

氘含量对 DKDP 晶体横向受激拉曼散射增益系数的影响

柴向旭 李富全 王圣来 冯斌 朱启华 刘宝安 孙洵 许心光

Influence of deuteration degree on the transverse stimulated Raman scattering gain coefficient of DKDP crystal

Chai Xiang-Xu Li Fu-Quan Wang Sheng-Lai Feng Bin Zhu Qi-Hua Liu Bao-An Sun Xun Xu Xin-Guang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 034213 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034213

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034213>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低双折射光纤中拉曼增益对光偏振态的影响

[Effect of Raman gain on the state of polarization evolution in a low-birefringence fiber](#)

物理学报.2015, 64(3): 034212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034212>

拉曼增益对双折射光纤中孤子传输特性的影响

[Effect of Raman gain on the characteristic of soliton transmission in birefringence optical fiber](#)

物理学报.2014, 63(9): 094208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094208>

976 nm 激光抽运二氧化硅微球级联拉曼散射激光的研究

[Study of cascaded raman scattering laser in silica microsphere pumped by 976 nm laser](#)

物理学报.2013, 62(22): 224207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224207>

拉曼增益对孤子传输特性的影响

[Effect of Ramam gain on the characteristic of soliton propagation](#)

物理学报.2013, 62(10): 104212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.104212>

基于双向拉曼放大的相位敏感光时域反射仪

[Phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on bi-directional Raman amplification](#)

物理学报.2013, 62(4): 044212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044212>

氘含量对DKDP晶体横向受激拉曼散射增益系数的影响

柴向旭¹⁾²⁾ 李富全²⁾ 王圣来¹⁾ 冯斌²⁾ 朱启华²⁾ 刘宝安¹⁾
孙洵¹⁾ 许心光^{1)†}

1)(山东大学晶体材料国家重点实验室, 晶体材料研究所, 济南 250100)

2)(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2014年7月8日收到; 2014年8月18日收到修改稿)

本文测量了不同氘含量 $K(H_{1-x}D_x)_2PO_4$ 晶体 (DKDP 晶体) 在 $Z(XX)Y$ 散射配置下的自发拉曼散射光谱, 并详细分析了氘含量对与横向受激拉曼散射 (TSRS) 增益系数有关的拉曼频移、半峰宽和散射强度的影响. 然后通过与去离子水拉曼散射对比得出了不同氘含量 DKDP 晶体的 TSRS 增益系数. 结果表明随着氘含量的增加 DKDP 晶体的 TSRS 增益系数先减小至 KDP 晶体的 40.1%, 后增大至 68.9%; 本文认为掺氘后拉曼半峰宽的变化是引起 TSRS 增益系数随氘含量变化的主要原因.

关键词: DKDP 晶体, 氘含量, 增益系数, 拉曼频移

PACS: 42.65.Dr, 77.84.Fa, 67.80.fh, 78.30.-j

DOI: 10.7498/aps.64.034213

1 引言

KDP 晶体是一种性能优良的非线性光学材料, 在激光系统中可作为 Q 开关和倍频元件^[1,2]. 高功率密度激光入射到大口径薄 KDP 晶体中时, PO_4 基团的全对称伸缩振动模 (ν_1 模) 引起的自发拉曼散射光与抽运光耦合后受激放大, 由于晶体横向增益长度较大受激拉曼散射将在横向快速增长形成横向受激拉曼散射 (TSRS), 此 TSRS 效应不但会造成主激光能量损失, 且其强度可能会超过 KDP 晶体的损伤阈值造成晶体损伤, 因此寻求抑制 TSRS 的方法有重要意义^[3-8]. 与受激布里渊散射不同, 光学声子寿命较短增加抽运光带宽不能有效抑制 TSRS, 而将晶体分割的方法增加了光学系统的复杂性, 晶体侧面抛光打斜也抑制 TSRS 的作用有限^[4,9,10]. 研究表明 KDP 晶体掺氘后 (DKDP 晶体) TSRS 增益系数明显减小, 且 DKDP 晶体的其他光学性能优良, 在激光工程上有重大应用

前景^[1,4].

