气体转动周期为 8.64ps,远大于 LiH 气体的转动周期 2.2ps。

作者以 CO 气体为例,研究了利用啁啾太赫兹脉冲来控制大转动周期分子气体的取向,通过对比少周期太赫兹脉冲,理论上证明了啁啾太赫兹脉冲的优越性。为了能够在啁啾太赫兹脉冲场强较低的情况下得到大转动周期的气体分子较高的取向,采用了飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲的方法来控制分子取向,即先利用飞秒激光预激发气体分子,在适当的延时后分子再与啁啾太赫兹脉冲相互作用,发现可增强 CO 分子取向程度大约 81%。最后研究了温度对飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲诱导分子取向的影响。该方案从理论上证明了飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲可增强 CO 气体的分子取向程度,可望用于利用低场强的啁啾太赫兹脉冲控制大转动周期分子气体的化学反应及光电离、解离等过程。

1 理论方法

由 Born-Oppenheimer 近似,气体分子与线偏振场相互作用,分子转动波函数 $\psi(t)$ 的时间演变可由含时薛定谔方程求出:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} = [\hat{H}_0(t) + \hat{H}_{fs}(t) + \hat{H}_{THz}(t)]\psi(t) \quad (1)$$

式中, $\hat{H}_0 = B \hat{J}^2$ 表示无外场的分子哈密顿量, B 表示分子的转动常数, \hat{J} 表示角动量算符, \hat{H}_{fs} 和 \hat{H}_{THz} 分别表示飞秒激光分子哈密顿量和太赫兹分子哈密顿量, t 是时刻, \hbar 为约化普朗克常数。

作者采用刚性转子近似^[21],即只需考虑分子转动自由度,忽略其它自由度的影响。因而,线偏振的太赫兹脉冲及飞秒激光脉冲与分子相互作用的哈密顿量^[19]可以写为:

$$\hat{H}_{THz}(t) = -\mu_0 E_{THz}(t) \cos\theta \quad (2)$$

$$\hat{H}_{fs}(t) = -\frac{E_{fs}^2(t)}{2}(\Delta\alpha\cos^2\theta + \alpha_{\perp}) - \frac{E_{fs,env}^2(t)}{4}(\Delta\alpha\cos^2\theta + \alpha_{\perp}) \quad (3)$$

式中, θ 是分子轴与激光及太赫兹脉冲电场之间的夹角, μ_0 是分子的永久偶极矩, $E_{THz}(t)$ 和 $E_{fs}(t)$ 分别表示太赫兹电场及飞秒激光电场, α_{\parallel} 和 α_{\perp} 分别表示平行及垂直于分子轴的极化率分量, $\Delta\alpha = \alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}$ 。由

于飞秒激光场的快速振荡,其与分子永久偶极矩相互作用被平均掉了,因而 $\hat{H}_{fs}(t)$ 中不含 $\cos\theta$ 项,且利用转动波包近似飞秒激光电场与分子诱导偶极矩间相互作用的哈密顿量可由其包络函数 $E_{fs,env}(t)$ 表示^[22]。

接下来,用自由空间中刚性转子的本征函数球谐函数球谐函数 $Y_{J,M}(\theta, \varphi)$ (φ 为球坐标系下的方位角) 展开转动波函数^[22]:

$$|\psi(t)\rangle = \sum_{J=0}^{J_{max}} C_{J,M}(t) |J, M\rangle \exp\left(-i \frac{E_J}{\hbar} t\right) \quad (4)$$

式中, J_{max} 设为一个较大值,大于脉冲可激发分子至的最高转动态, $C_{J,M}(t)$ 为布居系数, E_J 表示 J 转动态的本征能量, J 为转动态能级的角量子数, M 表示角动量在激光(或太赫兹)场偏振方向上的投影,对于线偏振的激光场, M 保持不变,即 $\Delta M = 0$ 。由于仿真环境温度 0K,此时分子初态处于转动基态,即 M 恒等于 0。

将(2)式、(3)式、(4)式带入(1)式,可以得到一个关于 $C_{J,M}(t)$ 的微分方程组。采用 4 阶 Runge-Kutta 法可以求出 $C_{J,M}(t)$ 随时间的变化,进而可以表示出分子的转动波函数 $\psi(t)$ 。

分子取向程度可由 $\cos\theta$ 的期望值表示:

$$\langle \cos\theta \rangle(t) = \langle \psi(t) | \cos\theta | \psi(t) \rangle =$$

$$\sum_{J=0}^{J_{max}} \sum_{J'=0}^{J_{max}'} C_{J,M}^*(t) C_{J',M}(t) \langle J, M | \cos\theta | J', M \rangle \quad (5)$$

