

文章编号 1004-924X(2013)08-1923-06

## 用简并四波混频法实现铷、铯、钾的同位素痕量测量

程雪梅,任兆玉\*,尹逊莉,费坤,白晋涛

(西北大学光子学与光子技术研究所暨光电技术与功能材料省部共建  
国家重点实验室培育基地,陕西西安 710069)

**摘要:**考虑用质谱法进行同位素分析存在分辨率有限、检出限高、样品预处理过程复杂等缺陷,提出了采用简并四波混频(DFWM)光谱技术来测量和分析同位素。选择氯化物中的 Rb、Cs 和 K 的同位素作为测试样品,用石墨炉原子化器将化合物原子化为原子蒸汽。通过对 Rb、Cs 和 K 的同位素进行分析发现:DFWM 光谱技术的分辨率很高,能够清楚地分辨 3 种元素的同位素以及超精细能级跃迁;对 RbCl 样品中的 Rb 同位素的丰度比值进行了测量,得到的丰度比值为  $(2.649 \pm 0.002)$ ,精度优于传统质谱法的测量结果。此外,DFWM 光谱技术测量 Rb、Cs 和 K 同位素的检出限分别为 5.4 fg/mL,0.63 pg/mL 和 0.09 fg/mL。实验结果表明,相对于质谱法,DFWM 光谱技术的测量精度更高,检出限更低,在同位素分析中具有明显的优势。

**关键词:**非线性激光光谱法;简并四波混频;同位素;痕量测量;分辨率;检出限

**中图分类号:**O437;O657.319 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132108.1923

### Trace measurement of isotopes for rubidium, cesium and potassium with degenerate four-wave mixing method

CHENG Xue-mei, REN Zhao-yu\*, YIN Xun-li, FEI Kun, BAI Jin-tao

(*Institute of Photonics and Photon-technology & National Key Laboratory of Photoelectric Technology and Functional Materials, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: rzy@nuu.edu.cn*

**Abstract:** In consideration of the drawbacks of mass-spectrometry in isotope analysis, a spectroscopy based on Degenerate Four-wave Mixing (DFWM) was proposed to analyze atomic isotopes and to overcome these limitations, like limited resolution, higher detection limits and complex sample preprocessing. Rubidium (Rb), cesium (Cs) and potassium (K) isotopes were selected as measured samples and an atomizer based on graphite oven was used to atomize these compounds into atomic steams. The analytic results show that the DFWM spectroscopy has a higher resolution and it can distinguish isotopes and hyperfine structures of the three elements clearly. The measured isotope abundance ratio of Rb isotope is  $(2.649 \pm 0.002)$ , which is superior to the sensitivity of traditional mass spectroscopy. The detection limits of proposed method is as low as 5.4 fg/ml, 0.63 pg/mL and 0.09 fg/mL for Rb, Cs and K isotopes, respectively. Obtained results demonstrate that the spectroscopy based on DFWM

**收稿日期:**2013-03-28;**修订日期:**2013-04-16.

**基金项目:**国家 973 重点基础研究发展计划前期研究专项资助项目(No. 2010CB434811, No. 2012CB723407);国家自然科学基金资助项目(No. 10874139)

has a higher resolution, lower detection limit and is more suitable for the isotope analysis as compared with the original mass spectrometry.

**Key words:** nonlinear spectrometry; Degenerate Four-wave Mixing (DFWM) method; isotope; trace measurement; resolution; detection limit

