

线性分子摆动光谱 Q 支相对强度与电场、分子取向度的依赖关系及其应用

冒 飞 邓 敏 汪海玲* 印建平

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 提出了一种测量分子取向度的新方法,即采用极性线性分子的摆动光谱 Q 支相对强度来测量分子的取向度。通过计算极性分子 HCN-N₂ 电子基态的 C—H 伸缩振动在不同电场强度下的摆动光谱,发现其摆动光谱的 Q 支强度随着电场强度的增大而逐渐增大,但 P 支与 R 支强度则随着电场强度的增大相应地减小,因此可以利用摆动光谱的 Q 支相对强度(即 Q 支光谱强度与 P、Q、R 支光谱总强度的比值)来表示电场强度的大小。同时,计算了电场强度大小与分子取向度的关系,发现分子取向度随电场强度的增大而逐渐增大。通过进一步计算,给出了分子取向度与其摆动光谱的 Q 支相对强度的关系,并提出采用摆动光谱的 Q 支相对强度实现分子取向度测量的新方法。

关键词 光谱学; 摆动光谱; 分子取向度; 极性线性分子

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1030001

Dependence of Q-Branch Intensity of Pendular State Molecules on Electric Field and Molecular Orientation and Their Applications

Mao Fei Deng Min Wang Hailing Yin Jianping

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract A new method to measure the orientation of cold polar linear molecules using the relative intensity of the Q branch spectrum of the pendular state of linear molecules is presented. The relationship between the orientation of HCN-N₂ and Q-branch intensity of pendular state spectrum of the C—H stretch of the ground state of HCN-N₂ is studied, and it is found that the intensity of its Q branch spectrum increases with the increase of the electric field strength, but the intensity of the R- and P- branches decreases with the increase of the electric field strength. The relative intensity of the Q branch spectrum (ratio of spectral intensity of Q branch and total intensity of P, Q, R branches) can be used to represent the electric field intensity. Also, the study shows the orientation of the molecule increases with the increase of electric field strength. So it is proposed that the method which uses the relative intensity of the Q branch spectrum can be applied to measure the orientation of the polar molecule.

Key words spectroscopy; pendular spectroscopy; molecular orientation; polar linear molecules

OCIS codes 300.6390; 300.6340; 300.2530

1 引 言

自从1991年Friedrich等^[1]提出分子摆动态的概念以来,研究人员对强场中分子的摆动态光谱开展了很多研究,比如利用分子的摆动态光谱去测量分子的电偶极矩^[2]以及研究分子的电偶极矩在电场中的变化^[3]等。Miller小组于1992年首先在实验中利用红外激光分子束光谱的方法获得了线性分子(HCN)_n在强电场中

收稿日期: 2015-05-14; 收到修改稿日期: 2015-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(61205198, 10674047, 10804031, 10904037, 10974055, 11034002, 11205198, 11274114)、科技部量子调控重大研究计划(2006CB921604, 2011CB921602)

作者简介: 冒 飞(1983—),男,硕士研究生,主要从事分子的摆动光谱方面的研究。E-mail: maofei@ecnu.cn

导师简介: 印建平(1955—),男,博士,教授,主要从事原子分子与量子光学方面的研究。E-mail: jpyin@phy.ecnu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: hlwang@phy.ecnu.edu.cn

的摆动光谱^[4]。同时, Friedrich等^[5]通过理论计算给出(HCN)₃分子的摆动光谱与 Miller小组的实验结果完全一致。随后, Friedrich小组利用交叉分子束的方法研究了 ICl 的摆动光谱^[6]。1995年, Miller等^[7]测量了电偶极矩与转动常数比值更大的线性(HCCCN)₃分子 C—H 伸缩振动的 ν_1 振动带的摆动光谱。2009年, Miller小组研究了强电场下 CH₃-H₂O 自由基复合物分子取向的稳定性, 分子的红外转动光谱结构在外场中坍塌为单个摆动光谱峰^[8]。同年, Shvartsburg等^[9]研究了室温下生物大分子蛋白质在外电场中摆动取向, 通过分子取向度的不同能够区分不同的构象异构体。2011年, Friedrich等^[10]提出采用囚禁的超冷极性分子摆动态之间的纠缠作为量子比特能够制造量子计算机。

