

YSGG 系列晶体及激光器的研究进展

苏 静, 张庆礼, 殷绍唐

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: YSGG 系列晶体和激光器的研究在近几年又有了较大的发展, 本文介绍了 YSGG 系列晶体的生长、性能、发光机理和 YSGG 系列激光器的优良性能和广阔的应用前景。

关键词: YSGG; 激光晶体; 激光器

中图分类号: O799

文献标识码: A

文章编号: 1000-985X(2005)04-0709-05

Research Progress in Crystals and Lasers of YSGG Series

SU Jing, ZHANG Qing-li, YIN Shao-tang

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 11 October 2004, accepted 20 May 2005)

Abstract: Crystals and lasers of YSGG series have been greatly studied in recent years. The growth, performance, luminescent mechanism of the YSGG series crystals are introduced in this paper. It is showed that lasers of YSGG series have a good performance and wide application prospects.

Key words: YSGG; laser crystal; laser

1 引言

$Y_2Sc_2Ga_3O_{12}$ (YSGG) 系列晶体和激光器件的研究近几年又有了较大的发展。作为激光晶体, 它们的优点主要有: (1) 泵浦阈值低, 效率高; (2) 可以在平坦固液界面下生长^[1], 不存在杂质、应力等集中的核心, 因此容易获得高光学质量的晶体元件; (3) 与传统的 YAG 激光晶体相比, 由于 Nd^{3+} 在 YSGG 中的分凝系数较高, 约为 0.66^[1], 远大于 Nd^{3+} 在 YAG 晶体中的分凝系数 (0.1 ~ 0.2), 可以实现 Nd^{3+} 离子的较高掺杂, 有利于提高晶体的光学均匀性和泵浦效率; (4) 向 YSGG 晶体中掺入不同的激活离子, 可作为多种固态激光器的工作介质, 有些适合于激光二极管泵浦, 有些适合闪光灯泵浦, 还可以获得新波段激光。此外, Cr^{4+} : YSGG 晶体可用做激光器调 Q 器件。总之, YSGG 系列晶体在医学、光通讯、军事、环境研究等方面已被广泛使用, 展现出广阔的应用前景。

YSGG 晶体属石榴石结构晶体, 一般采用提拉法获得。石榴石结构晶体计量比分子式为 $\{C_3\}\{A_2\}\{D_3\}O_{12}$, 空间群为 $Ia\bar{3}d$, 每个单胞有 8 个分子式, 整个晶体可以看为分别以 C、A、D 阳离子为中心的氧十二面体、氧八面体及氧四面体形成的连网结构, C、A、D、O 格位的点群对称性分别为 222 、 $\bar{3}$ 、 $\bar{4}$ 、 $\bar{1}$, 一般认为, $Y_3Sc_2Ga_3O_{12}$ 可由 Sc 取代 $Y_3Ga_5O_{12}$ 中 $\bar{3}$ 格位的 Ga 而获得^[2]。然而, 也有报道认为 Sc 在占据部分 $\bar{3}$ 格位的同时, 还占据 Y 的格位, 分子通式可表示为: $\{Y_{3-x}Sc_x\}[\{Sc_{2-y}Gay\}Ga_3O_{12}]^{[3]}$, $Y_{2.93}Sc_{1.43}Ga_{3.64}O_{12}$ 为 YSGG 的一致共熔组分^[4]。