## 1 引言

近年来,随着环境问题的日益严重,环境污染物的痕量监测也变得更加重要<sup>[1-2]</sup>,其中,同位素在环境污染物痕量监测中发挥着非常重要的作用。通过分析和测量环境样品中的同位素组成,人们可以追踪污染物的来源<sup>[3]</sup>,分析污染物的传播途径<sup>[4]</sup>,评价污染事件<sup>[5]</sup>等。在环境科学研究中经常用到铷(Rb),铯(Cs)和钾(K)的同位素。Rb有两个主要的同位素,<sup>85</sup>Rb和<sup>87</sup>Rb,平均自然丰度分别为72.17%和27.83%。Rb是铀-235(<sup>235</sup>U的衰变产物之一,产生2.55%<sup>87</sup>Rb和1.32%<sup>85</sup>Rb)。因此,Rb同位素的比值可以指示核污染的情况。Cs仅有一种稳定的同位素,<sup>133</sup>Cs。Cs的放射性同位素<sup>134</sup>Cs,<sup>135</sup>Cs,<sup>137</sup>Cs是核裂变的产物,一旦发生核泄漏,<sup>134</sup>Cs,<sup>135</sup>Cs,<sup>137</sup>Cs就会被释放到环境中,进入大气、水循环,进一步还会进入生物圈。由于和K的化学性质相似,Cs将取代骨头、肌肉和腺体组织中的K,在人和动物体内聚集,<sup>134</sup>Cs和<sup>137</sup>Cs释放出的 $\gamma$ 射线和 $\beta$ 射线会造成细胞损伤、变异和其它一些有害的副作用。K有3种主要的同位素<sup>39</sup>K,<sup>40</sup>K和<sup>41</sup>K,平均丰度分别为93.26%,0.01%和6.73%。在环境科学研究中,K的同位素经常被用作示踪同位素来研究风化作用等。

目前,质谱法是最常用的同位素测量与分析方法,但是这种方法有很多缺陷:首先,分辨率有限,比如对于Rb的同位素,<sup>85</sup>Rb的原子质量为84.911 789 738,而<sup>87</sup>Rb的原子质量为86.909 180 527,采用质谱法就很难将二者区分开来;其次,样品的预处理过程复杂。样品通常需要经过复杂的提纯和富集过程才能进行质谱法分析,这不仅增大了取样量,而且使分析速度慢;此外价格昂贵。由于一种元素的同位素之间的质量差异通常很小,所以对用于同位素分析的质谱系统的要求很高,有些质谱分析系统的价格可高达百万美元。

为了克服质谱法的这些缺陷,人们采用激光光谱技术来测量和分析同位素,并取得了很好的效果<sup>[6-10]</sup>。KING和Smith等人将激光剥蚀与激光吸收光谱技术或激光荧光光谱技术相结合,直接分析了岩石样品中Rb<sup>[6]</sup>和U<sup>[7]</sup>的同位素组成。Wizeman和Niemax则采用饱和吸收光谱技术分析了Rb<sup>[8]</sup>和Li<sup>[9]</sup>的同位素组成。Wahl等人采用腔衰荡光谱技术精确地测量了CO<sub>2</sub>样品中<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C的值<sup>[10]</sup>。

相对于线性光谱技术,非线性光谱技术具有更高的分辨率。其中,简并四波混频(Degenerate Four-wave Mixing, DFWM)光谱技术是中心对称介质(如气相原子、分子)分析中效率最高的一种非线性激光光谱技术。该技术可以消除多普勒展宽,因此具有高的光谱分辨率。另外,DFWM信号强度与样品浓度的平方成正比,因此灵敏度更高,可以反映待测物含量的微小变化。由于DFWM光谱技术具有这些突出的优点,1986年Ewart等人<sup>[11]</sup>首次将DFWM光谱技术用于甲烷-空气火焰中OH的检测中,从而开创了DFWM光谱技术用于痕量检测的新方法。经过20多年的发展,DFWM光谱技术已经在实时监测低浓度产物的瞬态过程<sup>[12]</sup>、检测燃烧物理的中间产物<sup>[13]</sup>、研究物质的非线性效应<sup>[14]</sup>等领域发挥着重要作用。

本文针对Rb原子的D<sub>2</sub>线(780.2 nm),Cs原子的D<sub>2</sub>线(852.3 nm),K原子的D<sub>1</sub>线(770.1 nm),采用DFWM光谱技术分析了氯化物中的Rb、Cs和K的同位素,取得了良好的检测结果。

## 2 实验研究

图1为实验装置的核心部分示意图。其中,PD和PBS分别代表光电探测器和偏振分光立方体;插图为人射光和DFWM信号的空间配置方式。三束入射光来自同一台环形钛宝石激光器(Spectra-physics, Matisse TR),其输出波长可以

