

# 自受激拉曼晶体 $\text{Nd}^{3+}:\text{SrMoO}_4$ 的光谱性质研究\*

韩 琳 宋 峰† 万从尚 邹昌光 闫立华 张 康 田建国

(天津市南开大学物理科学学院光子学中心, 天津 300071)

(2006 年 8 月 12 日收到, 2006 年 8 月 31 日收到修改稿)

通过拉曼散射光谱, 吸收光谱, 荧光发射寿命和 808 nm LD 激发下的红外荧光光谱的实验测量, 系统研究了  $\text{Nd}^{3+}:\text{SrMoO}_4$  晶体的自受激拉曼光谱性质. 分析指出了拉曼散射光谱中各拉曼峰所对应的晶格振动模式, 得出了其 SRS 活性最强的声子频率约为  $898\text{ cm}^{-1}$ , 对应于  $(\text{MoO}_4^{2-})$  离子团的完全对称光学伸缩振动  $A_g$  模. 通过 J-O 理论对晶体的吸收谱进行了全面的光谱参数计算, 得出  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  跃迁的积分发射截面达  $0.57 \times 10^{-18}\text{ cm}^2$ , 自发辐射概率为  $141.06\text{ s}^{-1}$ ; 同时, 实验测得该跃迁的荧光发射寿命约为 0.2 ms. 最后, 结合 808 nm LD 激发下的红外波段荧光光谱, 论证了  $\text{SrMoO}_4$  晶体中  $\text{Nd}^{3+}$  离子 1068 nm 发射通过拉曼频移获得 1180 nm 一级斯托克斯激光发射的可能性, 为  $\text{Nd}^{3+}:\text{SrMoO}_4$  晶体的自受激拉曼激光器研究提供了理论依据.

关键词:  $\text{Nd}^{3+}$  离子,  $\text{SrMoO}_4$  晶体, 自受激拉曼散射

PACC: 7830, 7830G, 4255R

## 1. 引 言

自受激拉曼晶体是在拉曼活性晶体中掺入激活离子, 使之同时具有激活离子受激辐射光放大的发光性质和基质本身的受激拉曼散射(SRS)性质. 从而可以在一块晶体中, 通过接受一定频率的激光抽运, 同时产生受激辐射光放大和受激拉曼散射两大光学效应, 完成信号放大和频率移动两个过程.

自受激拉曼激光器不仅能够实现新波长的激光发射, 还具有许多独特的优势: 由于掺杂离子的信号放大的功能, 自受激拉曼晶体发生 SRS 的抽运阈值大大降低, 改变了拉曼激光器需要高功率抽运源的现状; 自受激拉曼激光器将激光信号放大和 SRS 调制集中于同一晶体内, 大大简化了光学系统, 虽然无法分别控制信号放大和 SRS 的参数, 对可调协性有一定的影响, 但其稳定性、小型化等优点是普通拉曼激光器无法比拟的, 非常适合于当今激光器集成化、小型化的发展趋势.

对于自受激拉曼晶体的研究从 20 世纪末逐渐成为激光材料领域一个新的研究热点. Grabtchikov 等人用半导体激光器抽运实现了  $\text{Nd}:\text{KGd}(\text{WO}_4)$  晶

体的自受激拉曼散射(self-excited Raman scattering), 观察到的拉曼阈值为 230 mW, 当  $1.067\text{ }\mu\text{m}$  的激光功率为 4.8 mW 时, 最大的斯托克拉曼激光发射功率也达到  $4.8\text{ mW}^{[1]}$ . 随后, Basiev 和 Vassiliev 等利用  $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$  晶体获得了更高增益的自受激拉曼激光器, 其功率先后达到了  $5\text{ }\mu\text{W}$  (脉冲宽度为 500 ps) 和  $6\text{ }\mu\text{W}$  (脉冲宽度为 750 ps) $^{[2]}$ . 表 1 列举了一些已研制成功的自受激拉曼激光器的相关参数. 俄罗斯在这个领域起步最早, 目前已经发展比较成熟 $^{[7,8,13]}$ ; 法国、美国、日本等国家随后也开始了这方面研究, 我国中科院福建物质结构研究所和山东大学晶体所于近几年也开始了自受激拉曼晶体和激光器方面的研究探索 $^{[4,14-17]}$ .

