

# Study on the Raman Spectra of a New Type Gysgg Radiation Resistant Crystal

Zhongqing Fang<sup>1,2</sup>, Dunlu Sun<sup>1\*</sup>, Jianqiao Luo<sup>1,3</sup>, Huili Zhang<sup>1,2</sup>, Xuyao Zhao<sup>1,2</sup>, Cong Quan<sup>1,2</sup>, Lunzhen Hu<sup>1,2</sup>, Maojie Cheng<sup>1</sup>, Qingli Zhang<sup>1</sup>, Shaotang Yin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei Anhui

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei Anhui  
Email: \*dlsun@aiofm.ac.cn

Received: Jun. 30<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2017; published: Jul. 26<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

Raman spectrum of a new radiation resistant GYSGG ( $Gd_{0.63}Y_{2.37}Sc_2Ga_3O_{12}$ ) crystal grown by Czochralski method was studied. The Raman vibration peaks are related with crystal structure of tetrahedron, octahedron and dodecahedron by comparing with YAG ( $Y_3Al_5O_{12}$ ) and GGG ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ ) garnet crystals with the same structure. The corresponding lattice vibration modes of 13 Raman peaks are classified and identified. The maximum phonon energy of GYSGG crystal is obtained to be  $732.1\text{ cm}^{-1}$ , and the different maximum phonon energy of GYSGG, GSGG ( $Gd_3Sc_2Ga_3O_{12}$ ) and YSGG ( $Y_3Sc_2Ga_3O_{12}$ ) by first-principles was discussed. At last, in comparison with common laser crystals high-doped with  $Er^{3+}$ , we analyzed the influence of maximum phonon energy with energy level lifetime. Our results can provide some reference for the study of the microscopic mechanism of crystal growth and the design of the laser crystal.

## Keywords

GYSGG, Raman Spectrum, Maximum Phonon Energy

# 新型抗辐射GYSGG晶体的Raman光谱研究

方忠庆<sup>1,2</sup>, 孙敦陆<sup>1\*</sup>, 罗建乔<sup>1,3</sup>, 张会丽<sup>1,2</sup>, 赵绪尧<sup>1,2</sup>, 权聪<sup>1,2</sup>, 胡伦珍<sup>1,2</sup>, 程毛杰<sup>1</sup>, 张庆礼<sup>1</sup>, 殷绍唐<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥

<sup>3</sup>电子工程学院, 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥

Email: \*dlsun@aiofm.ac.cn

\*通讯作者。

文章引用: 方忠庆, 孙敦陆, 罗建乔, 张会丽, 赵绪尧, 权聪, 胡伦珍, 程毛杰, 张庆礼, 殷绍唐. 新型抗辐射 GYSGG 晶体的 Raman 光谱研究[J]. 材料科学, 2017, 7(4): 515-522. <https://doi.org/10.12677/ms.2017.74068>

## 摘要

对采用提拉法生长的新型GYSGG ( $Gd_{0.63}Y_{2.37}Sc_2Ga_3O_{12}$ )晶体的Raman光谱进行了研究。通过与结构相同的YAG ( $Y_3Al_5O_{12}$ )和GGG ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ )石榴石晶体的比较, 将GYSGG的Raman振动峰与四面体、八面体及十二面体的晶体结构相联系, 分类和指认了Raman光谱中13个峰对应的晶格振动模式, 得到GYSGG的最大声子能量为 $732.1\text{ cm}^{-1}$ , 并通过第一性原理计算分析了GYSGG, GSGG ( $Gd_3Sc_2Ga_3O_{12}$ )和YSGG ( $Y_3Sc_2Ga_3O_{12}$ )最大声子能量差别的原因。最后在几种常见的高浓度掺 $Er^{3+}$ 激光晶体中, 分析了最大声子能量对激光上下能级寿命的影响规律。本文结果可以为晶体生长微观机理的研究及激光晶体的设计提供一定的参考。