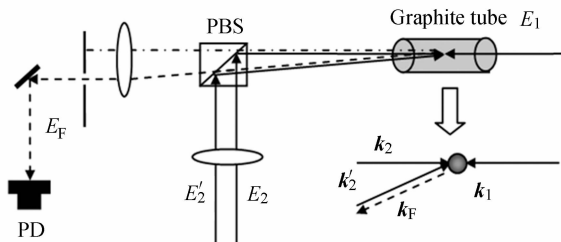


图 1 实验装置的核心部分示意图

Fig. 1 Scheme of key part of experimental setup

在 700~990 nm 连续调谐。 $E_1$  (波矢为  $k_1$ ) 和  $E_2$  ( $k_2$ ) 称为泵浦光,  $E_2'$  ( $k_2'$ ) 称为探测光。两束泵浦光沿着相反的方向传播, 探测光以一个小角度与泵浦光相交于石墨炉的炉管(样品池)中央。三束光同时与原子相互作用, 产生第四束光, 即 DFWM 信号  $E_F$  ( $k_F$ )。在实验中,  $E_1$  光为水平线偏振光,  $E_2$  和  $E_2'$  光为水平偏振光。为了满足相位匹配条件, DFWM 信号  $E_F$  为水平偏振光, 且沿着探测光  $E_2'$  的反方向传播。用一个小孔光阑阻挡透过偏振分光立方体(Polarized Beam Splitter, PBS)的  $E_1$  光, 仅使得信号光通过。信号光用硅光二极管来探测, 由示波器采集分析。在整个实验过程中,  $E_1$  和  $E_2$  光的功率均为 0.2 mW,  $E_2'$  光的功率为 0.1 mW。

所采用的样品与试剂包括: RbCl(光谱纯), CsCl(光谱纯), KCl(光谱纯), 二次去离子水。样品的处理方法是 将 1.41 g RbCl 溶于 1 L 二次去离子水中得到 1 g/L 的 Rb 水溶液。CsCl 和 KCl 的处理方法与 RbCl 样品的处理方法相同。

化合物在石墨炉(沈阳华光精密仪器, HGS-II)中原子化。石墨炉的升温程序如表 1 所示, 每次测量的进样量为 5  $\mu$ L。

表 1 石墨炉的升温过程

Tab. 1 Rising process of temperature of graphite tube

阶段	干燥	灰化	原子化	空烧
温度/ $^{\circ}$ C	120	500	2 000	2 200
时间/s	10	15	5	3

### 3 结果与讨论

图 2 为 Rb, Cs 和 K 同位素的 DFWM 光谱。

图 2(a)中, 处于低频的 DFWM 峰属于  $^{87}$ Rb, 处于高频的峰属于  $^{85}$ Rb。图 2(b)中的 2 个峰代表了  $^{133}$ Cs 的两个超精细跃迁, 分别为  $|6^2S_{1/2}, F=4\rangle \rightarrow |6^2P_{3/2}\rangle$  和  $|6^2S_{1/2}, F=3\rangle \rightarrow |6^2P_{3/2}\rangle$ 。图 2(c)中, 随着频率由低到高, 4 个峰分别代表了  $^{40}$ K ( $|4^2S_{1/2}, F=7/2\rangle \rightarrow |4^2P_{1/2}, F'=9/2\rangle$ ),  $^{39}$ K,  $^{41}$ K 和  $^{40}$ K ( $|4^2S_{1/2}, F=9/2\rangle \rightarrow |4^2P_{1/2}, F'=7/2\rangle$ )。从图 2 中可以看出 DFWM 光谱技术可以清楚地分辨 Rb, Cs 和 K 的同位素。