$\text{SrMoO}_4$  晶体具有较窄的拉曼线宽, 较大的散射截面和较高的增益系数, 是已被证实的较好的拉曼晶体 $^{[18,19]}$ , 掺入稀土离子后有望成为性质较好的自受激拉曼晶体.  $\text{Nd}^{3+}$  离子在近红外区具有丰富的吸收谱带和发射波长, 能够实现较高的激光增益, 是应用最广泛的激活离子之一, 目前已成功的自拉曼激光器大都选用  $\text{Nd}^{3+}$  离子作为掺杂激活离子 $^{[1-12]}$ . 目前  $\text{Nd}^{3+}:\text{SrMoO}_4$  晶体的自受激拉曼性质国内还未见报道.

\* 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(批准号: 560-903102, 560-903103), 教育部留学回国人员科研启动基金(批准号: 32a2023160), 教育部优秀青年教师资助计划(批准号: X01177), 天津市自然科学基金(批准号: 05YFPGX05100)以及长江学者和创新团队发展计划资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: fsong@nankai.edu.cn

表 1 自受激拉曼激光器研究现状

拉曼晶体	抽运源	最大斯托克斯输出	脉冲宽度	转换效率/%	参考文献
Nd:Kd(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	808 nm 1.0 W 二极管	8.9 mW (1181.0 nm)	29 kHz 23 ns	0.7	[1]
Nd:Kd(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	808 nm 300 W 二极管	0.1 mJ	47 Hz 50 ns	0.1	[3]
Nd:Kd(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	600 nm 脉冲激光器	110 μJ (1181.7 nm)	12 ns	4	[4]
Nd:Kd(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	600 nm 脉冲激光器	42 μJ (1539.5 nm)	10 ns	1.26	[4]
Nd:Kd(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	980 nm 1.2 W 二极管	7 mW (1139.0 nm)	6—20 kHz 20 ns	0.6	[5]
Nd:PbWO <sub>4</sub>	808 nm 4 mJ 二极管	2.5 μJ	20 Hz 8 ns	0.06	[6]
Nd:SrWO <sub>4</sub>	752 nm 200 mJ 激光器	90 mJ (1170.0 nm)	—	0.52	[7]
Nd:PbMoO <sub>4</sub>	808 nm 1.5 W 二极管	10 mJ (1163.0 nm)	35 kHz 6 ns	0.86	[8]
Nd:YVO <sub>4</sub> /Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	808 nm 1.6 W 二极管	111 mW (1197.0 nm)	32 kHz 15 ns	6.9	[9]
Nd:GdVO <sub>4</sub>	808 nm 25 W 激光二极管	1.18 W (1521.0 nm)	20 kHz	8.7	[10]
Nd:YVO <sub>4</sub>	808 nm 32 W 激光二极管	0.57 W (1176.0 nm)	20 kHz	5.6	[11]
Nd:YVO <sub>4</sub>	808 nm 2.5 W 激光二极管	7.2 μJ (1178.6 nm)	17 kHz 0.71 ns	—	[12]

我们对 Nd<sup>3+</sup>:SrMoO<sub>4</sub> 晶体的拉曼散射光谱、吸收光谱、1068 nm 荧光发射寿命和 808 nm LD 激发下的红外荧光光谱分别进行了实验研究,结合拉曼散射理论和激光理论,对其自受激拉曼光谱性质进行了分析讨论,为 Nd<sup>3+</sup>:SrMoO<sub>4</sub> 晶体作为自受激拉曼激光器工作物质提供了理论基础。

## 2. 实验研究

### 2.1. Nd<sup>3+</sup>:SrMoO<sub>4</sub> 晶体的制备

实验所用的 Nd<sup>3+</sup>:SrMoO<sub>4</sub> 晶体是由俄罗斯科学院基础物理所提供,是通过 Czochralski 生长提拉方法制成, *a* 轴切割,双面抛光。钕离子掺杂浓度为 0.5 wt.%, 折射率为 1.9, 密度为 4.57 g/cm<sup>3</sup>, 厚度为 5.85 mm。