分子取向一直是立体化学动力学的一个重要课题^[11]。在解离动力学中, 通过测量不同取向分子在不同偏振方向上的光谱可以了解相应的解离、电离过程的差异^[12]; 在分子反应动力学中, 分子排列取向的操控可以用来研究反应中容易发生作用的是分子的哪一端及其相应的机理^[13]; 在光电离实验中, 可以用来控制分子的电离效率、分子的解离产物和分离光解碎片^[14]; 在交叉分子束散射实验中, 可以研究化学反应中的分子空间排列^[15]等。1966年, Olah小组和 Brooks小组通过分子束实验使用对称陀螺分子 CH₃I 分别与 Rb 原子和 K 原子碰撞产生取向^[16-17]。1985年, Kaesdorf等^[18]利用真空紫外激光电离测量处于六极杆中的对称陀螺分子 CH₃I 超声束的取向。1990年, Mackay等^[19]研究了对称陀螺分子 CHF₃ 在石墨表面散射的取向。1991年, Friedrich等^[20]从理论上提出处于低转动温度的极性线性分子在电场中能够产生取向, 同时 Loesch等^[21]也提出利用强静电场可以实现对称陀螺分子 CH₃I 的取向, 1993年, Friedrich等^[22]在实验上利用强电场实现了对 ICl 分子的取向。1999年, Friedrich等^[23]首先提出采用非共振的激光场和与激光场偏振方向平行的静电场的混合场对分子进行取向, 能够显著提高线性极性分子的取向度, 并在 2008 年研究了混合场对对称陀螺分子的取向^[24]。2003年, Sakai等^[25]首先实现了羰基硫(OCS)分子在混合场中的取向, 2012年, Friedrich等^[26]从理论和实验上研究了 OCS 分子取向度与激光场强度和静电场强度的依赖关系。

迄今为止, 已提出了多种测量分子取向度的方法。例如, Olah^[16]与 Brooks^[17]使用表面离子探测器来测量分子撞击固体表面后产生的离子强度, 通过改变取向电场的方向测量离子的不同强度得到分子的取向度。Kaesdorf等^[18]开始使用线偏振的真空紫外(VUV)激光直接光解技术测量分子的取向度。Gandhi等^[27]采用时间飞行(TOF)质谱仪探测光解后的分子碎片获得分子的取向度。Parker等^[28]采用双光子电离, 共振电离, 三光子电离实现光致碎片过程, 通过 TOF 质谱仪测量分子取向度。1988年, Janssen等^[29]采用共振增强多光子电离(REMPI)过程实现光致碎片测量分子取向度。1993年, Friedrich小组提出利用测量外场诱导光谱线的移位来获得取向度的大小^[22]。然而, 有关摆动光谱的 Q 支强度与电场强度、分子取向度的依赖关系及其在电场强度、分子取向度测量中的应用至今尚未被详细研究与讨论。

为此, 本文详细研究了不同转动温度下 HCN-N₂ 分子基电子态的 ν_1 振动带(C—H 振动)振转跃迁的 Q 支相对光谱强度与外加电场强度、分子取向度的依赖关系, 并提出了一种采用激光诱导荧光光谱技术实现分子取向度测量的摆动光谱新方法。

目前, 光谱探测主要有吸收光谱法和激光诱导荧光光谱法, 吸收光谱法在大气监测 CO₂^[30]和 H₂O^[31]中有着广泛的应用, 2013年, 吴志伟等^[32]搭建的基于 LabView 的气体高分辨率光谱探测系统具有较高的探测灵敏度和光谱精度。激光诱导荧光光谱法在低浓度测量和定量分析中应用广泛^[33], 2014年, 陈玲红等^[34]研究了激光诱导辐射的非傅里叶现象。由于荧光光谱具有很高的时间和空间分辨率, 又由于极性线性分子摆动光谱的 Q 支强度是随着电场强度的增大从零开始快速增强的, 故本文提出的测量分子取向度的摆动光谱新方法具有高分辨、高灵敏度的优点。