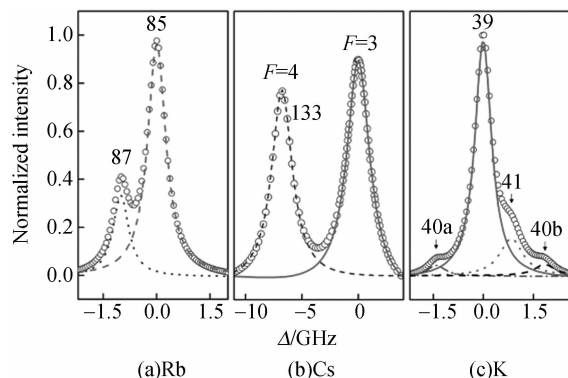


图 2 Rb 同位素,  $^{133}$ Cs 和 K 同位素的 DFWM 光谱  
Fig. 2 DFWM spectra of Rb isotopes,  $^{133}$ Cs hyperfine structures and K isotopes

然后, 本文以 Rb 为例, 测量 RbCl 样品中 Rb 同位素的丰度比值。理论上, 在 DFWM 过程中, 三阶非线性极化强度  $P^{(3)}$  的表达式为:

$$P^{(3)} = \frac{N\mu\Omega_1\Omega_2'\Omega_2 e^{i\omega t}}{(\Delta - i\gamma_1)(\Delta - i\gamma_1)(i\gamma_0)}, \quad (1)$$

其中:  $\Omega_i = 2|\mu E_i|/\hbar$  ( $i=1, 2$ ) 为入射光的拉比频率,  $\Delta = \omega - \omega_0$  为入射光的频率失谐量,  $\mu$  为跃迁偶极矩,  $\gamma_1$  为偶极弛豫率,  $\gamma_0$  为基态弛豫率,  $N$  为原子数密度。DFWM 信号的振幅正比于三阶非线性极化强度  $P^{(3)}$ , 即 DFWM 信号强度  $I_F \propto |P^{(3)}|^2 \propto N^2$ , 因此  $^{85}$ Rb 和  $^{87}$ Rb 的 DFWM 信号强度比值满足  $^{85}I_F / ^{87}I_F \propto (^{85}N / ^{87}N)^2$ 。由此可见, 只要测量出  $^{85}$ Rb 和  $^{87}$ Rb 的 DFWM 信号强度的比值, 就可以推算出 Rb 同位素的丰度比值。

然而, 在实际测量中发现, 由于 DFWM 信号的频率与入射光相同, 也与介质共振, 故 DFWM 信号在样品池中的传播过程存在共振吸收。考虑了吸收之后, DFWM 信号强度  $I_F \propto N^2 \exp(-N\alpha AL)$ 。其中,  $\alpha$  为吸收系数,  $A$  为 DFWM 信号

的光斑面积,  $L$  为信号的传播距离。吸收的程度与原子数密度密切相关, 原子数密度越大, 吸收越严重。 $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  的丰度不同, 各自的吸收程度也不同。此时,  $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$  的 DFWM 信号强度比值变为  $^{85}I_F / ^{87}I_F \propto (^{85}N / ^{87}N)^2 \exp[-(^{85}N - ^{87}N)\alpha AL]$ , 其中指数项的存在使得数据计算复杂, 另外在估算信号光斑面积(信号通常是肉眼看不见的)和传播距离时会引入较大的误差。因此, 在实际测量中, 要求样品浓度尽量低, 低至可以忽略共振吸收的程度。但是当样品浓度低时, 信噪比会降低。为了确定合适的样品浓度, 首先测量了不同浓度时的 DFWM 信号强度, 然后对信号强度  $I$  和样品浓度  $C$  分别取对数, 并以  $\lg C$  为横坐标,  $\lg I$  为纵坐标作图, 如图 3 所示。由图可知, 当  $\lg C < 1.5$  ( $C < 25 \text{ ng/mL}$ ) 时,  $\lg I$  随着  $\lg C$  线性增加, 线性拟合的斜率为 2.079, 这说明在此区间内, 信号强度  $I$  正比于浓度  $C$  的平方。因此, 采用样品浓度  $C < 25 \text{ ng/mL}$  的 RbCl 溶液进行同位素分析。