### 2.2. Nd<sup>3+</sup>:SrMoO<sub>4</sub> 晶体的光谱测量

我们采用 SPEX 公司的 SPEX1403 型双光栅激光拉曼光谱仪对 Nd<sup>3+</sup>:SrMoO<sub>4</sub> 晶体进行了不同几何配置下的拉曼散射光谱测量,抽运源为 LD 抽运的 532 nm 固体倍频激光器,样品的吸收光谱是采用日立公司的 UV-365 型光谱仪测量的,测量范围为 300—1000 nm;另外,我们还采用 808 nm 可调谐脉冲 LD 作为激发光源测量了样品 1068 nm (对应 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>1/2</sub> 跃迁) 的荧光发射寿命,激发光脉冲宽度为 100—200 ns, 频率调节为 700 Hz, 由 F111AI 型荧光光谱仪探测并收集信号(探测器为 Ge 探测器,响应时间为 ns 量级),并传送给示波器进行信号处理;最后,采用美国 SPEC 公司的 F111AI 型荧光光谱仪对样品在 808 nm LD 激发下的红外波段荧光光谱进行

了测量,以上测量均在室温下进行。

## 3. 结果与分析

### 3.1. Nd<sup>3+</sup>:SrMoO<sub>4</sub> 晶体拉曼散射光谱分析

SrMoO<sub>4</sub> 晶体属于白钨矿类晶体,晶体点群为 C<sub>4h</sub>, 空间群为 I<sub>4</sub>/a。其物理学单胞中含有两个分子式,共 N = 12 个原子,有 3N = 36 个基本晶格振动模式。当掺入 Nd<sup>3+</sup> 离子后,掺杂离子取代了部分原有的 Sr<sup>3+</sup> 离子。当选择对称中心为坐标原点时, Nd<sup>3+</sup> 或 Sr<sup>3+</sup> 离子均占据 S<sub>4</sub> 位置, Mo<sup>5+</sup> 及 O<sup>2-</sup> 离子均占据 C<sub>1</sub> 位置。通过群论理论的计算,并结合 C<sub>4h</sub> 点群特征标表的约化表示<sup>[20]</sup>, 可将 12 个原子的 36 个振动自由度分为 26 个振动模:

$$\Gamma = 3A_g + 5A_u + 5B_g + 3B_u + 5E_g + 5E_u,$$

其中 E 振动模为二重简并。由点群 C<sub>4h</sub> 的特征标表可知, A<sub>g</sub> 与 B<sub>g</sub> 为拉曼活性光学模, E<sub>g</sub> 为拉曼活性二重简并光学模,其余均为非拉曼活性振动模。因此,最多可观察到 13 支拉曼活性光学模:

$$\Gamma = 3A_g + 5B_g + 5E_g.$$

它们所对应的拉曼张量分别为

$$A_g: \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & b \end{bmatrix},$$

$$B_g: \begin{bmatrix} c & d & 0 \\ d & -c & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_g: \begin{bmatrix} 0 & 0 & e \\ 0 & 0 & e \\ e & e & 0 \end{bmatrix}.$$

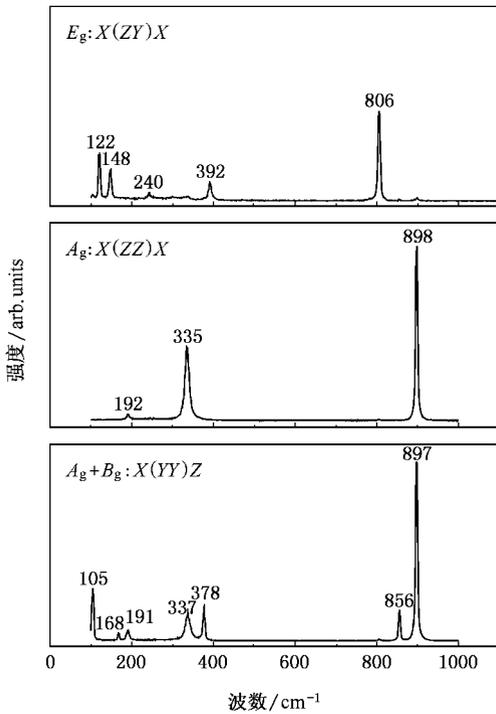


图 1 不同几何配置下  $\text{Nd}^{3+}:\text{SrMoO}_4$  晶体的拉曼散射光谱

由极化率张量与拉曼张量的关系,并参考以上拉曼张量表可知,极化率张量的各分量中, $\alpha_{xx}$ 只对  $A_g$  振动模有贡献, $\alpha_{xy}$ 则只反映  $B_g$  模式的振动, $\alpha_{xz}$ 分量对应  $E_g$  模式, $\alpha_{yy}$ 对应  $A_g + B_g$  模式.基于以上分析