式中, * 表示共轭, ' 表示 J 和 J_{max} 不同的取值。

2 结果与讨论

2.1 利用啁啾或少周期太赫兹脉冲诱导分子取向的比较

啁啾太赫兹脉冲电场表达式可写为^[20]:

$$E_{THz}(t) = E_0 \left[1 + \left(\frac{\chi\tau^2}{4\ln 2} \right)^2 \right]^{-1/4} \exp\left[-2\ln 2 \left(\frac{t-t_p}{\tau} \right)^2 \right] \times \cos\left[(\omega + \chi(t-t_p))(t-t_p) \right] \quad (6)$$

式中, τ 表示啁啾太赫兹场的半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM), 啁啾太赫兹脉冲频率随时间变化, ω 为中心时刻 t_p 时的角频率, χ 为线性啁啾率, E_0 表示太赫兹脉冲峰值场强。

少周期太赫兹脉冲^[17]由于电场不对称性很强,因而其与分子作用后可以得到很大的取向值,作为参照,选取同样参量下的少周期太赫兹脉冲与啁啾太赫兹脉冲进行对比。

图 1 为啁啾太赫兹脉冲与少周期太赫兹脉冲的时域及频域的对比图。其中 $\tau_{chirped} = \tau_{few-cycle} = 500\text{fs}$, $\omega_{chirped} = \omega_{few-cycle} = 2\pi\text{THz}$, $\chi = 1.014 \times 10^{25} \text{ s}^{-2}$, 中心时刻 $t_p = 0\text{ps}$ 。

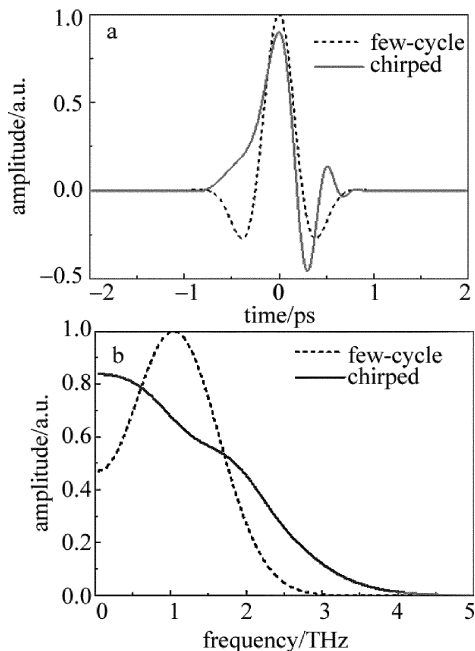


Fig. 1 a—time-dependent electric field of chirped terahertz pulse and few-cycle pulse b—frequency distribution of chirped terahertz pulse and few-cycle pulse

由于太赫兹脉冲频率与 CO 分子转动跃迁频率接近,因而它们的相互作用属于共振激发,分子随着太赫兹场强的变化而加速或减速转动。由图 1b 可以看出,相比而言,啁啾太赫兹脉冲在 0.6THz 以下及 1.7THz 以上的频率分量较多,而少周期太赫兹脉冲在 0.6THz ~ 1.7THz 之间的频率分量较多。而小于 0.6THz 的频率分量对应的正好是 CO 分子转动态能级的角量子数 $J=4$ 以下的跃迁过程。同样的电场强度下,由于啁啾太赫兹脉冲的低频分量(0THz ~ 0.6THz)更多,因而能更大程度地激发转动基态及低转动态跃迁,而少周期太赫兹脉冲即便高频分量(0.6THz ~ 1.7THz)更多,但由于低频分量较少,不能够有效激发转动基态及低转动态跃迁至高转动态,实现转动态布居的有效转移,因而不易得到高取向程度。

为了进一步研究两种脉冲对 CO 分子取向的影响,对比了不同场强下两种脉冲诱导 CO 分子取向的

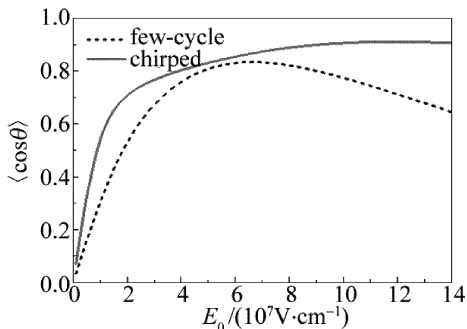


Fig. 2 Maximum degrees of CO orientation $|\langle \cos \theta \rangle|$ induced by chirped terahertz pulse and few-cycle pulse with regard to the peak amplitude of electric field