采用  $20 \text{ ng/mL}$  的 RbCl 水溶液进行同位素比值测定, 经过 20 次测量, 所得  $^{85}N / ^{87}N$  为  $(2.649 \pm 0.002)$ 。同样的样品 ICP-MS 的测量结果为  $(2.67 \pm 0.02)$ 。其中, 2.649 和 2.67 分别是 DFWM 光谱技术和 ICP-MS 进行 20 次测量之后所得到的平均值, 0.002 和 0.02 是测量误差。从结果可见, 两种方法所测得的 Rb 同位素丰度比值接近, 由此证明了 DFWM 方法在石墨炉中测量 Rb 同位素丰度比值的可行性。此外, DFWM 技术的误差比 ICP-MS 小了一个数量级, 这说明简并四波混频技术的测量精度更高。

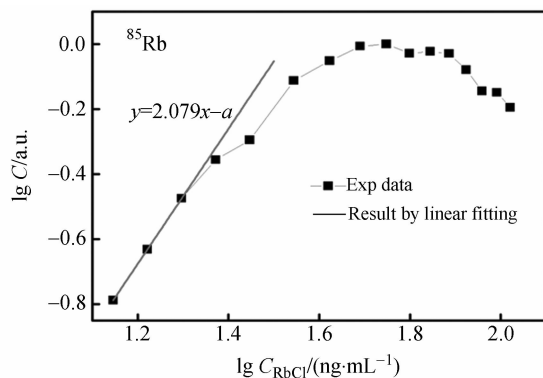


图 3  $^{85}\text{Rb}$  的 DFWM 信号强度的对数随 RbCl 水溶液浓度的对数的变化关系

Fig. 3 Logarithm of  $^{85}\text{Rb}$  DFWM intensity with respect to logarithm of sample concentration

本文还确定了 DFWM 光谱技术测量 Rb, Cs 和 K 的检出限。根据 IUPAC (1975) 的规定, 一种光谱技术的检出限  $D$  定义为采用该光谱技术所得的测量信号相当于 3 倍噪声电平时所对应的样品浓度。对于 DFWM 光谱技术, 在样品浓度很低时, 可以忽略样品对 DFWM 信号的共振吸收, 信号强度与浓度的平方成正比, 即:

$$I = \kappa C^2. \quad (2)$$

所以, DFWM 光谱技术的检出限为:

$$D^2 = \frac{3\sigma}{\kappa} = \frac{C_b^2 \times 3\sigma}{I_b}. \quad (3)$$

根据式(3)来确定 K, Rb 和 Cs 的 DFWM 的检出限。以 Rb 为例, 将激光波长设定为  $780.2424 \text{ nm}$ , 与  $^{85}\text{Rb}$  的  $|5S_{1/2}, F=3\rangle \rightarrow |5P_{3/2}\rangle$  跃迁共振, 采用  $1 \text{ pg/mL}$  的 RbCl 溶液进行了 20 次测量, 其中 5 次测量的 DFWM 信号如图 4 所示。计算得到, 标准偏差为  $1.5 \times 10^{-4}$ , 将其带入式(3), 通过计算可得 DFWM 测量 Rb 元素的检出限为  $5.4 \text{ fg/mL}$ 。同理, 确定了 Cs 和 K 的检出限分别为  $0.63 \text{ pg/mL}$  和  $0.09 \text{ fg/mL}$ 。K, Rb 和 Cs 均为碱金属, 由结果可知, 随着原子序数的增大, 检出限增高。这是因为石墨炉的高温会使部分基态原子电离, 从而减少了参与产生 DFWM 过程的基态原子总数。在这 3 种原子中, Cs 原子的电离能最小, 最容易被电离, 而 K 原子的电离能最大, 最难被电离。因此, Cs 的检出限最大, K 的检出限最小, 而 Rb 介于二者之间。