收稿日期: 2004-10-11; 修订日期: 2005-05-20

作者简介: 苏静(1978-), 女, 甘肃省人, 在读博士研究生。E-mail: sj007@163.com

本文就 YSGG 系列晶体及激光器的性能,研究进展及应用等作一个综合的介绍,为优化晶体性能、获得优质激光晶体提供参考。

2 晶体的物理化学性能

YSGG 晶体的熔点为 1877°C ^[4], Sc, Ga 平均离子半径为 0.0696nm , 结构稳定, 晶格常数为 1.24584nm ^[1]。德国柏林分子技术股份有限公司^[5]已批量生产各种高光学质量的 YSGG 晶体, Cr, Ho, Tm: YSGG 晶体的尺寸可以做到 $\phi 9.5 \times 101.6\text{mm}^2$ 。表 1 为该公司提供的几种常用的掺杂 YSGG 晶体的物理化学性能, 可以看出, YSGG 晶体具有良好的力学性能和激光性能。其中, Cr, Er: YSGG 的荧光寿命很长, 可以很好的贮备能量。在闪光灯泵浦下, Cr, Nd: YSGG、Cr, Er: YSGG 固态激光器的效率高于 Nd: YAG、Er: YAG 固态激光器。与 YAG 系列晶体相比, 如 Cr, Tm, Ho: YAG、Nd: YAG、Er: YAG 的热导率分别为: 13W/mK 、 13W/mK 、 11W/mK , YSGG 系列晶体的热导率较小, 故在设计大尺寸 YSGG 系列晶体器件时, 要考虑热效应因素。

表 1 几种掺杂 YSGG 晶体的主要性能

Table 1 Main properties of some doped-YSGG crystals

Crystals	Crystal structure	Lattice constant (nm)	Doping content (at/cm ³)	Density (g/cm ³)	Mohs hardness	Refractive index	Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ /K)
Er: YSGG	Cubic (space group <i>Ia3d</i>)	1.242	30-50at%	5.36	>7	1.926	8.1
Cr, Er: YSGG	cubic (space group <i>Ia3d</i>)	1.242	Cr: 0.5×10^{20} , Er: 4×10^{21}	5.2	>7	1.9263	8.1
Cr, Nd: YSGG	cubic (space group <i>Ia3d</i>)	1.242	Cr: 0.5×10^{20} , Nd: $(2/3) \times 10^{20}$	5.2	>7	1.9263	8.1

Crystals	Thermal conductivity (W/m·K)	Thermo-optical factor (dn/dT) (10 ⁻⁶ /K)	Emission cross-section (cm ²)	Lifetime (μs)	Relative (to YAG) efficiency of transformation of energy of the flash lamp	Sizes (dia. × length) (mm)
Er: YSGG	7.9	7				
Cr, Er: YSGG	6	12.3	5.2×10^{-21}	1400	1.5	3 × 30-12.7 × 127.0
Cr, Nd: YSGG	6	12.3	1.5×10^{-19}	240	2.3	3 × 30-12.7 × 152.4

3 晶体的激光性能及应用

下面就几种常用的 YSGG 掺杂晶体的研究进展、发光机理及应用做简要的介绍。

3.1 掺铒、铬 YSGG 体系

Er^{3+} 的 $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{3/2}$ 跃迁的 $1.5 \sim 1.6\mu\text{m}$ 波段激光处于人眼安全波段, $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ 跃迁的 $2.7 \sim 2.9\mu\text{m}$ 波段激光处于 O-H 强吸收区, 是精细外科手术理想的工作波段, 因此掺 Er 体系在光学通讯及激光医疗中得到广泛的研究。为便于比较, 图 1 为钛宝石激光泵浦下, 掺铒单片激光器的输入-输出曲线^[6]。可以看出, Er^{3+} : YSGG 晶体的激光性能优于 Er: YAG 晶体, 具有泵浦阈值低, 转换效率高及输出功率高的优点。

随着上转换激光器的应用, Er^{3+} : YSGG 晶体的上转换荧光引起了人们的注意^[7,8]。Xuesheng Chen 等人研究了掺杂浓度为 30% Er: YSGG 晶体在 $77 \sim 300\text{K}$ 温间, 可见区 $400 \sim 700\text{nm}$ 范围的上转换荧光。比较了分别用二极管激光器 790nm 激光和 Ar^+ 离子激光器

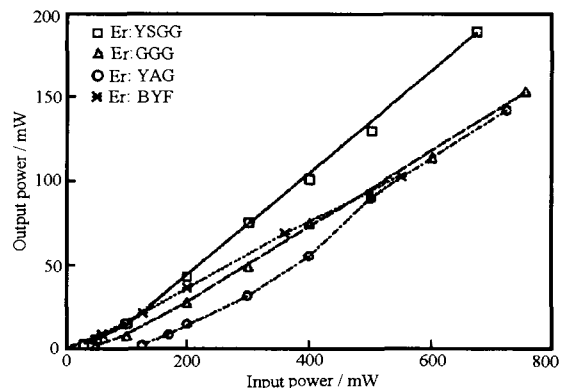


图 1 钛宝石激光泵浦下掺铒单片激光器的输入-输出曲线
Fig. 1 Input-output curves for the Er-doped monolithic lasers pumped by a Ti:sapphire laser