并结合散射效率的计算,我们确定出实验的几何配置如下:

$$A_g : X(ZZ)Y ; E_g : X(ZY)X ; A_g + B_g : X(YY)Z .$$

图 1 分别为以上这几种几何配置下测得的  $\text{Nd}^{3+}:\text{SrMoO}_4$  晶体的拉曼散射光谱.根据 Russell 和 Loudon 所作的理论预测, $\text{SrMoO}_4$  可能存在的八个内振动模、一个转动模和四个外振动模<sup>[7]</sup>.这 13 个晶格运动模式在图 1 中均有显示,偏差在  $3 \text{ cm}^{-1}$  以内,其中  $337 \text{ cm}^{-1}$  附近存在一个  $A_g$  模和一个  $B_g$  模,由于距离过近,在  $X(YY)Z$  配置下未能分开.根据 Hanuza 对白钨矿类钼酸盐中钼酸根的分析,Mo—O 的伸缩振动谱线可定位于  $660\text{—}980 \text{ cm}^{-1}$ ,O—Mo—O 面内弯曲振动位于  $300\text{—}500 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[5]</sup>.基于以上分析,我们对拉曼散射光谱中所显示的 13 个振动模式进行了指认,并分类列于表 2.结合图 1 可知,对应于  $(\text{MoO}_4^{2-})$  离子团完全对称光学伸缩振动模  $A_g = 898 \text{ cm}^{-1}$  的振动最为强烈,拉曼线宽为  $6.0 \text{ cm}^{-1}$ ,拉曼增益为  $3.0 \text{ cm/GW}$ ,为此晶体的“呼吸模”.

### 3.2. 吸收光谱分析和光谱参数计算

图 2 为  $\text{Nd}^{3+}:\text{SrMoO}_4$  晶体  $300\text{—}1000 \text{ nm}$  波段的吸收光谱.由图可见, $\text{Nd}^{3+}$  离子在近红外  $752 \text{ nm}$  ( ${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ )、 $805 \text{ nm}$  ( ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ ) 附近有比较强的吸收谱带.因此,实验中通常采用这两种波段的激发光

表 2  $\text{Nd}^{3+}:\text{SrMoO}_4$  晶体晶格振动模分类

振动模式	内振动模							
	Mo—O 的伸缩振动			O—Mo—O 面内弯曲振动				
维度符号	$A_g$	$B_g$	$E_g$	$E_g$	$B_g$	$A_g$	$B_g$	$A_g$
波数/ $\text{cm}^{-1}$	898	856	806	392	378	335	337	192
	转动模			外振动模				
维度符号		$E_g$		$B_g$	$E_g$		$E_g$	$B_g$
波数/ $\text{cm}^{-1}$		240		168	148		122	105

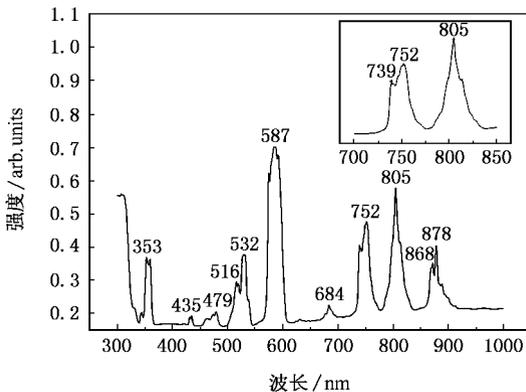


图 2  $\text{Nd}^{3+}:\text{SrMoO}_4$  晶体  $300\text{—}1000 \text{ nm}$  波段吸收谱

源.我们在后面的荧光实验中使用  $808 \text{ nm}$  的激光二极管作为抽运源.

根据 J-O 理论,我们计算了  $\text{Nd}^{3+}:\text{SrMoO}_4$  晶体的一些光谱参数,以帮助我们分析它的发光性质.计算结果列于表 3 中.由表 3 可见,若采用  $800 \text{ nm}$  附近的激发波长,在所有可能的跃迁辐射中, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  跃迁的自发辐射概率和积分发射截面相对其他可能发射是最大的:积分发射截面达  $0.57 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ ,自发辐射概率为  $141.06 \text{ s}^{-1}$ .由此我们推断在  $808 \text{ nm}$  LD 激发下, $1068 \text{ nm}$  附近的发射将非常强.