近年来国内外采用了两种方法测量 KDP/DKDP 晶体的 TSRS 增益系数: 一种是通过在线测量大口径 KDP/DKDP 晶体的 TSRS 光谱信号推算其 TSRS 增益系数, 目前为止利用此方法测量了 KDP 晶体和 80% DKDP 晶体的 TSRS 增益系数^[4,5,11-13]; 另一种是 Demos 等^[14,15] 通过和水的自发拉曼光谱对比测量了 KDP 和 70%, 99% DKDP 晶体的 TSRS 增益系数. 由于测量的方法和条件以及晶体的差别导致测得的 KDP/DKDP 晶体的 TSRS 增益系数存在较大差异, 且已测量的不同氘含量的 DKDP 晶体的样品较少且晶体生长条件各异, 故难以定量得出氘含量对 TSRS 增益系数的影响以及降低 TSRS 效应的最佳氘含量. 本文主要研究了 DKDP 晶体氘含量和 TSRS 增益系数的关系, 首次得出了降低 DKDP 晶体 TSRS 效应的最佳氘含量, 并建立了利用 DKDP 晶体 ν_1 振动模拉曼峰位判断其 TSRS 增益系数的方法.

† 通信作者. E-mail: xgxu@sdu.edu.cn

2 实验

2.1 实验原理

KDP/DKDP 晶体中 PO_4 基团的 ν_1 振动模半峰宽约为 $20\text{--}40\text{ cm}^{-1}$, 对应的晶格振动弛豫时间 ($\tau = 1/\pi c\Delta\nu$) 为 $0.26\text{--}0.54\text{ ps}$ [16,17], 脉宽大于 30 ps 的抽运脉冲激发时受激拉曼散射可看成稳态激发过程, 其增益系数为 [14,18]

$$g = \frac{8\pi c M}{\hbar\omega_s^3 n^2 \Delta\nu} \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega}, \quad (1)$$

其中 c 为光速; M 为分子数密度; ω_s 为 Stokes 光的角频率; n 为折射率; $\Delta\nu$ 是拉曼散射的半峰宽; $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 为拉曼散射截面.

散射截面通常采用自发拉曼光谱对比的方法求得, 已知样品 B 的散射截面, 样品 A 的散射截面为 [14]

$$\left(\frac{d\sigma_A}{d\Omega}\right)_{90^\circ} = \left(\frac{F_A}{F_B}\right) \left(\frac{n_A}{n_B}\right)^2 \left(\frac{1-R_B}{1-R_A}\right) \left(\frac{M_B}{M_A}\right) \times \left(\frac{1+\rho_A}{1+\rho_B}\right) \left(\frac{d\sigma_B}{d\Omega}\right)_{90^\circ}, \quad (2)$$

F 表示测得的散射光谱强度; R 表示由于样品的吸收和反射造成的透过率损失量; ρ 表示拉曼散射的退偏度. 因此样品 A 的受激拉曼散射增益系数为

$$g_A = \frac{8\pi c F_A (1+\rho_A)}{\hbar\omega_s^3 \Delta\nu (1-R_A)} \cdot \frac{M_B (1-R_B)}{F_B n_B^2 (1+\rho_B)} \frac{d\sigma_B}{d\Omega}. \quad (3)$$

根据拉曼散射选择定则可知非极性模的拉曼散射强度为 [19]

$$F = A' \left| \sum_{\alpha\beta} e_i^\alpha S_{\alpha\beta} e_s^\beta \right|^2 \quad (4)$$

其中 e_i^α 和 e_s^β 是抽运光和散射光的偏振方向单位矢量在主轴 α, β 方向的分量, $S_{\alpha\beta}$ 为振动模的拉曼散射矩阵, 研究表明 KDP 晶体 ν_1 振动模具有明显的角度特性, 其拉曼散射矩阵为 [11]

$$S_{i,j} = \begin{pmatrix} a & c(\psi) & 0 \\ c(\psi) & a & 0 \\ 0 & 0 & b \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$c(\psi) = \sqrt{\frac{2}{3}} a |\cos \psi|,$$

其中 ψ 为声子波矢与晶体 Z 轴的夹角.

由 (4) 和 (5) 式可以求得不同散射配置下的退偏度, $Z(XX)Y$ 散射配置下 KDP/DKDP 晶体拉曼

散射退偏度 $\rho = 0$ [14]. (3) 式中的退偏度和透过率损失量 R 是为了对测得的散射强度修正, 所以在相同的测试条件下不同氘含量 DKDP 晶体 TSRS 增益系数主要由拉曼散射频率、半峰宽和散射强度决定.