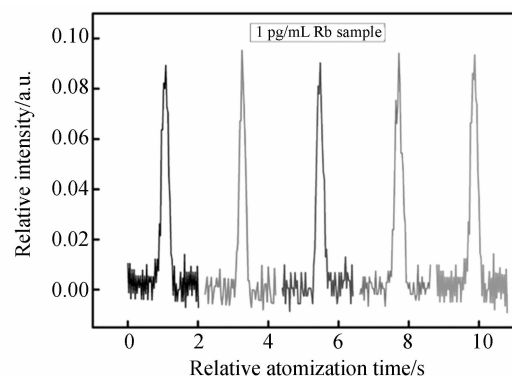


图 4 RbCl 样品中  $^{85}\text{Rb}$  的 5 次 DFWM 测量信号

Fig. 4 Typical signals of DFWM obtained with  $1 \text{ pg/mL}$  Rb sample solution in graphite furnace

图 5 为分别采用  $5 \text{ fg/mL}$  RbCl,  $0.5 \text{ pg/mL}$  CsCl 和  $0.05 \text{ fg/mL}$  KCl 水溶液时获得的  $^{85}\text{Rb}$ ,

$^{133}\text{Cs}$  和  $^{39}\text{K}$  的 DFWM 信号。由图可见,采用低于检出限浓度很多的样品溶液时,依然可以得到较为可观的 DFWM 信号。这显示了 DFWM 光谱技术在痕量同位素分析中的潜在应用价值。

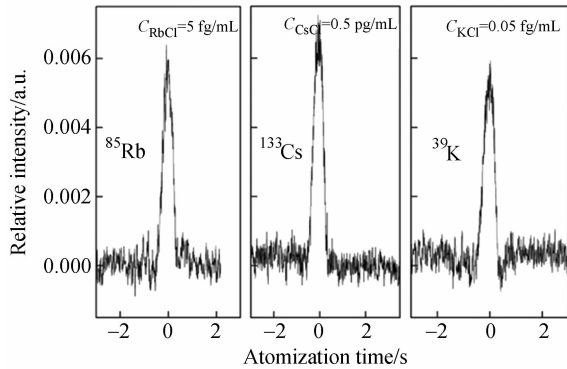


图 5  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{133}\text{Cs}$  和  $^{39}\text{K}$  的 DFWM 信号

Fig. 5 DFWM signals of  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{133}\text{Cs}$  and  $^{39}\text{K}$

## 4 结 论

本文采用 DFWM 光谱技术分析了 Rb, Cs 和 K 同位素,测量了 RbCl 样品中的 Rb 同位素的丰度比值,并确定了 DFWM 光谱技术的检出限。实验结果表明,DFWM 光谱能够清楚地分辨 Rb, Cs 和 K 同位素。用 DFWM 光谱技术测量得到 RbCl 样品中的 Rb 同位素丰度比值为  $(2.649 \pm 0.002)$ ,而同样的样品采用质谱法测量的结果是  $(2.67 \pm 0.02)$ ,可见 DFWM 光谱技术可以精确地测量出同位素的丰度比值,且其精度更高。此外,DFWM 光谱技术测量 Rb, Cs 和 K 同位素的检出限分别为  $5.4 \text{ fg/mL}$ ,  $0.63 \text{ pg/mL}$  和  $0.09 \text{ fg/mL}$ 。本研究说明相对于质谱法,DFWM 光谱技术的测量精度更高,检出限更低,在同位素分析中具有明显的优势。进一步的研究将有望使 DFWM 光谱技术成为环境科学等领域的一种新的检测手段。