效果。图 2 为啁啾太赫兹脉冲及少周期太赫兹脉冲与分子相互作用后取向最大值 $|\langle \cos \theta \rangle|$ 随太赫兹脉冲峰值场强 E_0 的变化关系图。由图 2 可以看出,啁啾太赫兹脉冲在场强为 $11.8 \times 10^7 \text{ V/cm}$ 处取得最大值 $|\langle \cos \theta \rangle|_{\text{max}} = 0.911$,而少周期太赫兹脉冲在 $6.6 \times 10^7 \text{ V/cm}$ 处取得最大值 $|\langle \cos \theta \rangle|_{\text{max}} = 0.8346$ 。且随着太赫兹电场强度的增加,分子与啁啾太赫兹脉冲作用后的取向值 $|\langle \cos \theta \rangle|$ 始终大于分子与少周期太赫兹脉冲相互作用后的取向值。为了解释这种差异,研究了两种脉冲作用后的分子转动态布居分布。

图 3a 和图 3b 分别为 $1 \times 10^7 \text{ V/cm}$, $6.6 \times 10^7 \text{ V/cm}$ 电场下,少周期太赫兹脉冲及啁啾太赫兹脉冲与分子相互作用后的转动态布居图。 $1 \times 10^7 \text{ V/cm}$ 场强下,啁啾太赫兹脉冲可以把分子激发至 $J=2$ 转动态,而少周期太赫兹脉冲只能激发分子至 $J=1$ 转动态, $6.6 \times 10^7 \text{ V/cm}$ 场强下,啁啾太赫兹脉冲可以把分子激发至 $J=11$ 转动态,而少周期太赫兹脉冲只能激发分子至 $J=7$ 转动态。

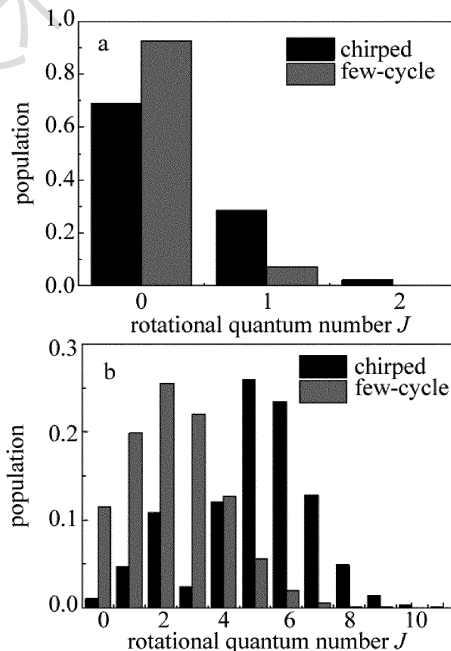


Fig. 3 Rotational population of the oriented CO molecules when chirped terahertz pulse or few-cycle pulse a—peak amplitude of $1 \times 10^7 \text{ V/cm}$ b—peak amplitude of $6.6 \times 10^7 \text{ V/cm}$

由此可以看出,啁啾太赫兹脉冲相比于少周期太赫兹脉冲能更有效地激发分子至更高的转动态,同图 1b 中的频域分析结果一致。同样可以由啁啾太赫兹脉冲的特性解释,角量子数 J 对应的本征能量可以表示为 $E_J = BJ(J+1)$,因而共振跃迁所需光子能量为 $\Delta E_J = 2B(J+1)$,角量子数 J 越大,能级间隙越宽,所需光子频率越高,而采用的是线性上啁啾太赫兹脉冲,

即频率随时间的一次函数增大,因而能更有效地实现分子布居转移,使分子跃迁至高转动态。由不确定性原理 $\Delta J \Delta \theta \geq \frac{\hbar}{2}$ ^[1],分子布居包含更多的转动态,就能得到更窄的 θ ,因而,啁啾太赫兹脉冲能获得更好的取向程度。

2.2 飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲诱导 CO 分子取向

尽管单独的啁啾太赫兹脉冲能够取得较高的取向值,但需要非常高的场强 (10^8V/cm 量级),为了便于实现,需要在相对较低场强时就能够得到较大的取向值,因而采用了飞秒激光预激发,在适当的延时 τ_2 后加入啁啾太赫兹脉冲,以期增强分子取向程度。