2.2 实验方法

将高纯 KH_2PO_4 原料溶于重水和高纯去离子水 (电阻率 $\geq 18.2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$) 中制成不同氘含量 $\text{K}(\text{H}_{1-x}\text{D}_x)_2\text{PO}_4$ 饱和溶液, 采用快速生长法将不同氘含量 DKDP 晶体从 $\text{K}(\text{H}_{1-x}\text{D}_x)_2\text{PO}_4$ 饱和溶液中获得 [20,21]. 晶体锥区生长过程和传统生长过程相似, 故可利用分凝系数法估算生长的 DKDP 晶体锥区的氘含量为 $12.3\%, 22.9\%, 31.7\%, 41.2\%, 51.3\%, 62.2\%, 73.8\%, 84.8\%$ 和 98% [21,22]. 另外我们还准备了 KDP 晶体作为对比, 测试样品在晶体锥区分别沿着 X, Y, Z 方向切割, 尺寸为 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, 样品经精细抛光. 本文采用以去离子水作为参照物通过自发拉曼光谱对比的方法测量不同氘含量 DKDP 晶体样品 TSRS 增益系数 [14,15]. 采用 SPEX-1403 型拉曼光谱仪, 实验装置如图 1 所示, 入射激光波长为 514.5 nm , 测试步长为 1 cm^{-1} , 积分时间 0.5 s . 测量拉曼光谱时晶体采用 $Z(XX)Y$ 散射配置, 去离子水置于内部尺寸为 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的透明熔石英比色皿中, 测量时入射激光贴近散射光收集面以减少样品对散射光的吸收.

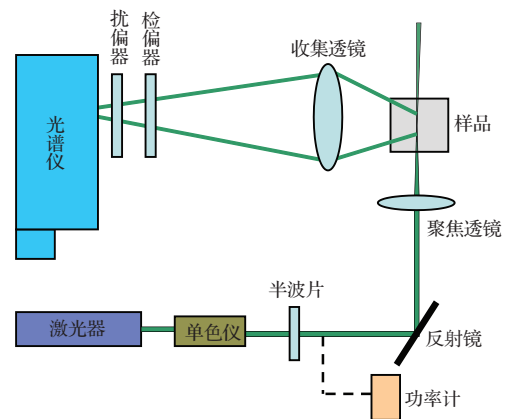


图1 直角拉曼散射实验装置简图

3 结果与讨论

3.1 DKDP 晶体拉曼光谱分析

图 2 为不同氘含量 DKDP 晶体样品的透过率

(仪器为U-3500光谱仪(HITACHI), 测试范围为200—1700 nm, 光栅直径为4.5 mm). 晶体透过率的降低除了晶体表面反射外, 还和晶体中的缺陷吸收有关, 而晶体透过率在紫外区明显下降是由于生长过程中杂质金属离子进入了晶体的缘故^[23,24]. 波长为514.5 nm时各样品均有较高透过率且各样品无明显差别, 因此晶体样品加工质量较好, 样品透过率不会对拉曼光谱造成较大影响.

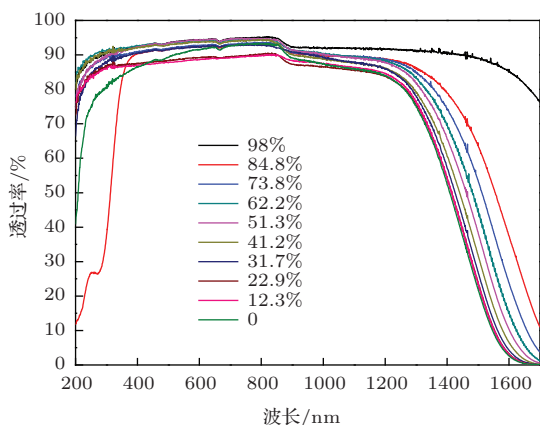


图2 不同氘含量DKDP晶体样品透过率

图3为不同氘含量DKDP晶体Z(XX)Y配置下的拉曼光谱. 所测光谱中存在 ν_1 , ν_3 和 $\delta(\text{OD})$ 振动模, ν_1 和 ν_3 振动模分别对应 PO_4 基团的对称伸缩和反对称伸缩振动, $\delta(\text{OD})$ 振动模对应O—D键的面内弯曲振动^[6,7,25]. 随着氘含量的增加 ν_1 振动模发生红移, $\delta(\text{OD})$ 振动模强度逐渐增大并表现出蓝移. DKDP晶体中子散射结果表明掺氘后P—O键键长增加, O—D键键长减小^[26]. 键长的变化将导致键的力常数变化, 故向KDP晶体掺氘后 ν_1 振动模和 $\delta(\text{OD})$ 振动模振动频率有相反的变化趋势^[21]; 而根据振动模耦合理论 ν_1 模和 $\delta(\text{OD})$ 模峰位随氘含量的移动是由二者相互耦合作用的结果^[27].