## 关键词

GYSGG, Raman光谱, 最大声子能量

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

GYSGG ( $Gd_xY_{3-x}Sc_2Ga_3O_{12}$ )是 GSGG ( $Gd_3Sc_2Ga_3O_{12}$ ) [1]与 YSGG ( $Y_3Sc_2Ga_3O_{12}$ )晶体的混晶共熔体,  $x$ 取值可以在 0~3 之间。GYSGG 属于石榴石结构, 离子半径较大的 Sc 占据其氧八面配位体的中心位置, 晶格常数大于 GGG ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ ), 是一种理想的衬底基片材料[2]。此外, 通过改变晶体中位于十二面配位体中 Gd 和 Y 的比例, 还可以调节晶格常数的大小, 使之与表面膜层晶格常数较好地匹配, 从而更好地满足实际应用的需求。不仅如此, 在 GYSGG 基质中掺入激活离子后还可以用于激光工作物质。由于 Gd 与 Y 的混合可使晶体无序度增加, 晶场弱于 GSGG 和 YSGG, 使激光晶体的荧光谱加宽, 从而更有利于超短脉冲激光的产生。掺 $Nd^{3+}$ 的GYSGG晶体中显示出优良的双波长激光特性[3] [4] [5] [6], Zhong [6]等人已在Nd:GYSGG晶体中实现了1052.8和1058.4 nm的调Q双波长激光输出, 通过差频效应, 还有可能获得约1.53 THz的太赫兹光源。Chen [7]等人在GYSGG中掺入 $Er^{3+}$ 后, 获得了在2.796  $\mu\text{m}$ 处峰值功率为1.25 W的激光输出, 且具有优良的抗辐射特性[7] [8] [9] [10]。Luo [10]等人对Er:GYSGG晶体进行了敏化和退激活研究, 在生长出的Cr,Er,Pr:GYSGG晶体上实现了平均功率2.9 W、频率60Hz的2.79  $\mu\text{m}$ 激光, 与Cr,Er:YSGG晶体相比, 其更适合在高的重复频率下工作。

激光晶体中掺入的激活离子会受到基质材料的声子能量大小影响, 而声子能量是表征分子(离子)振动强烈程度的物理量, 传统获取最大声子能量的直接方法是测其Raman光谱[11]。关于GYSGG晶体的Raman光谱的研究尚未有文献报道, 本文测试分析了纯GYSGG晶体的Raman光谱, 与YAG ( $Y_3Al_5O_{12}$ )和GGG晶体进行了比较, 分类并指认了其中13个Raman峰的振动模式, 同时获得了晶体的最大声子能量。所得结果可为晶体生长微观机理研究及激光晶体设计提供一定的参考。

## 2. 实验

在提拉法生长的优质GYSGG ( $Gd_{0.63}Y_{2.37}Sc_2Ga_3O_{12}$ )晶体上, 垂直于晶体生长方向 $\langle 111 \rangle$ 切割、双面抛

光出尺寸为  $\Phi 25 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$  的薄片样品。在室温下使用 LABRAM-HR 型激光共焦显微拉曼光谱仪测量 GYSGG 晶体在  $50\sim 1000 \text{ cm}^{-1}$  的拉曼光谱, 激发光源采用  $\text{Ar}^+(514.5 \text{ nm})$  激光器, 入射光垂直于晶体的表面。由于 GYSGG 晶体属于立方晶系, 具有各向同性, 因此在本实验中没有考虑偏振配置测量。

### 3. 结果分析

GYSGG 属立方晶系, 空间群为  $\text{O}_h^{10}-\text{I}_{a3d}$ , 配位数为 8, Ga 占据氧四面体的中心位置, Sc 占据氧八面体的中心位置, Gd 和 Y 共同占据氧十二面体的中心位置, 结构示意图如图 1 所示。每个原胞中有 80 个原子, 即有  $3 \times 80 = 240$  个自由度, 根据因子群分析共有 96 个振动模式, 不可约表示为:

$$\Gamma = 3A_{1g} + 8E_g + 14T_{2g} + 5A_{1u} + 5A_{2u} + 5A_{2g} + 10E_u + 10T_{1g} + 16T_{2u} + 18T_{1u}$$