图 4 为飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲诱导 CO 分子后的取向程度随时间的演化图。使用峰值场强为 $18 \times 10^7 \text{V/cm}$ ($4.3 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$), $\omega_{\text{fs}} = 2\pi \times 375 \text{THz}$, $\tau_{\text{fs}} = 100 \text{fs}$ 的飞秒激光脉冲预激发 CO 分子,调节飞秒激光与啁啾太赫兹脉冲的间隔 τ_2 以获得最好的分子取向程度,结果发现间隔 $\tau_2 = 10.5 \text{ps}$ 后加入啁啾太赫兹脉冲(峰值场强为 $0.9 \times 10^7 \text{V/cm}$,对应峰值功率密度为 $1.07 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$, $\tau_{\text{chirped}} = 500 \text{fs}$, $\omega_{\text{chirped}} = 2\pi \text{THz}$, $\chi = 1.014 \times 10^{25} \text{s}^{-2}$, $t_p = 0 \text{ps}$),最终可获得 CO 分子取向最大值为 $|\langle \cos \theta \rangle| = 0.9150$ 。且同其它过场取向一样,分子取向程度以 CO 分子的转动周期 $\tau_{\text{rev}} = 8.64 \text{ps}$ 为周期重复出现。相比于单独的啁啾太赫兹脉冲 ($|\langle \cos \theta \rangle| = 0.5054$),取向程度增强了 81%。此外,值得一提的是,在许多实际应用中,如高次谐波产生,利用飞秒激光脉冲的振动力学研究等^[23],取向持续时间需要足够长。如图 4 所示,该方案的取向持续时间 $t_{\langle \cos \theta \rangle > 0.5} = 793 \text{fs}$,可以满足大多数应用的要求。

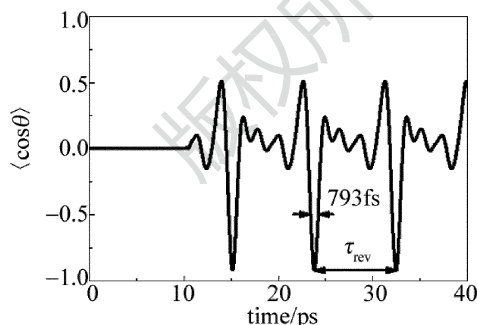


Fig. 4 Time-dependant orientation degree of CO molecules induced by chirped terahertz pulse in combination with femtosecond laser pulse

图 5 为分子分别与啁啾太赫兹脉冲或飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲相互作用后的转动态布居对比图。取向程度的增强原因同飞秒激光结合其它类型太赫兹脉冲类似。先由飞秒激光非共振激发分子至更高的转动态,使分子共振跃迁频率更接近太赫兹脉冲频率,再由啁啾太赫兹脉冲共振激发分子至相邻的转动态,实

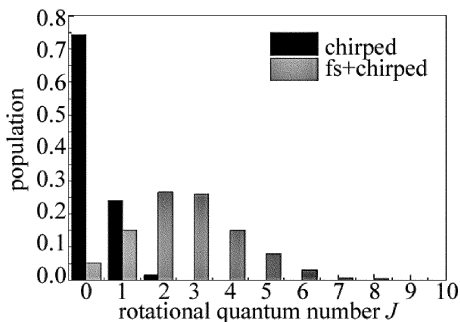


Fig. 5 Rotational population of oriented CO molecules induced by chirped terahertz pulse or chirped terahertz pulse in combination with a femtosecond laser pulse when the pulses are over

现了更多的转动态分布,与此同时通过调节飞秒激光与太赫兹之间的延时控制分子相邻转动态间的相位,最终达到增强分子取向的效果。由图 5 可以看出,单独的啁啾太赫兹脉冲只能激发分子至转动态 $J = 2$,而加入飞秒激光后可以激发分子至转动态 $J = 8$,且奇偶转动态的布居为: $P_{\text{odd}} = 0.4962$, $P_{\text{even}} = 0.5038$,两者相互接近,符合获得高取向值的特征,与参考文献[22]中描述的一致。