图4中曲线a为DKDP晶体 ν_1 振动模的半峰宽和氘含量关系, 氘含量低于62.2%时DKDP晶体 ν_1 振动模半峰宽随氘含量增加而增大, 高于这一值时半峰宽逐渐减小. 拉曼散射选择定则中波矢关系为 $\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1 = \pm \mathbf{q}$, 一般认为拉曼散射波矢 $\mathbf{q} = 0$, 混晶中的晶格平移对称性遭到破坏导致 $\mathbf{q} \neq 0$ 的声子也被激发, 拉曼光谱半峰宽加宽^[28-30]. DKDP晶体可以看成是H和D的混晶, 故随着晶体氘含量的增加拉曼峰半峰宽先增加后减小.

将所测光谱在 ν_1 振动模拉曼峰中心附近100

cm^{-1} 范围内的积分值作为 ν_1 振动模的拉曼散射强度, 积分上限取 ν_1 振动模和 $\delta(\text{OD})$ 振动模拉曼峰之间的极小值点. 考虑到测量过程中透过率损失量R我们对 ν_1 振动模的散射强度和峰值强度进行了修正, 以KDP晶体的散射强度为参考不同氘含量DKDP晶体的相对散射强度如图4中曲线b, c所示. 拉曼散射强度和峰值强度的极小值在氘含量为62.2%处, 且KDP晶体的散射强度和峰值强度均大于纯DKDP晶体的强度, 峰值强度随氘含量的变化率明显大于散射强度变化率.

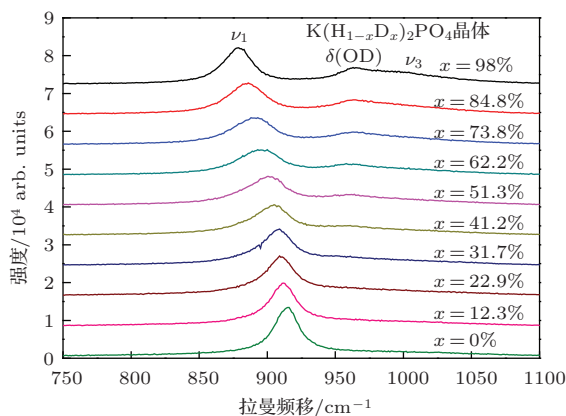


图3 不同氘含量DKDP晶体Z(XX)Y配置下的拉曼光谱

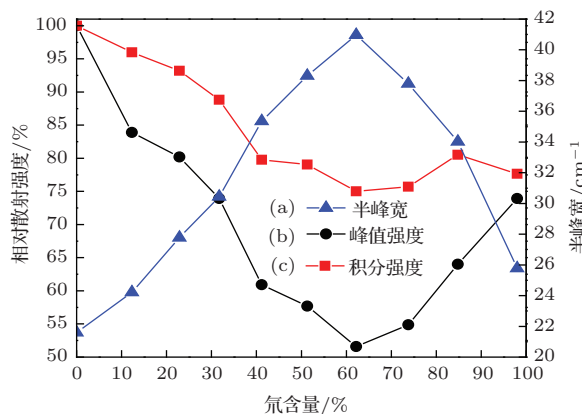


图4 不同氘含量DKDP晶体拉曼光谱参数比较

对比氘含量引起的拉曼散射光谱各参数的变化可以发现峰值强度和 ν_1 振动模半峰宽随氘含量的变化恰相反. 这意味着半峰宽增加时参与拉曼散射的 $\mathbf{q} \neq 0$ 的声子数量增加引起参与拉曼散射的波矢 $\mathbf{q} = 0$ 的声子数量减少即峰值强度降低. 拉曼峰的展宽导致部分散射光谱移出散射强度积分范围, 其散射强度降低, 但下降幅度要明显小于峰值强度. 此外, $\delta(\text{OD})$ 振动模的拉曼光谱侧翼也部分被包括在积分范围内. 随着氘含量的增加 $\delta(\text{OD})$ 振动

模位置和强度也发生变化, 故散射强度也受 $\delta(\text{OD})$ 振动模的影响, 因此拉曼散射强度随氘含量的变化是拉曼半峰宽和 $\delta(\text{OD})$ 振动模共同作用的结果, 其中半峰宽占主导作用.