2 理论模型

无外电场时, 线性分子(刚性转子模型)转动态的哈密顿量和矩阵元分别表述为^[35]

$$H_r = \frac{\hat{J}^2}{2I}, \quad (1)$$

$$\langle JM|H_r|JM\rangle = hBJ(J+1), \quad (2)$$

式中 H_r 为转动态的哈密顿量, \hat{J} 为转动量子数, I 为分子的转动惯量, B 为分子的 B 常数, h 为普朗克常数, M

为 J 在分子轴上的投影。

加上外电场后,考虑分子的电偶极矩 μ 与外电场 E 的相互作用,哈密顿量和矩阵元可以表示为^[36]

$$H_{\text{Stark}} = -\mu E \phi_{z_z}, \quad (3)$$

$$\langle J+1, M | H_{\text{Stark}} | J, M \rangle = \langle J, M | H_{\text{Stark}} | J+1, M \rangle = -\frac{\sqrt{(J+1)^2 - M^2}}{\sqrt{(2J+1)(2J+3)}} \mu E, \quad (4)$$

式中 μ 为分子的电偶极矩, E 为电场强度, ϕ_{z_z} 为电场与分子电偶极矩间夹角的余弦函数。

矩阵对角化后,得到的波函数是线性分子本征波函数的叠加^[22]:

$$|\psi\rangle = \sum_J a_{JM} |JM\rangle, \quad (5)$$

式中 a_{JM} 为叠加系数。

光谱强度由跃迁强度因子乘以转动态的布居数得到。跃迁强度因子的计算公式为^[22]

$$S(\nu) = \sum_{J, J', Q, q} a_{J'K'M'}^2 a_{JKM}^2 (2J''+1)(2J'+1) \begin{pmatrix} J'' & 1 & J' \\ -M'' & Q & M' \end{pmatrix}^2 \begin{pmatrix} J'' & 1 & J' \\ K'' & q & K' \end{pmatrix}^2, \quad (6)$$

式中''表示下能级态,'表示上能极态, J'' 为下态的转动量子数, M'' 为 J'' 在惯量主轴上的投影, $a_{J'K'M'}$ 为下态的叠加系数, $Q=0, \pm 1$ 是指电场矢量在空间坐标系下的球谐分量, $q=0, \pm 1$ 是指跃迁偶极矩算符 μ_q 在分子坐标下的分量。

对于线性分子, K'', K' 与 q 均取 0, 平行跃迁时 $Q=0$, 垂直跃迁时 $Q=\pm 1$ 。

无外电场时,分子的转动布居数满足麦克斯韦-玻尔兹曼分布:

$$P(J) = \frac{N_J}{N} = \frac{g_J \exp(-E_J/kT)}{\sum_J g_J \exp(-E_J/kT)}, \quad (7)$$

式中 N_J 为转动态 J 能级上的布居数, N 为转动态所有能级上的布居数, $g_J = 2J+1$ 为转动能级 J 的简并度, E_J 为转动能量, k 为玻尔兹曼常数, T 为转动温度。加上外场后,电场使原来的能级发生了移位,但分子与分子之间没有发生碰撞,且辐射尚未产生,因此分子的转动布居数并未改变。

计算中,光谱的线型选为洛伦兹线型^[37],半峰全宽(FWHM)为分子常数 B 的 $1/4$ ^[38]。

分子取向度用每个能级取向度乘以对应的布居数表示,表达式为^[39]

$$\langle \cos \theta \rangle = \sum_{J, M} P(J) \langle JM | \cos \theta | JM \rangle, \quad (8)$$

式中 $\langle \cos \theta \rangle$ 为分子取向度, $P(J)$ 为 J 量子数上的分子布居数,方向余弦矩阵元可以表示为^[35]

$$\langle J+1, M | \cos \theta | J, M \rangle = \langle J, M | \cos \theta | J+1, M \rangle = \frac{\sqrt{(J+1)^2 - M^2}}{\sqrt{(2J+1)(2J+3)}}. \quad (9)$$