为了研究飞秒激光的加入可能带来的影响,对比了相同太赫兹脉冲场强 ($0.9 \times 10^7 \text{V/cm}$) 下,飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲及飞秒激光结合少周期太赫兹脉冲两种方案的取向效果。图 6 是飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲及飞秒激光结合少周期太赫兹脉冲分别与分子相互作用后的取向程度与飞秒激光场强 E_{fs} 的关系图。通过调节飞秒激光与太赫兹脉冲间的延时,得到各自取向程度最大值 $|\langle \cos \theta \rangle|_{\text{max}}$ 随飞秒激光场强的变化,可以看出,飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲方案所能取得的取向最大值始终大于飞秒激光结合少周期太赫兹脉冲的情况。由此可以得出,即便是加入了飞秒激光预激发,改变了分子转动初态的分布,但由于啁啾太赫兹脉冲本身诱导分子取向的优越性(频率随时间增大),飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲的方案依然能

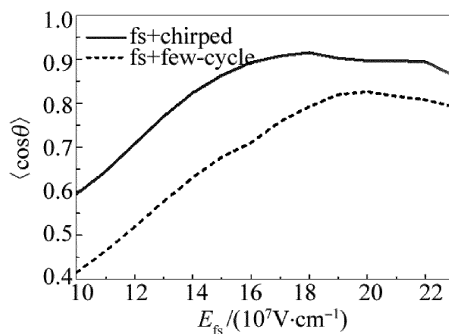


Fig. 6 Relationship between maximum degrees of CO orientation and peak amplitude of femtosecond laser pulse electric field E_{fs}
a—induced by chirped terahertz pulse in combination with femtosecond laser pulse b—induced by few-cycle pulse in combination with femtosecond laser pulse

够获得比飞秒激光结合少周期太赫兹脉冲更好的取向效果。由于激光 Raman 激发分子跃迁效率很低,当场强小于 10^8 V/cm 时,跃迁至 $J = 2$ 转动态的分子已经很少,增强分子取向的效果不太明显,而当场强增至 $2 \times 10^8 \text{ V/cm}$ 时,增强效果已接近极限,同时为了避免激光电离分子,更大场强的激光脉冲也不予考虑^[24]。

2.3 有限温度下的分子取向

在前两节中,作者假定分子转动温度为 0K,然而在现实实验中,分子是处在有限温度下的,分子转动态布居应满足 Boltzmann 分布。取向程度 $\langle \cos\theta \rangle$ 可以写成如下形式^[22]:

$$\langle \langle \cos\theta \rangle \rangle (t) = \frac{\sum_J g_J \exp\left[-\frac{BJ(J+1)}{k_B T}\right] \sum_{M=-J}^J \langle \cos\theta \rangle_{J,M}(t)}{Q} \quad (7)$$

式中, k_B 为玻尔兹曼常数, g_J 为分子自旋简并系数, Q 为配分函数:

$$Q = \sum_J g_J (2J+1) \exp\left[-\frac{BJ(J+1)}{k_B T}\right] \quad (8)$$

图 7 展示了不同温度下的飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲诱导后的分子取向随时间的演化。在 1K, 10K, 20K 和 30K 温度时,取向最大值 $|\langle \cos\theta \rangle|_{\max}$ 分别为 0.90327, 0.36396, 0.31131 和 0.27848。可以看出随着温度的升高,取向程度逐渐减小。这意味着飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲诱导分子取向的效率随温度的升高而降低。其它参量与图 4 相同。

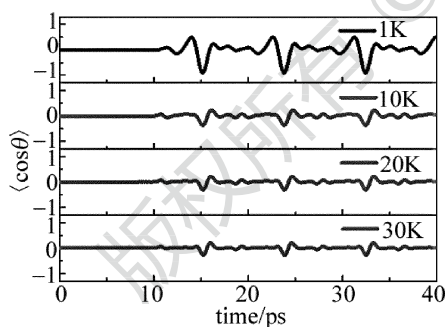


Fig. 7 Time-dependant orientation degrees for CO molecules at different rotational temperatures

3 结 论

理论上研究了利用啁啾太赫兹脉冲来控制 CO 分子取向的一些特性,对比发现,利用啁啾太赫兹脉冲控制 CO 分子取向优于利用少周期太赫兹脉冲,通过对太赫兹脉冲频谱的分析,解释了啁啾太赫兹脉冲更易激发分子跃迁至高转动态,进而能够获得更高的取向值。采用了飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲的方案,研究发现可在啁啾太赫兹脉冲峰值场强较低 ($0.9 \times$

10^7 V/cm) 的情况下获得很高的取向程度 ($|\langle \cos\theta \rangle| = 0.9150$),理论上证明了可利用飞秒激光结合较低场强的啁啾太赫兹脉冲得到较高度度的 CO 分子取向,有望用于利用低场强的啁啾太赫兹脉冲控制大转动周期的气体分子的化学反应及光电离、解离等过程。最后,研究了在有限温度下,温度对飞秒激光结合啁啾太赫兹脉冲诱导后的分子取向的影响,发现了取向程度随温度的升高而降低。