3.2 DKDP 晶体 TSRS 增益系数比较

514.5 nm 光激发时水的对称伸缩振动模 ($\nu_s = 3422 \text{ cm}^{-1}$) 的散射截面为 $\frac{d\sigma_W}{d\Omega} = \frac{A\nu_s^4}{(\nu_i^2 - \nu_p^2)^2} = 6.46 \times 10^{-30} \text{ cm}^2/(\text{molecule sr})$ ($A = 5.33 \times 10^{-27} \text{ cm}^2/(\text{molecule sr})$, $\nu_i = 88000 \text{ cm}^{-1}$) [31,32]. 图 5 为去离子水 $Z(\text{XX})\text{Y}$ 和 $Z(\text{XZ})\text{Y}$ 两种散射配置下的拉曼光谱, 将所测拉曼光谱在 $2900\text{--}3800 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的积分值作为水的拉曼散射强度, 通过对比两种散射配置下的散射强度可以得出水的拉曼散射退偏度 $\rho = 0.14$. 测量水的拉曼光谱时入射光透过率的降低主要由比色皿对光的反射和吸收引起 ($R = 9\%$), 水的分子数密度 $M = 3.335 \times 10^{22} \text{ molecules/cm}^3$ [13], 折射率 $n = 1.332$ [33]. 对比去离子水的拉曼散射根据 (3) 式可以得出 514.5 nm 光激发时不同氘含量 DKDP 晶体 TSRS 增益系数, 结果如图 6 (a) 所示.

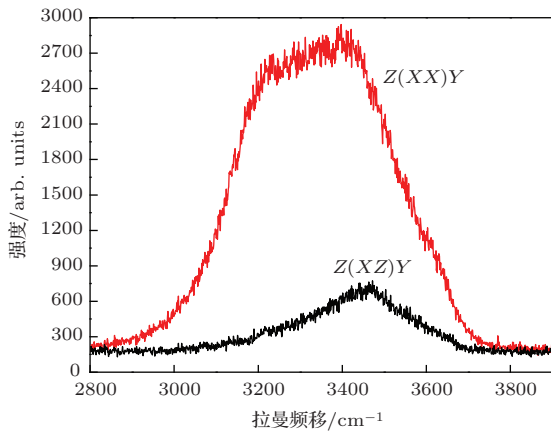


图 5 去离子水的拉曼光谱

可以看出 KDP 晶体的 TSRS 增益系数 ($g = 0.30 \text{ cm}\cdot\text{GW}^{-1}$) 大于纯 DKDP 晶体的增益系数 ($g = 0.21 \text{ cm}\cdot\text{GW}^{-1}$), 氘含量为 66.1% 的 DKDP 晶体 TSRS 增益系数最小, 为 KDP 晶体的增益系数的 40.1%, 纯 DKDP 晶体增益系数的 58.3%. 通过以上分析可知受激拉曼散射增益系数正比于散射强度, 和半峰宽成反比, 且散射强度也是半峰宽的函数, 故 DKDP 晶体 TSRS 增益系数随氘含量的变化主要由拉曼散射半峰宽的变化引起. 考虑到

激光能量波动和晶体透过率测量以及数据处理过程中的误差, 我们认为测得的 KDP/DKDP 晶体的 TSRS 增益系数的误差约为 15%.