## 参考文献:

- [1] 郑守国,李森,张健,等. 痕量  $\text{N}_2\text{O}$  气体检测系统的设计与实现[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2154-2160.  
ZHENG SH G, LI M, ZHANG J, *et al.*. Design and implementation of trace  $\text{N}_2\text{O}$  detection system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2154-2160. (in Chinese)
- [2] 周海金,刘文清,司福祺,等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2331-2337.  
ZHOU H J, LIU W Q, SI F Q, *et al.*. Stray light suppression of space-borne differential optical absorption spectrometer for monitoring atmospheric trace gas [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2331-2337. (in Chinese)
- [3] GREZZI G, AYUSO R A, VIVO B D, *et al.*. Lead isotopes in soils and groundwaters as tracers of the impact of human activities on the surface environment: the Domizio-Flegreo Littoral (Italy) case study [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 109(1): 51-58.
- [4] HOSONO T, WANG C, UMEZAWA Y, *et al.*. Multiple isotope (H, O, N, S and Sr) approach e-lucidates complex pollution causes in the shallow groundwaters of the Taipei urban area [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 397(1): 23-36.
- [5] LASCIO A D, ROSSI L, TUCKER P C, *et al.*. Stable isotope variation in macroinvertebrates indicates anthropogenic disturbance along an urban stretch of the river Tiber (Rome, Italy) [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 28: 107-114.
- [6] KING L A, GORNUSHKIN I B, PAPPAS D, *et al.*. Rubidium isotope measurements in solid samples by laser ablation-laser atomic absorption spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 1999, 54: 1771-1781.
- [7] SMITH B W, QUERNTMEIER A, BOLSHOV U M, *et al.*. Measurement of uranium isotope ratios in solid samples using laser ablation and diode laser-excited atomic fluorescence spectrometry [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 1999, 54: 943-958.
- [8] WIZEMANN H D, NIEMAX K. Isotope selective element analysis by diode laser atomic absorption spectrometry [J]. *Mikrochim. Acta*, 1998, 129: 209-216.
- [9] WIZEMANN H D, NIEMAX K. Measurement of  $^7\text{Li}/^6\text{Li}$  isotope ratios by resonant Doppler-free two-photon diode laser atomic absorption spectroscopy in

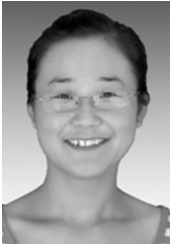
a low-pressure graphite furnace[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2000, 55: 637-650.

- [10] WAHL E H, FIDRIC B, RELLA C W, *et al.*. Applications of cavity ring-down spectroscopy to high precision isotope ratio measurement of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  in carbon dioxide [J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2006, 42: 21-35.
- [11] EWART P, O'LEARY S V. Measurement of relative extreme-wing absorption coefficients by excited-state degenerate four-wave mixing[J]. *Optics Letters*, 1986, 11: 279-281.
- [12] SUN Z W, LI Z S, LI B, *et al.*. Detection of  $\text{C}_2\text{H}_2$  and HCl using mid-infrared degenerate four-

wave mixing with stable beam alignment: towards practical in situ sensing of trace molecular species [J]. *Applied Physics B*, 2010, 98: 593-600.

- [13] WILLIAMS S, GREEN D S, SETHURAMAN S, *et al.*. Detection of trace species in hostile environments using degenerate four-wave mixing: CH in an atmospheric-pressure flame[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1992, 114: 9122-9130.
- [14] PALOMBA S, ZHANG S, PARK Y, *et al.*. Optical negative refraction by four-wave mixing in thin metallic nanostructures[J]. *Nature Materials*, 2012, 11:34-38.

#### 作者简介:



程雪梅(1985—),女,陕西榆林人,博士,讲师,2007年,2013年于西北大学分别获得学士、博士学位,主要从事非线性光谱技术及应用方面的研究。E-mail:chengxuemei111@sina.com



费坤(1989—),男,陕西西安人,硕士研究生,2012年于宝鸡文理学院获得学士学位,主要从事非线性光谱技术及应用方面的研究。E-mail:feikunbj@163.com



任兆玉(1957—),女,陕西临潼人,博士,教授,1982年于北京师范大学获得学士学位,1995年,2002年于西北大学分别获得硕士、博士学位,主要从事非线性光学,激光技术与器件,光电功能材料等方面的研究。E-mail: rzy@nwu.edu.cn



白晋涛(1959—),男,陕西绥德人,博士,教授,1982年,1990年于西北大学分别获得学士、硕士学位,2001年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事非线性光学、激光技术与器件、光电子学等方面的研究。E-mail:baijt@nwu.edu.cn



尹逊莉(1988—),女,黑龙江伊春人,博士研究生,2011年于西北大学获得学士学位,主要从事非线性光谱技术及应用方面的研究。E-mail:lixunli@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)