参 考 文 献

- [1] STAPELFELDT H, SEIDEMAN T. Colloquium: aligning molecules with strong laser pulses[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2003, 75 (2): 543-557.
- [2] HERSCHACH D. Chemical physics: molecular clouds, clusters, and corrals[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1999, 71(2): S411-S418.
- [3] LI H, RAY D, DE S, *et al.* Orientation dependence of the ionization of CO and NO in an intense femtosecond two-color laser field[J]. *Physical Review*, 2011, A84(4): 043429.
- [4] HANSAN J L, STAPELFELDT H, DIMITROVSKI D, *et al.* Time-resolved photoelectron angular distributions from strong-field ionization of rotating naphthalene molecules [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(7): 073001.
- [5] IVANOV M Y, MARANGOS J P. Time-resolved imaging of atomic-scale electron and nuclear dynamics [J]. *Journal of Modern Optics*, 2007, 54(7): 899-903.
- [6] WU J, LU P, LIU J, *et al.* Ultrafast optical imaging by molecular wakes[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(16): 161106.
- [7] KRAMER K H, BERNSTEIN R B. Focusing and orientation of symmetric-top molecules with the electric six-pole field [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1965, 42(2): 767-770.
- [8] HAIN T D, MOISION R M, CURTISS T J. Hexapole state-selection and orientation of asymmetric top molecules: CH_2F_2 [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1999, 111(15): 6797-6806.
- [9] FRIEDRICH B, HERSCHBACH D R. Spatial orientation of molecules in strong electric fields and evidence for pendular states [J]. *Nature*, 1991, 353: 412-414.
- [10] LOESCH H J, REMSCHEID A. Brute force in molecular reaction dynamics: a novel technique for measuring steric effects [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1990, 93(7): 4779-4790.
- [11] FRIEDRICH B, HERSCHBACH D R. On the possibility of orienting rotationally cooled polar molecules in an electric field [J]. *European Physical Journal*, 1991, D18(2): 153-161.
- [12] FRIEDRICH B, HERSCHBACH D. Enhanced orientation of polar molecules by combined electrostatic and nonresonant induced dipole forces [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1999, 111(14): 6157-6160.
- [13] BUCK U, FARNIK M. Oriented xenon hydride molecules in the gas phase [J]. *International Reviews in Physical Chemistry*, 2006, 25(4): 583-612.
- [14] GOBAN A, MINEMOTO S, SAKAI H. Laser-field-free molecular orientation [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(1): 013001.
- [15] KANAI T, SAKAI H. Numerical simulations of molecular orientation using strong, nonresonant, two-color laser fields [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2001, 115(12): 5492-5497.
- [16] ZHANG S, SHI J, ZHANG H, *et al.* Field-free molecular orientation by a multicolor laser field [J]. *Physical Review*, 2011, A83(2): 023416.

- [17] QIN C, TANG Y, WANG Y, *et al.* Field-free orientation of CO by a terahertz few-cycle pulse[J]. *Physical Review*, 2012, A85(5): 053415.
- [18] DAEMS D, GUERIN S, SUGNY D, *et al.* Efficient and long-lived field-free orientation of molecules by a single hybrid short pulse[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(15): 153003.
- [19] GERSHNALEL E, AVERBUKH I S, GORDON R J. Enhanced molecular orientation induced by molecular antialignment[J]. *Physical Review*, 2006, A74(5): 053414.
- [20] YANG J, CHEN M, YU J, *et al.* Field-free molecular orientation with chirped laser pulse[J]. *European Physical Journal*, 2012, D 66(4): 1-5.
- [21] SHU C C, YUAN K J, HU W H, *et al.* Field-free molecular orientation with terahertz few-cycle pulses[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2010, 132(24): 244311.
- [22] KITANO K, ISHII N, ITATANI J. High degree of molecular orientation by a combination of THz and femtosecond laser pulses[J]. *Physical Review*, 2011, A84(5): 053408.
- [23] SUGNY D, KELLER A, ATADEK O, *et al.* Reaching optimally oriented molecular states by laser kicks[J]. *Physical Review*, 2004, A69(3): 033402.
- [24] ZHAO S H, SHI L, LI YU J, *et al.* Filamentation of femtosecond laser pulse in atmosphere and its application[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(3): 256-258 (in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©