488nm 激光泵浦晶体得到的光谱,讨论了两光谱的不同,可能的上转换过程有如下三种^[7]:(1)先从($^4I_{9/2}$, $^4I_{9/2}$) \rightarrow ($^2I_{9/2}$, $^4I_{15/2}$),而后 $^2I_{9/2}\rightarrow^4S_{3/2}$, $^4F_{9/2}$; (2)先从 $^4I_{9/2}\rightarrow^4I_{11/2}$,而后($^4I_{11/2}$, $^4I_{11/2}$) \rightarrow ($^4F_{7/2}$, $^4I_{15/2}$),再从 $^4F_{7/2}\rightarrow^4S_{3/2}$, $^4F_{9/2}$; (3) $^4I_{9/2}$ 能级上两粒子分别发生 $^4I_{9/2}\rightarrow^4I_{11/2}$ 和 $^4I_{9/2}\rightarrow^4I_{13/2}$ 的跃迁,后者将跃迁能量转移给前者,使之发生 $^4I_{11/2}\rightarrow^4F_{9/2}$ 的跃迁。他们又用红外半导体二极管激光器泵浦 Er:YSGG 晶体,研究了依赖于 Er 的浓度,Er:YSGG 晶体中的发光机制及在上转换激发和直接激发下发光的不同。发现对钕浓度分别为 1%、30% 的 Er:YSGG 晶体,在红外激发时,30% Er:YSGG 的绿色和红色上转换发光强于 1% Er:YSGG。而在蓝光激发下,30% Er:YSGG 的绿光比 1% Er:YSGG 中的弱许多。选择 YSGG 为激光基质的主要原因为:与 YAG 相比,减少了多光子衰减速度,具有更低的光子能量、化学性能稳定,硬度好,光学同向性,可生长大尺寸,低光学损伤,高光学质量晶体等优点^[8]。

用 Cr^{3+} 离子为敏化离子, Er^{3+} 离子为激活离子的 Cr:Er:YSGG 晶体是优良的 $3\mu m$ 激光基质^[9]。在闪光灯泵浦下,一些研究表明,激发能有效地从 Cr 离子转移到 Er 离子,在 2796nm 获得激光运转,泵浦阈值为 5J,斜效率为 1%,闪光灯泵浦平均输出功率为 $2.7W$ ^[10]。这些性能都优于 2800nm 其它掺 Er 的激光晶体,尤其是其泵浦阈值很低。M. A. Noginov 等人引用上转换非全息光诱导光栅技术(LIG)研究了 Cr:Er:YSGG 晶体中 $^4I_{11/2}$ 能级的激发迁移及掺 Cr、Ho、Tm 的 YSGG 晶体低能级的激发迁移。对 Cr:Er:YSGG 晶体而言,发现 $1\mu m$ 的长程迁移,得到扩散系数为 $7 \times 10^{-7} cm^2/s$ 。分析认为 Cr:Er:YSGG 晶体中激发迁移不能用偶极间的能量转移来描述,并对其的可能性进行了讨论^[11,12]。另外,用闪光灯泵浦 Cr:Er:YSGG 晶体,在 $2.61 \sim 2.9\mu m$ 范围可实现调谐运转^[13]。

目前,锁模 Q 开关腔振荡 Er:Cr:YSGG 激光器($\lambda = 2.8\mu m$)的超短波脉冲可用于泵浦基于 GeSe, ZnGeP₂, CdSe 晶体的行进波光学参数发生器(OPG),获得不同范围可调中红外辐射^[14-16]。