表 3 J-O 理论计算  $\text{Nd}^{3+}$   $\text{SrMoO}_4$  晶体光谱参数表

吸收谱峰值波长/nm	实验振子强度 $f_{\text{exp}}$	理论振子强度 $f_{\text{cal}}$
878	$2.15 \times 10^{-7}$	$2.39 \times 10^{-7}$
805	$4.66 \times 10^{-7}$	$5.46 \times 10^{-7}$
752	$4.94 \times 10^{-7}$	$4.54 \times 10^{-7}$
684	$6.97 \times 10^{-8}$	$3.97 \times 10^{-8}$
631	$1.43 \times 10^{-8}$	$1.11 \times 10^{-8}$
585	$1.83 \times 10^{-6}$	$1.84 \times 10^{-6}$
525	$7.11 \times 10^{-7}$	$5.19 \times 10^{-7}$
479	$1.51 \times 10^{-7}$	$9.37 \times 10^{-8}$
435	$4.76 \times 10^{-8}$	$6.78 \times 10^{-8}$
384	$3.06 \times 10^{-8}$	$3.89 \times 10^{-9}$

强度参数	$\Omega_2$	$\Omega_4$	$\Omega_6$	
	$2.63 \times 10^{-21}$	$3.62 \times 10^{-21}$	$2.08 \times 10^{-21}$	
初始能级 $S[L, J]$	末态能级 $S[L', J']$	峰值波长 /nm	自发辐射概率 $A_{\text{ecl}}$ /s <sup>-1</sup>	积分发射截面 /10 <sup>-18</sup> cm <sup>2</sup>
<sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	4982.6	0.92713	0.084623
<sup>4</sup> I <sub>13/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	2496.9	2.1999	0.050424
<sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	1644.7	0.63735	0.0063385
<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	1834.9	1.133	0.014024
	<sup>4</sup> I <sub>13/2</sub>	1329.8	22.536	0.14652
	<b><sup>4</sup>I<sub>11/2</sub></b>	<b>1068.4</b>	<b>141.06</b>	<b>0.57223</b>
	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	867.3	74.77	0.48333
<sup>4</sup> F <sub>5/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	795.36	268.53	0.62454
<sup>2</sup> H <sub>9/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	785.05	29.127	0.065997
<sup>4</sup> F <sub>7/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	742.94	73.118	0.14838
<sup>4</sup> S <sub>3/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	737.19	311.47	0.62231
<sup>4</sup> F <sub>9/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	673.22	19.283	0.032131
<sup>2</sup> H <sub>11/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	623.99	5.221	0.0074738
<sup>4</sup> G <sub>5/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	582.51	1587	1.9797
<sup>2</sup> G <sub>7/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	576.93	291.93	0.35724
<sup>2</sup> K <sub>13/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	525.82	19.718	0.020044
<sup>4</sup> G <sub>7/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	523.48	346.7	0.34929
<sup>4</sup> G <sub>9/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	511.4	113.77	0.10939
<sup>2</sup> K <sub>15/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	475.83	13.542	0.011273
<sup>2</sup> G <sub>9/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	472.34	38.817	0.03184
( <sup>2</sup> D <sub>7/2</sub> , <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ) <sub>3/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	470.23	79.111	0.064313
<sup>4</sup> G <sub>11/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	463.76	14.386	0.011375
<sup>2</sup> P <sub>1</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	432.15	263.67	0.18104
<sup>2</sup> D <sub>5/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	419.02	5.545	0.0035793
( <sup>2</sup> P <sub>7/2</sub> , <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> ) <sub>3/2</sub>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	380.81	14.646	0.0078086

### 3.3. 荧光发射寿命结果分析

图 3 为荧光寿命实验测量的发射衰减曲线. 根据一级指数衰减函数拟和结果(图中实线部分), 我们得到  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$  的荧光发射寿命约为 0.2 ms. 我们将此结果与其他报道中的一些荧光寿命数据一同列于表 4 进行比较, 可见对于钨酸盐和钼酸盐基质, 该荧光发射寿命都很接近(其中只有钨酸复盐  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  晶体的稍小一些), 较短的发射寿命将有利于得到  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$  (1068 nm) 的较强发射.