其中  $A_{1g} + E_g + T_{2g}$  模式是 Raman 活性,  $T_{1u}$  是红外活性[12]。

图 2 是 GYSGG 晶体的 Raman 光谱, 共观察到了 14 个峰, 峰的所在位置分别为:  $116.8 \text{ cm}^{-1}$ ,  $165.7 \text{ cm}^{-1}$ ,  $226.1 \text{ cm}^{-1}$ ,  $268.7 \text{ cm}^{-1}$ ,  $320.8 \text{ cm}^{-1}$ ,  $345.7 \text{ cm}^{-1}$ ,  $374.4 \text{ cm}^{-1}$ ,  $418.2 \text{ cm}^{-1}$ ,  $481.6 \text{ cm}^{-1}$ ,  $511.5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $589.6 \text{ cm}^{-1}$ ,  $634.2 \text{ cm}^{-1}$ ,  $732.1 \text{ cm}^{-1}$  和  $980.1 \text{ cm}^{-1}$ , 其中在波数为  $980.1 \text{ cm}^{-1}$  处是其最大值。外部振动比内部振动的振动频率小, 把 Raman 峰中波数在  $200 \text{ cm}^{-1}$  以下的峰认为是外部振动, 它们是  $[\text{GdO}_8]^{13-}$  十二面体、 $[\text{YO}_8]^{13-}$  十二面体、 $[\text{ScO}_6]^{9-}$  八面体和  $[\text{GaO}_4]^{5-}$  四面体基团的晶格振动。据报道, 人们已知石榴石晶体的 Raman 活性声子都在  $800 \text{ cm}^{-1}$  以下[13], 这些高于  $800 \text{ cm}^{-1}$  的峰并非声子散射, 因为在各种配置下其强度没有明显变化, 不遵守声子模式选择定则, 另外改变激发光波长, 一些线消失了, 保留的一些也不在相应的频移处出现, 而是在确定的频率下重复, 说明这些峰可能是荧光谱线。

GYSGG、GGG 和 YAG 均属于石榴石结构, 参考  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  四面体、 $[\text{AlO}_6]^{9-}$  八面体基团的特征振动频率范围[13], 运用位置群分析, 以及文献[13][14][15]中 Nd:GGG 的 Raman 结果和我们对 GGG 的测试结果进行比较, 一共识别出 GYSGG 的 Raman 光谱中的 13 个峰, 结果如表 1 所示。

在表 1 中, 振动类别与振动模式和对称性的关系是:  $\nu_1$  表示对称性是  $A_1$  的对称伸缩振动频率;  $\nu_2$  表示对称性是 E 的弯曲振动频率;  $\nu_3$  表示对称性是  $T_2$  的反对称伸缩振动频率;  $\nu_4$  表示对称性是  $T_2$  的变形弯曲振动频率[16]。  $[\text{GdO}_8]^{13-}$  和  $[\text{YO}_8]^{13-}$  十二面体中 Gd-O 键和 Y-O 键键长最长, 应在较低的波数, 而  $\text{Y}^{3-}$

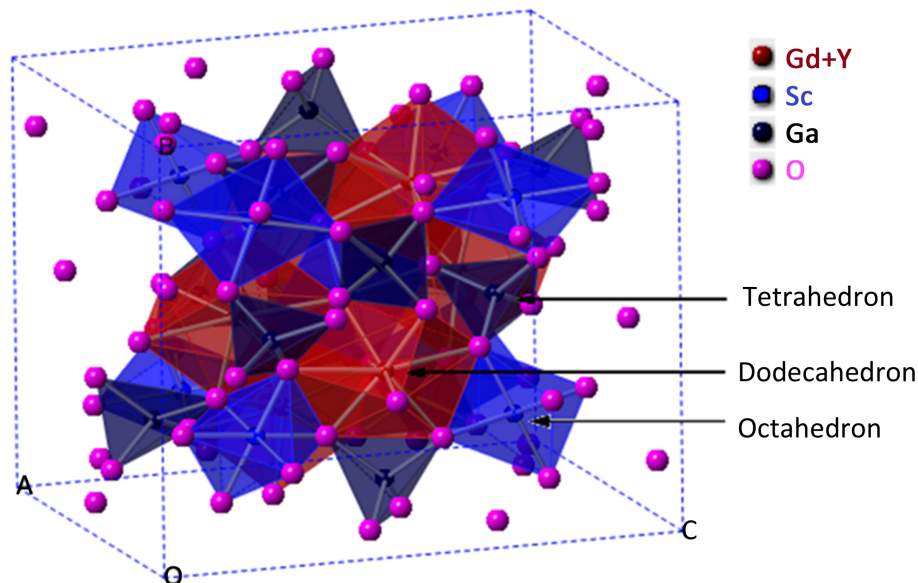
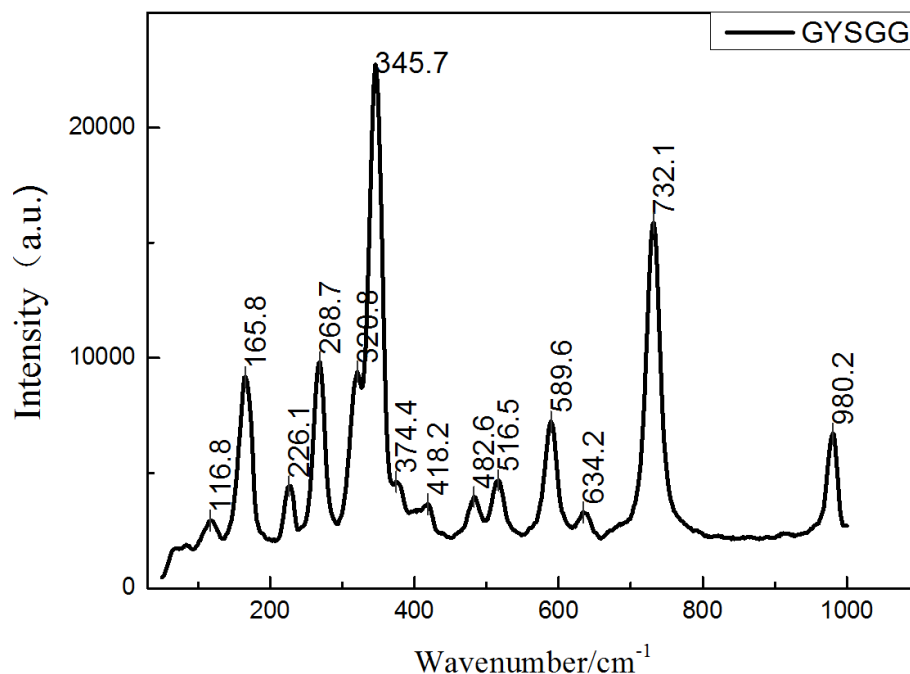