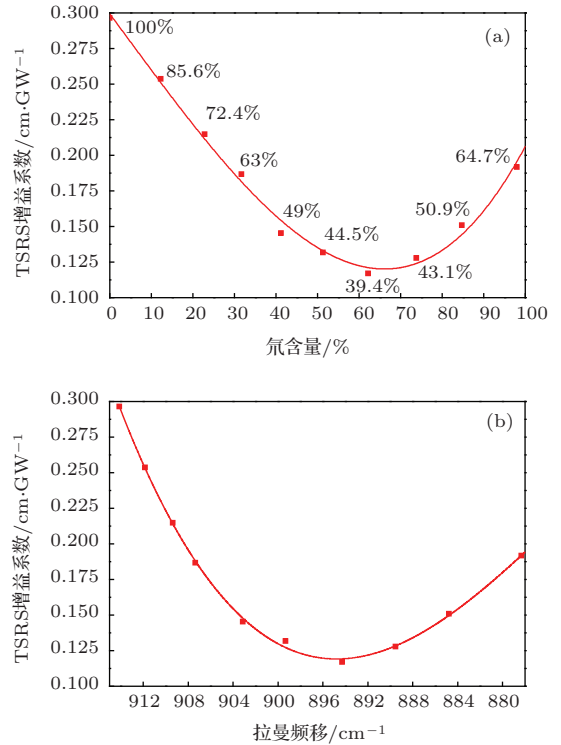


图 6 不同氘含量 DKDP 晶体 TSRS 增益系数 (a) 增益系数和氘含量关系; (b) 增益系数和拉曼频移关系

表 1 比较了本文测得的 KDP/DKDP 晶体 TSRS 增益系数和文献结果. 由 (3), (4) 和 (5) 式可以求得 o 光抽运时 TSRS 增益系数对应 $A'a^2$, 且增益系数和激发波长近似成反比 [5], 故可将结果换算到相同的测试条件下比较. 可以看出本文测量结果与最近 Demos 等的结果相符 (由文献 [15] 可知 Demos 等的结果误差为 20%); 而采用 TSRS 光谱信号测量法得出的结果仍存在较大差异, 这可能是由于采用 TSRS 光谱信号测量法的测量系统较为复杂, 累计误差较大.

氘含量通常采用分凝系数法获得, 但 DKDP 晶体生长过程中生长条件的变化尤其是点籽晶快速生长时会引起氘分凝系数的波动, 导致无法准确得出晶体的氘含量及其均匀性, 而直接测量法如热重法测量时需要将晶体破坏, 难以实现 DKDP 晶体氘含量的在线无损测量 [22,34]. 从图 3 可以看出随着 DKDP 晶体氘含量的增加 ν_1 振动模频率红移了约 36 cm^{-1} , ν_1 振动模的这一拉曼特性可以作为代表 DKDP 晶体氘含量的参量 [34,35]. 图 6 (b) 给出了 DKDP 晶体 TSRS 增益系数 g 和 ν_1 振动模拉

表1 KDP/DKDP 晶体 TSRS 增益系数本文测量结果与文献结果比较

结果比较	实验方法	KDP /cm·GW ⁻¹	70%DKDP /cm·GW ⁻¹	80%DKDP /cm·GW ⁻¹	99%DKDP /cm·GW ⁻¹
本文结果	自发拉曼光谱对比法 λ = 514.5 nm, o 光	0.3±0.05	0.12±0.02	0.13±0.02	0.20±0.03
2011 年 Demos 等 [14,15]	自发拉曼光谱对比法 λ = 532 nm, o 光	传统/快速生长 0.31	0.15	—	0.2
1999 年 Novikov 等 [5]	TSRS 光谱信号测量法 λ = 438 nm, o 光	0.29±0.03 快速生长 0.6±0.1	—	传统生长 0.15±0.03	—
1983 年 Smith 等 [11]	TSRS 光谱信号测量法 λ = 526 nm, o 光	0.21	—	—	—
1997 年 Bel'kov 等 [12]	TSRS 光谱信号测量法 λ = 438 nm, o 光	0.5	—	—	—
2013 年 Guo 等 [13]	TSRS 光谱信号测量法 λ = 351 nm, o 光	0.28±0.03	—	—	—

曼频移 R_s/cm^{-1} 的关系:

$$g = 5.74 \times 10^{-6} R_s^3 - 0.015 R_s^2 + 13.14 R_s - 3822. \quad (6)$$

故根据 ν_1 振动模拉曼频移可以在线无损地测量 DKDP 晶体 TSRS 增益系数, ν_1 振动模拉曼峰位为 895.4 cm^{-1} 的 DKDP 晶体的 TSRS 增益系数最小, 可以推算 351 nm 激发时此 DKDP 的 TSRS 增益系数为 $0.17 \text{ cm}\cdot\text{GW}^{-1}$. 此外, 需要注意氙含量不仅影响 DKDP 晶体的 TSRS 增益系数, 而且对晶体其他性能也有重要影响; 且从图 6 可以看出氙含量在降低 TSRS 效应最佳氙含量 66.1% 附近波动 10% 时其增益系数变化小于 6%, 故实际应用中选择 DKDP 晶体时不一定选择氙含量为 66.1%, 还应综合考虑氙含量对晶体其他性能的影响.