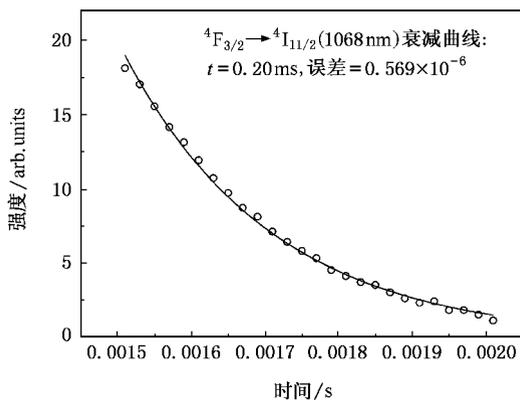


图 3  $\text{Nd}^{3+} : \text{SrMoO}_4$  晶体  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$  荧光发射寿命衰减曲线

表 4 掺钕钨酸盐、钼酸盐晶体  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$  荧光发射寿命测量值比较

样品	${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ 荧光发射寿命/ms	文献
$\text{Nd}^{3+} : \text{SrMoO}_4$	0.2	本工作
$\text{Nd}^{3+} : \text{SrMoO}_4$	0.17	[ 21 ]
$\text{Nd}^{3+} : \text{SrMoO}_4$	0.18	[ 13 ]
$\text{Nd}^{3+} : \text{PbMoO}_4$	0.18	[ 13 ]
$\text{Nd}^{3+} : \text{PbWO}_4$	0.19	[ 13 ]
$\text{Nd}^{3+} : \text{SrWO}_4$	0.2	[ 13 ]
$\text{Nd}^{3+} : \text{SrWO}_4$	0.18	[ 15 ]
$\text{Nd}^{3+} : \text{CaWO}_4$	0.18	[ 22 ]
$\text{Nd}^{3+} : \text{KGd}(\text{WO}_4)_2$	0.11	[ 23 ]
$\text{Nd}^{3+} : \text{KGd}(\text{WO}_4)_2$	0.12	[ 24 ]
$\text{Nd}^{3+} : \text{KLa}(\text{MoO}_4)_2$	0.2	[ 25 ]
$\text{Nd}^{3+} : \text{K}_5\text{B}(\text{MoO}_4)_4$	0.215	[ 26 ]

### 3.4. 808 nm LD 激发下红外荧光光谱分析

图 4 为 808 nm LD 抽运下采集的晶体红外波段荧光发射谱. 实验激发光功率为 229 mW, 测量精度为 0.5 nm/s.

结合  $\text{Nd}^{3+}$  离子能级结构图和可能跃迁机理(图

5), 可确定图 4 中各发射峰分别对应于  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ ,  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ ,  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$  和  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^2\text{G}_{7/2}$  能级跃迁. 其中  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$  所对应的 1068 nm 发射最为强烈, 这与前面的 J-O 理论计算结果也是符合的. 由此, 1068 nm 可以作为晶体的“自激发”波长.