Figure 1. Schematic of the GYSGG crystal structure

图 1. GYSGG 晶体结构示意图



**Figure 2.** Raman spectrum of the GYSGG crystal

**图 2.** GYSGG 晶体的拉曼光谱

**Table 1.** Raman vibration modes of the GYSGG crystal

**表 1.** YSGG 晶体的 Raman 振动模式

Raman Shift (cm <sup>-1</sup> )	Symmetry	Symmetry type	Vibration mode
116.8	T <sub>2g</sub>		External vibration
165.8	T <sub>2g</sub>		
226.1	T <sub>2g</sub>	v <sub>4</sub>	Gd-O bond in dodecahedral GdO <sub>8</sub> , distortional and bending vibration
268.7	E <sub>g</sub>	v <sub>2</sub>	Gd-O bond in dodecahedral GdO <sub>8</sub> , bending vibration
320.8	E <sub>g</sub>	v <sub>4</sub>	Sc-O bond in octahedral ScO <sub>6</sub> , distortional and bending vibration
345.7	A <sub>1g</sub>	v <sub>1</sub>	Gd-O bond in dodecahedral GdO <sub>8</sub> , symmetric and stretching vibration
374.4	A <sub>1g</sub>	v <sub>1</sub>	Y-O bond in dodecahedral YO <sub>8</sub> , distortional and bending vibration
418.2	T <sub>2g</sub>	v <sub>4</sub>	Ga-O bond in tetrahedral GaO <sub>4</sub> , distortional and bending vibration
482.6	T <sub>2g</sub>	v <sub>4</sub>	Y-O bond in dodecahedral YO <sub>8</sub> , symmetric and stretching vibration
516.5	A <sub>1g</sub>	v <sub>1</sub>	Sc-O bond in octahedral ScO <sub>6</sub> , symmetric and stretching vibration
589.6	T <sub>2g</sub>	v <sub>3</sub>	Sc-O bond in octahedral ScO <sub>6</sub> , dissymmetric and stretching vibration
634.2	E <sub>g</sub>	v <sub>2</sub>	Ga-O bond in tetrahedral GaO <sub>4</sub> , bending vibration
732.1	A <sub>2g</sub>	v <sub>1</sub>	Ga-O bond in tetrahedral GaO <sub>4</sub> , symmetric stretching and dissymmetric stretching
	T <sub>2g</sub>	v <sub>3</sub>	