4 结 论

本文通过不同氙含量 DKDP 晶体的自发拉曼散射光谱研究了氙含量对其 TSRS 增益系数的影响, 得到了如下结论:

1) 随着氙含量的增加 DKDP 晶体的 TSRS 增益系数先减小后增大, 氙含量为 66.1% 的 DKDP 晶体 TSRS 增益系数最小, 为 KDP 晶体的增益系数的 40.1%, 纯 DKDP 晶体增益系数的 58.3%;

2) 通过分析 TSRS 增益系数有关的参数我们认为氙含量引起的半峰宽的变化是引起其 TSRS 增益系数变化的主要原因, 故可以寻求其他增大拉曼散射半峰宽的方法抑制 KDP/DKDP 晶体的 TSRS 效应;

3) 建立了不同氙含量 DKDP 晶体 TSRS 增益系数和其 ν_1 振动模拉曼频移的关系, 可以实现 DKDP 晶体 TSRS 增益系数及其均匀性在线无损测量.

综上所述, DKDP 晶体的 TSRS 增益系数依赖于其氙含量, 以上结果为判断 DKDP 晶体的 TSRS 增益系数以及激光工程上选择合适氙含量的 DKDP 晶体提供了指导.

感谢山东大学环境科学与工程学院冯素萍研究员和中国科学院物理研究所刘玉龙研究员等在实验上给予的帮助.

参考文献

- [1] Zhang K C, Wang X M 2005 *Nonlinear optical crystal material science* (Second edition, Beijing: Science Press) pp133–151 (in Chinese) [张克从, 王希敏 2005 非线性光学晶体材料科学 (第二版, 北京: 科学出版社) 第 133—151 页]
- [2] Yang Y S, Zheng W G, Han W, Che Y L, Tan J C, Xiang Y, Jia H T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6468 (in Chinese) [杨义胜, 郑万国, 韩伟, 车雅良, 谭吉春, 向勇, 贾怀庭 2007 物理学报 **56** 6468]