3 计算结果与讨论

计算了转动温度为 5 K 时线性分子 HCN-N₂ 基电子态 ν_1 振动带(C—H 伸缩振动)的 $v'=1 \rightarrow v''=0$ 的振转跃迁谱。HCN-N₂ 基电子态 ν_1 振动带的振动态 v' 和 v'' 的偶极矩分别为 3.04 D 和 3.085 D, 转动常数 B 分别为 0.052513 cm^{-1} 和 0.052138 cm^{-1} ^[40]。计算所得的摆动光谱如图 1 所示。从图中可以看出,在平行跃迁时出现 Q 支光谱,并且 Q 支光谱的强度随着电场强度的增大而增强。

图 2 给出了转动温度分别为 0.25 K, 5 K 和 20 K 时 HCN-N₂ 分子的 ν_1 振动的 Q 支光谱相对强度与取向度随电场强度变化的曲线。由图 2(b) 可知, HCN-N₂ 分子 ν_1 振动的 Q 支光谱相对强度随电场的增大而增强,但对于不同转动温度其增加幅度不同。特别地,当转动温度为 0.25 K 时, Q 支光谱相对强度在 0~200 kV/cm 电场范围内迅速增加,之后趋于饱和(Q 支光谱相对强度大于 0.98); 当转动温度为 5 K 时, Q 支光谱相对强度随着电场增加其增幅较缓,当电场达到 2000 kV/cm 时接近饱和; 而当转动温度为 20 K 时, Q 支光谱相对强度增幅更加缓慢,在电场强度为 3000 kV/cm 时仍未达到饱和(此时 Q 支光谱相对强度仅为 0.94)。通过计算发现

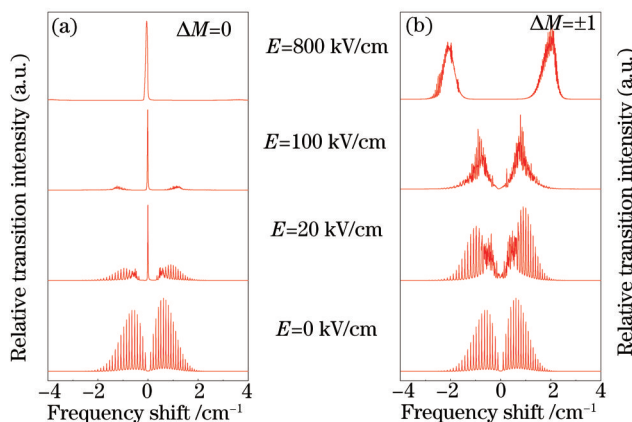


图1 HCN-N₂分子在不同外电场中的振转光谱。(a) 平行跃迁; (b) 垂直跃迁
Fig.1 Calculated rovibrational spectra of HCN-N₂ molecules. (a) Parallel transitions; (b) perpendicular transitions

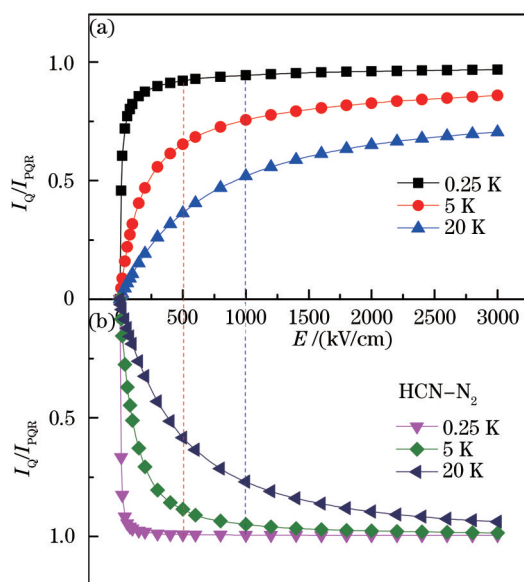
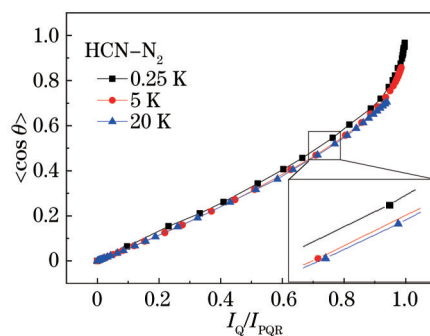