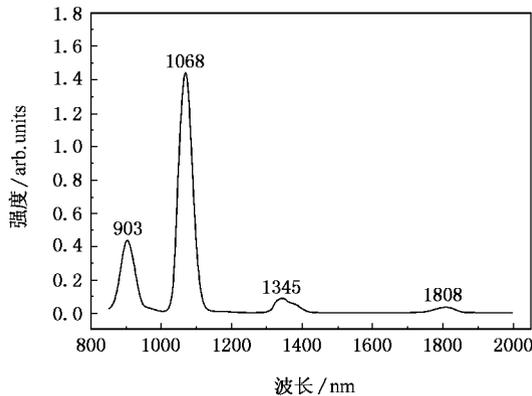


图 4 808 nm LD 激发下  $\text{Nd}^{3+} : \text{SrMoO}_4$  晶体的红外波段荧光发射谱

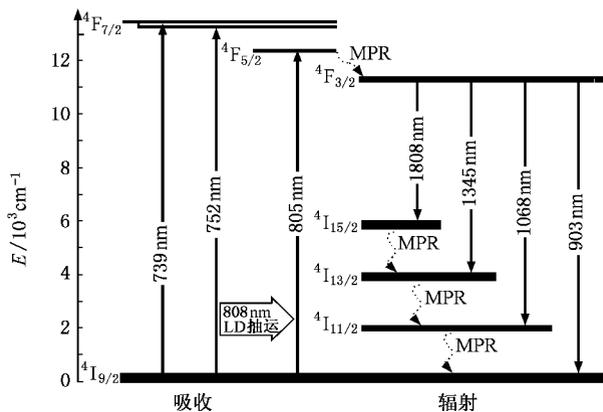


图 5  $\text{SrMoO}_4$  晶体中  $\text{Nd}^{3+}$  离子能级结构图和能量吸收、发射过程

### 3.5. $\text{Nd}^{3+} : \text{SrMoO}_4$ 晶体的自受激拉曼性质分析

根据前面的实验与分析,  $\text{Nd}^{3+} : \text{SrMoO}_4$  晶体在  $898 \text{ cm}^{-1}$  处有很强的拉曼效应, 同时掺杂  $\text{Nd}^{3+}$  离子在 1068 nm 处有较强的受激发射, 这都为此晶体发生自受激拉曼效应提供了很好的条件. 只要晶体尺寸和光学质量达到一定水平, 该晶体就能够用于激光发射. 由于我们所研究的晶体样品尺寸较小, 光学质量还未达到激光输出的水平, 这里只从光谱角度来研究讨论该晶体的自受激拉曼性质, 以作为下一步激光研究的理论基础. 通过前面对晶体光谱性能的全面研究, 我们推断出  $\text{Nd}^{3+} : \text{SrMoO}_4$  晶体将会产生自受激拉曼一级斯托克斯 1180 nm 的激光发射.

## 4. 结 论

通过对自受激拉曼活性材料  $\text{Nd}^{3+}:\text{SrMoO}_4$  晶体

拉曼散射光谱、吸收光谱、荧光发射寿命和 808 nm LD 抽运下红外荧光光谱的实验分析,我们确定了样品在 1180 nm 处的一级斯托克斯激光发射,为其作为自受激拉曼激光器工作物质提供了理论基础.

- [ 1 ] Grabtchikov A S , Kumin A N , Lisinetskii V A , Orlovich V A , Ryabtsev G I 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 3742
- [ 2 ] Basiev T T , Vassiliev S V , Konjushkin V A , Osiko V V , Zagumennyi A I , Zavartsev Y D , Kutovoi S A , Shcherbakov I A 2004 *Laser Phys. Lett.* **1** 237
- [ 3 ] Urata Y , Wada S , Tashiro H , Fukuda T 2000 *Opt. Lett.* **25** 752
- [ 4 ] Brenier A , Tu C Y , Li J F , Zhou Z J , Wei B C 2001 *Journal of Physics :Condensed Matter* **13** 4097
- [ 5 ] Lagatsky A A , Abdolvand A , Kuleshov N Y , *Conference Digest. 2000 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe* , Cat. No. 00TTH8505 , *IEEE* 2000 , 1
- [ 6 ] Chen W , Inagawa Y , Omatsu T , Tateda M , Takeuchi N , Usuki Y 2000 *Opt. Comm.* **194** 401
- [ 7 ] Jelínková H , Šulc J , Basiev T T , Zverev P G 2005 *Laser Phys. Lett.* **2** 4
- [ 8 ] Basiev T T , Vassiliev S V , Doroshenko M E , Osiko V V 2006 *Opt. Lett.* **31** 65
- [ 9 ] Simons J , Pask H , Dekker P , Piper J A , *Solid State Lasers XI* , Proceedings 4630 , SPIE 2002 , 57
- [ 10 ] Chen Y F 2004 *Optics Letters* **29** 1251
- [ 11 ] Chen Y F 2004 *Optics Letters* **29** 2632
- [ 12 ] Su F F , Zhang X Y , Wang Q P , Ding S H , Jia P , Li S T , Fan S Z , Zhang C , Liu B 2006 *Journal of Physics D* **39** 2090
- [ 13 ] Šulc J , Jelínková H , Basiev T T , Maxim E , Doroshenko M E , Ivleva L I , Osiko V V , Zverev P G , SPIE 2006 , 6100 , 61000Z1
- [ 14 ] Chen Y F 2004 *Appl. Phys. B* **78** 685
- [ 15 ] Brenier A , Jia G , Chaoyang T 2004 *J. Phys. : Condens. Matter* **16** 9103
- [ 16 ] Lu G W , Xia H R , Meng X L , Liu X S , Yang W B 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 424 ( in Chinese ) [ 卢贵武、夏海瑞、孟宪林、刘雪松、杨卫兵 2002 物理学报 **51** 424 ]
- [ 17 ] Xu Z Y , Pan S H , Deng D Q , Guo D S , Li X F 1980 *Acta Phys. Sin.* **29** 1588 ( in Chinese ) [ 许祖彦、潘少华、邓道群、郭东升、李秀芳 1980 物理学报 **29** 1588 ]
- [ 18 ] Basiev T T , Sobol A A , Zverev P G , Osiko V V , Powell R C 1999 *Appl. Opt.* **38** 3
- [ 19 ] Basiev T T , Sobol A A , Zverev P G , Ivleva L I , Osiko V V , Powell R C 1999 *Opt. Mater.* **11** 307
- [ 20 ] Kamerman G W , Singh U N , Werner C 2000 *Laser Radar Tech. and Appl.* 4035
- [ 21 ] Johnson F 1963 *J. Appl. Phys.* **34** 897
- [ 22 ] Johnson L F , Thomas R A 1963 *Phys. Rev.* **131** 2038
- [ 23 ] Kaminskii A A , Pavlyuk A A , Klevtsov P V , Balashov I F , Berenberg V A , Sarkisov S E , Fedorov V A , Petrov M V , Lubchenko V V 1977 *Izv. Akad. Nauk SSSR , Neorg. Mater.* **13** 582
- [ 24 ] Zagumenny A , Ostroumov V , Shcherbavov I 1992 *Sov. J. Quantum Electron.* **22** 1071
- [ 25 ] Kaminskii A A , Klevtsov P V , Li L 1973 *Izv. Akad. Nauk SSSR , Neorg. Mater.* **9** 2059
- [ 26 ] Kaminskii A A , Sarkisov S E , Bohm J 1977 *Phys. Status Solidi ( a )* **43** 71