比  $Gd^{3+}$  离子的半径小, Y-O 键键长比 Gd-O 键短, 说明 Y-O 键的振动频率要比 Gd-O 键大, 相对的 Raman 频移更大, 因此可以把波数为  $226.1, 268.7$  和  $345.7\text{ cm}^{-1}$  的 Raman 峰分别指认为  $[GdO_8]^{13-}$  十二面体中 Gd-O 键的变形弯曲振动、弯曲振动和对称伸缩振动; 把波数为  $374.4$  和  $482.6\text{ cm}^{-1}$  指认为  $[YO_8]^{13-}$  十二面体中 Y-O 键的变形弯曲振动和对称伸缩振动; 八面体  $[ScO_6]^{9-}$  中 Sc-O 键键长介于四面体和十二面体之间, 因此把波数为  $320.8, 516.5$  和  $589.6\text{ cm}^{-1}$  分别指认为 Sc-O 键的变形弯曲振动, 对称伸缩振动和反对称伸缩振动;  $[GaO_4]^{5-}$  四面体中 Ga-O 键键长最短, Ga-O 键的振动频率也应处于较高波数, 参照  $[AlO_4]^{5-}$  四面体的  $\nu_1, \nu_3, \nu_4$  振动分别在  $700\sim 980, 720\sim 840, 370\sim 460\text{ cm}^{-1}$  之间[14]。因此把  $418.2\text{ cm}^{-1}$  指认为 Ga-O 键的变形弯曲振动, 把  $732.1\text{ cm}^{-1}$  指认为 Ga-O 键的对称伸缩振动和反对称伸缩振动, 把  $634.2\text{ cm}^{-1}$  指认为 Ga-O 键的弯曲振动。当然其中 O 原子被四面体、八面体和十二面体共用, 有些振动模式是难以区分的, 以上指认也只是近似指认。

在 YAG 中, Al 占据八面体和四面体的中心位置, Y 占据十二面体的中心位置, GGG 中, Ga 占据八面体和四面体的中心位置, Gd 占据十二面体的中心位置。我们对于 GYSGG 晶体结构类似的 YAG 和 GGG 晶体进行了 Raman 光谱测试, 测试结果如图 3 所示。稀土元素 Y, Gd 具有相似的性质, Y 和 Gd 都占据在十二面体中心位置, 十二面体中键长最长, 其振动频率在低波数段, 在图中可以观察到三种晶体在  $252.3\text{ cm}^{-1}, 350.1\text{ cm}^{-1}, 343.4\text{ cm}^{-1}$  附近均有 Raman 峰, 四面体基团结合力强, 具有较为明显的伸缩振动和变形振动峰, 且具有较高的振动频率。

我们还可以从图 3 的 Raman 谱中得到基质最大声子能量值, 也列在表 2 中。YAG 是 Al 占据四面体中心位置, 最大声子能量在  $776.1\text{ cm}^{-1}$  附近, GGG 和 GYSGG 都是 Ga 占据四面体中心位置, 其最大声子能量分别为  $739.3$  和  $732.1\text{ cm}^{-1}$ 。此外, 还获得了 YSGG 和 GSGG 晶体的最大声子能量, 分别为  $728.2$  和  $741.1\text{ cm}^{-1}$ , 如图 4 和表 2 中所示。几种常见石榴石基质晶体中, YAG 的声子能量最大, GYSGG 是在 YSGG 晶体中用  $Gd^{3+}$  离子取代一部分  $Y^{3+}$  离子, 属于 GSGG 和 YSGG 的混晶, 最大声子能量也介于两者之间。

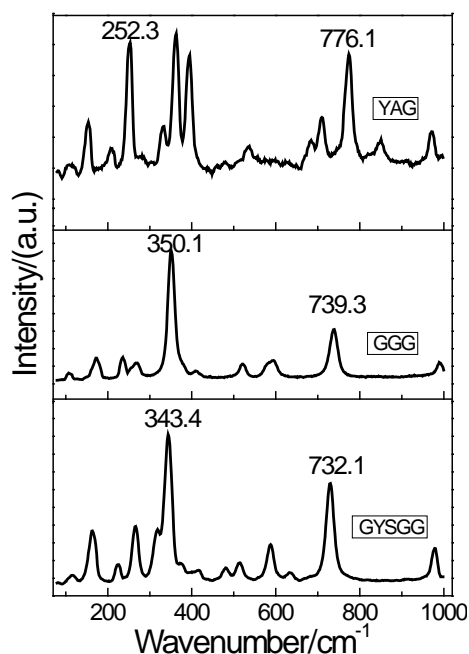
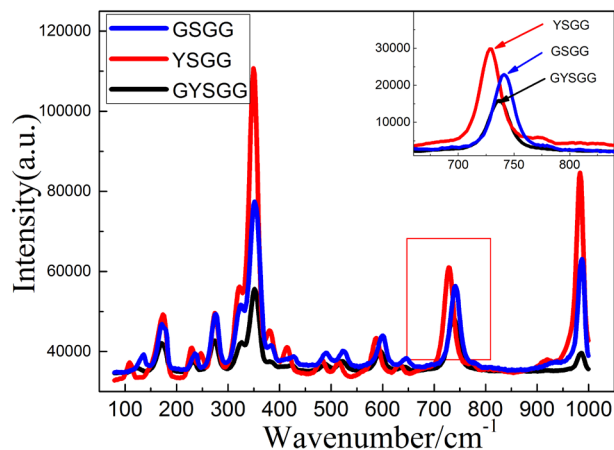