图2 (a) HCN-N₂分子的取向度与电场的依赖关系; (b) HCN-N₂分子的Q支光谱相对强度与电场的依赖关系
Fig.2 (a) Relation of orientation of HCN-N₂ molecules versus electric field; (b) Q-branch relative intensity of HCN-N₂ molecules versus electric field

HCN-N₂分子 ν_1 振动的取向度随着电场强度的变化也有相似现象,如图2(a)所示。极性分子的取向度与转动温度有关,在相同的电场强度下,分子的转动温度越低,其取向程度越高。当电场强度为500 kV/cm(图2中红色虚线),分子转动温度分别为0.25 K,5 K和20 K时,分子取向度分别为0.920,0.653和0.363,对应的Q支光谱相对强度为0.992,0.886和0.585;当电场强度为1000 kV/cm(图2中蓝色虚线),分子转动温度分别为0.25 K,5 K和20 K时,分子取向度分别为0.944,0.755和0.519,对应的Q支光谱相对强度为0.994,0.950和0.770;当电场强度为3000 kV/cm,转动温度分别为0.25 K,5 K和20 K时,HCN-N₂分子相对应的取向度分别为0.967,0.858和0.705,对应的Q支光谱强度为0.996,0.985和0.939。

图3给出转动温度分别为0.25 K,5 K和20 K时HCN-N₂分子 ν_1 振动的Q支光谱相对强度与其取向度的关系曲线。在相同Q支相对强度时,转动温度越低,分子取向度越高。不同转动温度下,Q支相对强度与分子取向度随电场变化的趋势相同,因此,在不同转动温度下,Q支光谱相对强度与分子取向度的关系曲线偏移程度较小。由此可见,根据图3所示的线性分子Q支光谱相对强度与取向度的依赖关系,可以通过测量分子摆动态光谱的Q支光谱相对强度,从而得到分子取向度信息。

图3 HCN-N₂分子的取向度与Q支光谱强度的关系Fig.3 Relation of orientation of HCN-N₂ and relative spectral intensity of Q branch

根据图3中HCN-N₂分子 ν_1 振动的Q支光谱相对强度与其取向度的依赖关系,提出采用激光诱导荧光光谱方法测量HCN-N₂分子的摆动态光谱,从而获取分子取向度的新方法。

4 结 论

计算了极性线性分子HCN-N₂在不同外电场强度中的摆动光谱,给出了其平行跃迁Q支光谱相对强度和取向度的关系,提出可以利用其Q支光谱相对强度来测量分子取向度的方法。分析了HCN-N₂分子不同的转动温度对Q支光谱相对强度和取向度的影响:当转动温度越低时,其Q支光谱相对强度接近饱和时所需电场强度越小;在相同电场强度下,分子的转动温度越低其取向度越高。因此,利用分子取向度与摆动光谱的Q支相对强度的关系,通过测量分子摆动光谱的Q支相对强度获得了分子取向度。