# Spectroscopic properties of self-excited Raman scattering of the $\text{Nd}^{3+}:\text{SrMoO}_4$ crystal<sup>\*</sup>

Han Lin Song Feng<sup>†</sup> Wan Cong-Shang Zou Chang-Guang

Yan Li-Hua Zhang Kang Tian Jian-Guo

( Photonics Center , College of Physics , Nankai University , Tianjin 300071 , China )

( Received 12 August 2006 ; revised manuscript received 31 August 2006 )

## Abstract

The spectral performance of a self-Raman-active material (  $\text{Nd}:\text{SrMoO}_4$  crystal ) was investigated. Its stimulated Raman scattering ( SRS ) , absorption spectra , luminescence lifetime , and infrared emission under 808 nm LD excitation were measured at room temperature. All vibration modes in the SRS spectra were identified. The most intense vibration is  $A_g(898\text{ cm}^{-1})$  mode , which is assigned to fully symmetric extension vibrations of the (  $\text{MoO}_4^{2-}$  ) group. Optical parameters were calculated from absorption spectra with Judd-Ofelt ( J-O ) theory. The integrated emission cross-section and spontaneous emission probability corresponding to 1068 nm emission are  $0.57 \times 10^{-18}\text{ cm}^2$  and  $141.06\text{ s}^{-1}$  , respectively. The lifetime of the 1068 nm emission was measured to be 0.2 ms. Considering the infrared luminescence excited by 808 nm LD , the possibility of obtaining 1180 nm first-Stokes component relevant to the 1068 nm emission is demonstrated. These conclusions can be our guidance to develop high-efficiency new-wavelength self-excited Raman lasers.

**Keywords** :  $\text{Nd}^{3+}$  ions ,  $\text{SrMoO}_4$  crystal , self-excited Raman scattering

**PACC** : 7830 , 7830G , 4255R

<sup>\*</sup> Project supported by the New Century Excellent Talents in University ( Grant Nos. 560-903102 , 560-903103 ) , the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars ( Grant No. b2a2023160 ) , the State Education Ministry and the Excellent Young Teachers Program of MOE , China ( Grant No. C01177 ) , the Natural Science Foundation of Tianjin City ( Grant No. 05YFGPGX05100 ) , and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University.

<sup>†</sup> Corresponding author , Email : fsong@nankai.edu.cn