Figure 3. Raman spectra of YAG, GGG and GYSGG crystals

图 3. YAG, GGG, GYSGG 的拉曼光谱



**Figure 4.** Raman spectra of YSGG, GSGG and GYSGG crystals  
**图 4.** YSGG, GSGG 和 GYSGG 晶体的 Raman 光谱

**Table 2.** Maximum phonon energy and Mulliken populations of some garnet structure crystals  
**表 2.** 几种常见石榴石结构晶体的最大声子能量和 Mulliken 布居数

Crystals	Maximum phonon energy (cm <sup>-1</sup> )	Ga-O bonds length(Å)	Ga-O Mulliken populations
YSGG	728.2	1.90457	0.38
GYSGG	732.1	1.90603	0.39
GSGG	741.1	1.91698	0.46

最大声子能量的大小与 $[\text{GaO}_4]^{5-}$ 四面体基团中 Ga-O 键化学键强度正相关, 而基团中化学键强度取决于电子密度分布(通常用 Mulliken 布居数表示) [17] [18] [19], 利用基于第一性原理计算的 CASTEP (Cambridge Sequential Total Energy Package) 程序中计算 YSGG, GSGG 和 GYSGG 晶体中 $[\text{GaO}_4]^{5-}$ 四面体基团 Ga-O 键的 Mulliken 布居数, 结果如表 2 所示。我们在计算过程中取 GYSGG 分子式为  $\text{Gd}_{0.75}\text{Y}_{2.25}\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ , 这是因为在 CASTEP 中构建晶胞结构时, 由于晶胞所有原子必须为整数, 如果按照  $\text{Gd}_{0.63}\text{Y}_{2.37}\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$  分子式构建需要建立一个超晶胞, 计算量也将成倍增加, 因此我们在计算中将 Gd 原子与 Y 原子的比例近似调整为 1:3, 这样的近似会给计算结果带来略微差别, 但并不影响结论。YSGG, GYSGG 和 GSGG 的中 $[\text{GaO}_4]^{5-}$ 四面体基团 Ga-O 键的 Mulliken 布居数分别为 0.38, 0.39 和 0.46, 与实验获得的最大声子能量基本符合。同时这也能很好地解释在图 4 中, 随着  $\text{Gd}^{3+}$  离子在  $\text{Gd}_x\text{Y}_{3-x}\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$  比例的增加, 在  $732\text{ cm}^{-1}$  波数附近 Raman 频率发生红移的原因。

激光晶体中基质声子能量的大小对其中掺入激活离子的能级寿命有一定的影响, 特别在中红外波段。表 3 列出了几种主要的石榴石结构掺  $\text{Er}^{3+}$  激光晶体  ${}^4\text{I}_{11/2}$  和  ${}^4\text{I}_{13/2}$  能级寿命参数 [7] [20] [21], 粒子从  ${}^4\text{I}_{11/2}$  向  ${}^4\text{I}_{13/2}$  跃迁可发射出  $2.7\sim 3\ \mu\text{m}$  波段的激光,  $\text{Er}^{3+}$  掺杂浓度在 30~35 at.% 之间。根据半经验能隙定理,  $P = E/M$ , 能隙为 E 的能级之间的非辐射跃迁几率主要由 E 与其基质最大声子能量 M 的比值 P 决定, 声子能量 M 小, P 值变大, 非辐射跃迁的几率减小, 因此其下能级粒子数相对少, 寿命更短。 $\text{Er}^{3+}$  在 YAG、GGG、YSGG、GYSGG 和 GSGG 晶体中上能级  ${}^4\text{I}_{11/2}$  寿命分别是: 0.12、0.96、1.3、1.2 和 1.6 ms, 而下能级  ${}^4\text{I}_{13/2}$  寿命分别为 7.25、4.86、3.4、3.9 和 6.0 ms, 其下能级与上能级的寿命比别为 60.4、5.1、2.6、3.3 和 3.8。从中可以看出, 其寿命值与表 2 中基质的最大声子能量基本符合。由于 YAG 的最大声子能量较大, 非辐射跃迁的几率较大, 因此导致下能级寿命较长, 上能级寿命较短, 其下能级与上能级寿命比值达到 60.4 倍, 而 YSGG 的声子能量最小, 其寿命比值仅 2.6。激光实验结果也表明,  $\text{Er}:\text{YSGG}$  的激光阈值较低且