参 考 文 献

- 1 Friedrich B, Herschbach D R. Spatial orientation of molecules in strong electric fields and evidence for pendular states[J]. Nature, 1991, 353(6343): 412-414.
- 2 Durand A, Loison J C, Vigue J. Spectroscopy of pendular states: Determination of the electric dipole moment of ICl in the X¹Σ⁺ (v''=0) and A³Π₁ (v'=6-29) levels[J]. J Chem Phys, 1997, 106(2): 477-484.
- 3 Kanya R, Ohshima Y. Determination of dipole moment change on the electronic excitation of isolated Coumarin 153 by pendular-state spectroscopy[J]. Chem Phys Lett, 2003, 370(1-2): 211-217.
- 4 Block P A, Bohac E J, Miller R E. Spectroscopy of pendular states: The use of molecular complexes in achieving orientation[J]. Phys Rev Lett, 1992, 68(9): 1303-1306.
- 5 Rost J M, Griffin J C, Friedrich B, *et al.*. Pendular states and spectra of oriented linear molecules[J]. Phys Rev Lett, 1992, 68(9): 1299-1302.
- 6 Friedrich B, Rubahn H G, Sathyamurthy N. State-resolved scattering of molecules in pendular states: ICl+Ar[J]. Phys Rev Lett, 1992, 69(17): 2487-2490.
- 7 Yang X, Kerstel E R T, Scoles G, *et al.*. High resolution infrared molecular beam spectroscopy of cyanoacetylene clusters[J]. J Chem Phys, 1995, 103(20): 8828-8839.
- 8 Rudic S, Merritty J M, Miller R E. Study of the CH₃-H₂O radical complex stabilized in helium nanodroplets[J]. Phys Chem Chem Phys, 2009, 11(26): 5345-5352.
- 9 Shvartsburg A A, Noskov S Y, Purves R W, *et al.*. Pendular proteins in gases and new avenues for characterization of macromolecules by ion mobility spectrometry[J]. PNAS, 2009, 106(16): 6495-6500.
- 10 Wei Q, Kais S, Friedrich B, *et al.*. Entanglement of polar symmetric top molecules as candidate qubits[J]. J Chem Phys, 2011, 135(15): 154102.
- 11 Loesch H J. Orientation and alignment in reactive beam collisions: Recent progress[J]. Annu Rev Phys Chem, 1995, 46(12): 555-594.
- 12 Werner U, Kabachnik N M, Kondratyev V N, *et al.*. Orientation effects in multiple ionization of molecules by fast ions[J]. Phys Rev Lett, 1997, 79(9): 1662-1665.
- 13 Taylor W S, Abrams M L, Matthews C, *et al.*. State-specific reactions of Cu⁺(¹S, ³D) with CH₃X and CF₃X (X = Cl, Br, I): Exploring the influence of dipole orientation on association and C-X bond activation[J]. J Phys Chem A, 2012, 116(16): 3979-3988.