- [3] Wang J, Zhang X M, Li F Q, Han W, Li K Y, Fen B 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 0502011 (in Chinese) [王静, 张小民, 李富全, 韩伟, 李恪宇, 冯斌 2011 中国激光 **38** 0502011]
- [4] Barker C E, Sacks R A, Van Wonerghem B M, Caird J A, Murray J R, Campbell J H, Kyle K, Ehrlich R B, Nielsen N D 1997 *Proc. SPIE* **2633** 501
- [5] Novikov V N, Belkov S A, Buiko S A, Voronich I N, Efimov D G, Zaretsky A I, Kochemasov G G, Kravchenko A G, Kulikov S M, Lebedev V A, Okutin G P, Rukavishnikov N N, Sukharev S A 1999 *Proc. SPIE* **3492** 1009
- [6] Shur M S 1966 *Soviet Phys. Crystallography* **11** 394
- [7] Chai X X, Zhu Q H, Li F Q, Wang S L, Zhou H L, Xu X G 2014 *High Power Laser and Particle Beams* **26** 022014 (in Chinese) [柴向旭, 朱启华, 李富全, 王圣来, 周海亮, 许心光 2014 强激光与粒子束 **26** 022014]
- [8] Ji L L, Zhu B Q, Zhan T Y, Dai Y P, Zhu J, Ma W X, Lin Z Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094210 (in Chinese) [季来林, 朱宝强, 詹廷宇, 戴亚平, 朱检, 马伟新, 林尊琪 2011 物理学报 **60** 094210]
- [9] Wegner P J, Hennesian M A, Speck D R, Bibeau C, Ehrlich R B, Laumann C W, Lawson J K, Weiland T L 1992 *Appl. Opt.* **31** 6414
- [10] Han W, Wang F, Zhou L D, Li F Q, Feng B, Cao H B, Zhao J P, Li S, Zheng K X, Wei X F, Gong M L, Zheng W G 2013 *Opt. Express* **21** 30481
- [11] Smith W L, Hennesian M A, Milanovich F P 1984 *1983 Laser Program Annual Report (UCRL-50021-83)* (Livermore CA: Lawrence Livermore National Laboratory) **6** 61
- [12] Belkov S A, Kochemasov G G, Kulikov S M, Novikov V N, Rukavishnikov N N, Sukharev S A, Voronich I N, Zaretsky A I 1997 *Proc. SPIE* **2633** 506
- [13] Guo Y J, Tang S X, Hui H C, Wang Y Y, Tang W, Zhu B Q, Lin Z Q 2013 *Proc. SPIE* **8786** 87860U
- [14] Demos S G, Raman R N, Yang S T, Negres R A, Schaffers K I, Hennesian M A 2011 *Opt. Express* **19** 21050
- [15] Demos S G, Raman R N, Yang S T, Negres R A, Schaffers K I, Hennesian M A 2011 *Proc. SPIE* **8190** 81900S
- [16] Cheng G X 2001 *Principle and application of Raman and Brillouin scattering* (Beijing: Science Press) pp 32–83 (In Chinese) [程光熙 2001 拉曼布里渊散射原理及应用 (北京: 科学出版社) 第32—83页]
- [17] Wang Q G, Su L B, Li H J, Xiong W, Yuan H, Zheng L H, Xu X D, Wu F, Tang H L, Jiang D P, Xu J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 054217
- [18] Maier M, Kaiser W 1969 *Phys. Rev.* **177** 580
- [19] Loudon R 1964 *Advan. Phys.* **13** 423
- [20] Liu B A, Yin X, Sun X, Xu M X, Ji S H, Xu X G, Zhang J F 2012 *J. Appl. Cryst.* **45** 439
- [21] Liu B A, Zhou H L, Zhang Q H, Xu M X, Ji S H, Zhu L L, Zhang L S, Liu F F, Sun X, Xu X G 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 067804
- [22] Loiacono G M, Balascio J F, Osborne W 1974 *Appl. Phys. Lett.* **24** 455
- [23] Wang K P, Huang Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 077401
- [24] Ye L W, Li Z D, Su G B, Zhuang X X, Zheng G Z 2007 *Opt. Commun.* **275** 399
- [25] Carollne M P, Adams W A 1979 *J. Phys. Chem.* **83** 814
- [26] Tun Z, Nelmes R J, Kuhs W F, Stanfield R F D 1988 *J. Phys. C* **21** 245
- [27] Anachkova E, Savatinova I 1985 *Phys. Stat. Sol. (b)* **131** K101
- [28] Li Z 2005 *M. S. Thesis* (Beijing: Beijing University of Technology) (In Chinese) [李政 2005 硕士学位论文 (北京: 北京工业大学)]
- [29] Chang R K, Lacina B, Pershan P S 1966 *Phys. Rev. Lett.* **17** 755
- [30] Lacina W B, Pershan P S. 1970 *Phys. Rev. B* **1** 1765
- [31] Bischel W K, Black G. 1983 *AIP Conf. Proc.* **100** 181
- [32] Faris G W, Copeland R A 1997 *Appl. Opt.* **36** 2686
- [33] Schiebener P, Straub J, Sengers J M H L, Gallagher J S 1990 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **19** 677
- [34] Yakshin M A, Kim D W, Kim Y S, Broslavets Y Y, Sidoryuk O E, Goldstein S 1997 *Laser Phys.* **7** 941
- [35] Huser T, Hollars C W, Siekhaus W J 2004 *Appl. Spectrosc.* **58** 349

Influence of deuteration degree on the transverse stimulated Raman scattering gain coefficient of DKDP crystal

Chai Xiang-Xu¹⁾²⁾ Li Fu-Quan²⁾ Wang Sheng-Lai¹⁾ Feng Bin²⁾ Zhu Qi-Hua²⁾
Liu Bao-An¹⁾ Sun Xun¹⁾ Xu Xin-Guang^{1)†}

1) (State Key Laboratory of Crystal Materials, Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China)

2) (Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 8 July 2014; revised manuscript received 18 August 2014)

Abstract

In this paper, the spontaneous Raman spectra of $K(H_{1-x}D_x)_2PO_4$ (DKDP) crystals with different deuteration degrees in the $Z(XX)Y$ scattering geometry are measured. And the Raman spectroscopy parameters including Raman shift, full-width at half maximum, and scattering intensity, which are related to the transverse stimulated Raman scattering (TSRS) gain coefficients, are analyzed in detail. Using the Raman scattering from water as a reference, the TSRS gain coefficients of DKDP crystals with different deuteration degrees are derived. It is found that with increasing deuteration degree in DKDP crystal the TSRS gain coefficient first decreases to about 40.1% of the KDP crystal, then increases to about 68.9%. We regard the change of the full-width at half maximum as the main reason for the dependence of TSRS gain coefficient on the deuteration degree.

Keywords: DKDP crystal, deuteration degree, gain coefficient, Raman shift

PACS: 42.65.Dr, 77.84.Fa, 67.80.fh, 78.30.-j

DOI: [10.7498/aps.64.034213](https://doi.org/10.7498/aps.64.034213)

† Corresponding author. E-mail: xgxu@sdu.edu.cn