**Table 3.** Level lifetimes of  $^4I_{11/2}$  and  $^4I_{13/2}$  in some  $Er^{3+}$  doping laser crystals  
**表 3.** 几种掺  $Er^{3+}$  激光晶体的  $^4I_{11/2}$  和  $^4I_{13/2}$  能级寿命

Crystals	Er:YAG	Er:GGG	Er:YSGG	Er:GYSGG	Er:GSGG
Wavelength(nm)	2937	2821	2797	2796	2790
$Er^{3+}$ concentration (at.%)	33	30	30	35	35
$^4I_{11/2}$ Lifetime(ms)	0.12	0.96	1.3	1.2	1.6
$^4I_{13/2}$ Lifetime(ms)	7.25	4.86	3.4	3.9	6.0
$^4I_{13/2}/^4I_{11/2}$ lifetime ratio	60.4	5.1	2.6	3.3	3.8

激光效率也相对较高, Er:GYSGG 的寿命比均小于 Er:YAG、Er:GGG 和 Er:GSGG, 虽稍大于 Er:YSGG, 但因其具有优良的抗辐射特性, 因此是相对较为理想的 2.7~3  $\mu m$  新型中红外激光材料。

#### 4. 结论

对 GYSGG 晶体的 $\langle 111 \rangle$ 晶面进行了 Raman 光谱测试, 通过与 YAG 和 GGG 晶体振动模式的比较, 将晶体 Raman 峰与四面体、八面体及十二面体的晶体结构相联系, 分类和指认了 13 个 Raman 振动模式。此外, 还得到 GYSGG 的最大声子能量为  $732.1 \text{ cm}^{-1}$ , 并且与常见的同结构晶体 YAG、GGG、YSGG 及 GSGG 的最大声子能量进行了比较, 分析讨论了基质最大声子能量对高浓度掺  $Er^{3+}$  激光晶体上下能级寿命的影响规律, 由于 GYSGG 优良的抗辐射性能和相对低的最大声子能量, 因此是相对较为理想的新型中红外激光基质材料。

#### 基金项目

这项工作是由国家重点发展研究计划(No. 2016YFB1102301); 国家自然科学基金(No. 51272254, 61405206, 51502292); 电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金(No. SKL2015KF01)支持。

#### 参考文献 (References)

- [1] Wood, D.L. and Nassau, K. (1990) Optical Properties of Gadolinium Gallium Garnet. *Applied Optics*, **29**, 3704-3707. <https://doi.org/10.1364/AO.29.003704>
- [2] 程毛杰, 孙敦陆, 罗建乔, 张会丽, 陈家康, 张庆礼, 殷绍唐. 新型 GYSGG( $Gd_xY_{3-x}Sc_2Ga_3O_{12}$ )晶体的生长、结构及透过光谱研究[J]. *无机材料学报*, 2014, 29(10):1077-1081.
- [3] Zhang, B.Y., Xu, J.L., Wang, G.J., He, J.L., Wang, W.J., Zhang, Q.L., Sun, D.L., Luo, J.Q. and Yin, S.T. (2011) Continuous-Wave and Passively Q-Switched Laser Performance of a Disordered Nd:GYSGG Crystal. *Optics Communications*, **284**, 5734-5737. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.08.004>
- [4] Song, Q., Wang, G.J., Zhang, B.J., Zhang, Q.L., Wang, W.J., Wang, M.H., Sun, G.H., Bo, Y. and Peng, Q.J. (2015) Passively Q-Switched Mode-Locked Dual-Wavelength Nd:GYSGG Laser Using Graphene Oxide Saturable Absorber. *Optics Communications*, **347**, 64-67. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.03.002>
- [5] Song, Q., Wang, G.J., Zhang, B.J., Zhang, Q.L., Wang, W.J., Wang, M.H., Sun, G.H., Bo, Y. and Peng, Q.J. (2015) Diode-Pumped Passively Dual-Wavelength Q-Switched Nd:GYSGG Laser Using Graphene Oxide as the Saturable Absorber. *Applied Optics*, **54**, 2688-2692. <https://doi.org/10.1364/AO.54.002688>
- [6] Zhong, K., Sun, C.L., Yao, J.Q., Xu, D.G., Xie, X.Y., Cao, X.L., Zhang, Q.L., Luo, J.Q., Sun, D.L. and Yin, S.T. (2013) Efficient Continuous-Wave 1053-NM Nd:GYSGG Laser with Passively Q-Switched Dual-Wavelength Operation for Terahertz Generation. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **49**, 375-379. <https://doi.org/10.1109/JQE.2013.2246545>
- [7] Chen, J.K., Sun, D.L., Luo, J.Q., Xiao, J.Z., Dou, R.Q. and Zhang, Q.L. (2013)  $Er^{3+}$  Doped GYSGG Crystal as a New Laser Material Resistant to Ionizing Radiation. *Optics Communications*, **8**, 84-87. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.03.048>
- [8] Chen, J.K., Sun, D.L., Luo, J.Q., Zhang, H.L., Dou, R.Q., Xiao, J.Z., Zhang, Q.L. and Yin, S.T. (2013) Spectroscopic Properties and Diode End-Pumped 2.79  $\mu m$  Laser Performance of Er,Pr:GYSGG Crystal. *Optics Express*, **21**,