- 14 Rakitzis T P, Van Den Brom A J, Janssen M H M. Directional dynamics in the photodissociation of oriented molecules[J]. *Science*, 2004, 303(5665): 1852–1854.
- 15 Casavecchia P, Leonori F, Balucani N, *et al.*. Probing the dynamics of polyatomic multichannel elementary reactions by crossed molecular beam experiments with soft electron-ionization mass spectrometer[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2009, 11: 46–65.
- 16 Beuhler Jr R J, Bernstein R B, Kramer K H. Observation of the reactive asymmetry of methyl iodide. Crossed beam study of the reaction of rubidium with oriented methyl iodide molecules[J]. *J Am Chem Soc*, 1966, 88(22): 5331–5332.
- 17 Brooks P R, Jones E M. Reactive scattering of K atoms from oriented CH₃I molecules[J]. *J Chem Phys*, 1966, 45(9): 3499–3450.
- 18 Kaesdorf S, Schonhense G, Heinzmann U. Experimental angular-resolved photoelectron spectroscopy of free oriented CH₃I molecules[J]. *Phys Rev Lett*, 1985, 54(9): 885–888.
- 19 Mackay R S, Curtiss T J, Bernstein R B. Strong orientation dependence of the scattering of fluoroform by graphite (0001)[J]. *J Chem Phys*, 1990, 92(1): 801–802.
- 20 Friedrich B, Herschbach D R. On the possibility of orienting rotationally cooled polar molecules in an electric field[J]. *Z Phys D: Atoms, Molecules and Clusters*, 1991, 18(2): 153–161.
- 21 Loesch H J, Remscheid A. Brute force in molecular reaction dynamics: A novel technique for measuring steric effects[J]. *J Chem Phys*, 1990, 93(7): 4779–4790.
- 22 Friedrich B, Herschbach D R, Rost J M, *et al.*. Optical spectra of spatially oriented molecules: ICl in a strong electric field[J]. *J Chem Soc Faraday Trans*, 1993, 89(10): 1539–1549.
- 23 Friedrich B, Herschbach D. Enhanced orientation of polar molecules by combined electrostatic and nonresonant induced dipole forces [J]. *J Chem Phys*, 1999, 111(14): 6157–6160.
- 24 Hartelt M, Friedrich B. Directional states of symmetric-top molecules produced by combined static and radiative electric fields[J]. *J Chem Phys*, 2008, 128(22): 224313.
- 25 Sakai H, Minemoto S, Nanjo H, *et al.*. Controlling the orientation of polar molecules with combined electrostatic and pulsed, nonresonant laser fields[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 90(8): 083001.
- 26 Nielsen J H, Stapelfeldt H, Kupper J, *et al.*. Making the best of mixed-field orientation of polar molecules: A recipe for achieving adiabatic dynamics in an electrostatic field combined with laser pulses[J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 108(19): 193001.
- 27 Gandhi S R, Curtiss T J, Bernstein R B. Asymmetry of the polarized-laser-induced photofragmentation of oriented CH₃I molecules[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 59(26): 2951–2954.
- 28 Parker D H. *Ultrasensitive Laser Techniques*[M]. New York: Academic Press, 1983: 233–309.
- 29 Thoman J W, Chandler D W, Parker, D H, *et al.*. Two-dimensional imaging of photofragments[J]. *Laser Chem*, 1988, 9(1–3): 27–46.
- 30 Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yabai, *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1208003.
袁 松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 基于可调谐半导体激光光谱大气 CO₂ 监测仪[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1208003.
- 31 He Ying, Zhang Yujun, Wang Liming, *et al.*. Laser technology for CO₂ and H₂O on-line detection in large-scale region[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0115003.
何 莹, 张玉钧, 王立明, 等. 大尺度区域 CO₂ 和 H₂O 的激光在线检测技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0115003.
- 32 Long Jingming, Zhou Weidong, Wu Zhiwei, *et al.*. A high sensitive spectral detection system of gaseous measurement based on LabVIEW [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0115003.
龙精明, 周卫东, 吴志伟, 等. 基于 LabVIEW 的气体高分辨率光谱探测系统[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0115003.
- 33 Ma Jing. Low-concentration detection of chlorobenzene based on laser Raman spectroscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0215001.
马 靖. 基于激光拉曼光谱的氯苯低浓度探测[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0215001.
- 34 Chen Linghong, Zuo Lei, Wu Jian, *et al.*. Analysis of non-Fourier effect during laser-induced radiation of micro scale carbon particulates [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0408005.
陈玲红, 左 磊, 吴 建, 等. 微尺度碳粒的激光诱导辐射非傅里叶现象分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0408005.
- 35 Gordy W, Cook R L. *Microwave Molecular Spectra*[M]. New York: John Wiley & Sons Press, 1984: 33–619.
- 36 Chang Y P, Filsinger F, Sartakov B G, *et al.*. CMistark: Python package for the Stark-effect calculation and symmetry classification of linear, symmetric and asymmetric top wavefunctions in dc electric fields[J]. *Comput Phys Commun*, 2014, 185(1): 339–349.
- 37 Chen Yangqin, Yang Xiaohua. *Laser Spectroscopy Technology*[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2006: 8–9.
陈扬颢, 杨晓华. *激光光谱测量技术*[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2006: 8–9.

- 38 Friedrich B, Herschbach D. Alignment enhanced spectra of molecules in intense non-resonant laser fields[J]. Chem Phys Lett, 1996, 262(1-2): 41-46.
- 39 Deng Min. The Investigation of Pendular Spectra of Cold Molecules and Its Applications[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013: 15-16.
邓 敏. 冷分子的摆动光谱及其应用研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013: 15-16.
- 40 Jucks K W, Miller R E. Sub-Doppler resolution infrared spectra of the isoelectronic pair: N_2-HCN and $OC-HCN$ [J]. J Chem Phys, 1988, 89(3): 1262-1267.

栏目编辑: 吴秀娟