23425-23432. <https://doi.org/10.1364/OE.21.023425>

- [9] Chen, J.K., Sun, D.L., Luo, J.Q., Xiao, J.Z., Kang, H., and Zhang, H.L., Cheng, M.J., Zhang, Q.L. and Yin, S.T. (2013) Spectroscopic, Diode-Pumped Laser Properties and Gamma Irradiation Effect on Yb,Er,Ho:GYSGG Crystals. *Optics Letters*, **38**, 1218-1220. <https://doi.org/10.1364/OL.38.001218>
- [10] Luo, J.Q., Sun, D.L., Zhang, H.L., Guo, Q., Fang, Z.Q., Zhao, X.Y., Cheng, M.J., Zhang, Q.L. and Yin, S.T. (2015) Growth, Spectroscopy, and Laser Performance of a 2.79  $\mu\text{m}$  Cr,Er,Pr:GYSGG Radiation-Resistant Crystal. *Optics Letters*, **40**, 4194-4197. <https://doi.org/10.1364/OL.40.004194>
- [11] 杨文琴, 郭丽花, 冯尚源, 陈金铠. 单, 双掺钒酸钇晶体的 Raman 光谱与能量转移研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(3): 581-584.
- [12] Rousseau, D.L., Bauman, R.P. and Porto, S.P.S. (2010) Normal Mode Determination in Crystals. *Journal of Raman Spectroscopy*, **10**, 253-290. <https://doi.org/10.1002/jrs.1250100152>
- [13] 张鹏翔, 刘玉龙, 莫育俊. 钇镓石榴石单晶的喇曼光谱[J]. 物理学报, 1983(9): 1200-1203.
- [14] 徐培苍, 李如壁, 王永强. 地学中的拉曼光谱[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996.
- [15] 孙敦陆, 张庆礼, 张霞, 邵淑芬, 谷长江, 王爱华, 江海河, 殷绍唐. Nd:Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 晶体的生长与拉曼光谱研究[J]. 光电子·激光, 2007, 18(6): 706-709.
- [16] 滕冰, 胡小波, 王继扬, 董胜明, 王正平. BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> 晶体的拉曼光谱[J]. 光电子·激光, 2004, 15(6): 734-738.
- [17] Mulliken, R.S. (1955) Electronic Population Analysis on LCAO-MO Molecular Wave Functions. II. Overlap Populations, Bond Orders, and Covalent Bond Energies. *Journal of Chemical Physics*, **23**, 1841-1846. <https://doi.org/10.1063/1.1740589>
- [18] Mulliken, R.S. (1955) Electronic Population Analysis on LCAO-MO Molecular Wave Functions. IV. Bonding and Antibonding in LCAO and Valence-Bond Theories. *Journal of Chemical Physics*, **23**, 2343-2346. <https://doi.org/10.1063/1.1741877>
- [19] Tang, X.L., Feng, D.X., Wan, S.M., Kang, L., Zhang, B. and Lin, Z.S. (2015) Crystal Structure and Raman Spectrum of Ba<sub>2</sub>Pb(B<sub>3</sub>O<sub>6</sub>)<sub>2</sub>. *Materials Chemistry & Physics*, **163**, 501-506. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.08.005>
- [20] Stoneman, R.C. and Esterowitz, L. (1992) Efficient Resonantly Pumped 2.8-Microm Er<sup>3+</sup>: GSGG Laser. *Optics Letters*, **17**, 816-818. <https://doi.org/10.1364/OL.17.000816>
- [21] Dinerman, B.J. and Moulton, P.F. (1994) 3- $\mu\text{m}$  CW Laser Operations in Erbium-Doped YSGG, GGG, and YAG. *Optics Letters*, **19**, 1143-1145. <https://doi.org/10.1364/OL.19.001143>

#### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)