3.2 掺四价铬的 YSGG

掺四价铬的石榴石作为脉冲、连续运转模式 $1.064\mu m$ 激光器的被动 Q 开关的用途及特殊的性能得到人们的关注, Cr^{4+} :YSGG 晶体可作为各种 Nd 激光器稳定可靠的 Q 开关^[2,17-20]。掺 Cr^{4+} 的 YAG、YSGG、GGG、LuAG 石榴石中, Cr^{4+} 的能级示意如图 2。 Cr^{4+} 格位为近似 Td 点对称, 3A_2 为基态, 3T_2 为激发态, 1E 为亚激发态。入射光将光子从 3A_2 激发到 3T_2 , 这些光子很快驰豫到亚稳态 1E 。 Cr^{4+} 第二激发态的对称类尚不清楚^[19]。一个材料能否作为被动 Q 开关,其光学吸收饱和性是很基本性能,常常用基态截面 σ_{gs} 与激发态截面 σ_{es} 比值 $\gamma(\sigma_{gs}/\sigma_{es})$ 来衡量。文献[2]研究了 15~380K 温区,四面体配位 Cr^{4+} 在 YAG、YSGG 等石榴石晶体的激发态寿命、激发态量子效应及激发截面。Y. Kalisky 等人对采用掺 Cr^{4+} :YAG、YSGG、LuAG 晶体做 Nd:YAG 激光器 $1.064\mu m$ 激光的饱和吸收体进行了比较。对不同的石榴石,观测到瞬时持续时间在 23~52ns 的 Q 开关脉冲。并用 Frantz-Nodvik 方程拟合实验饱和数据,估计了基态截面和激发态吸收^[17,18]。对 Cr^{4+} :YAG、GGG、YSGG 晶体中 Cr^{4+} 的密度 N,吸收截面参数 σ_{gs} 、 σ_{es} 总结如表 2 所示^[19],可以看出,与 Cr^{4+} :YAG、GGG 相比, Cr^{4+} :YSGG 具有较大的 γ 值,将其作为 Nd 激光器的 Q 开关,性能稳定。

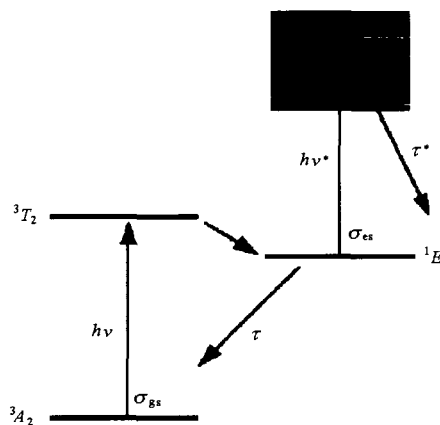


图2 Cr^{4+} :YSGG 晶体中 Cr^{4+} 能级示意图
Fig.2 Schematic energy level diagram for Cr^{4+} in the Cr^{4+} :YSGG crystal

表 2 掺 Cr⁴⁺ 晶体中 Cr⁴⁺ 的密度 N , 吸收截面参数 σ_{gs} 、 σ_{es} 的测量结果总结
Table 2 Summary of measured density N , absorption cross-section parameters σ_{gs} and σ_{es} in some chromium-doped crystals

Parameter	N	σ_{gs}	σ_{es}	$\gamma = \sigma_{gs}/\sigma_{es}$
Units	10^{17}cm^{-3}	10^{-18}cm^2	10^{-19}cm^2	
(Cr ⁴⁺ , Ca ⁴⁺): YAG	6.3	3.2	4.5	7.0, 3.5
(Cr ⁴⁺ , Mg ⁴⁺): YAG	1.8 ± 0.2	3.25 ± 0.15	6.25 ± 0.5	5.2 ± 0.4
(Cr ⁴⁺ , Ca ²⁺): GGG	0.71 ± 0.05	5.8 ± 0.5	13 ± 2	4.5 ± 0.7
(Cr ⁴⁺ , Ca ²⁺): YSGG	7.0	4.6	4.0	11.0
(Cr ⁴⁺ , Ca ⁴⁺): LuAG	26	1.1	0.45	25

3.3 掺铬、镱、镧系离子 YSGG 体系

Yb-Ho 体系因为激光跃迁存在从可见到中红外光谱区的多种可能性而受到关注。文献 [21] 报道了二极管泵浦连续波 $1.2 \mu\text{m}$ Yb³⁺: Ho³⁺: YSGG 晶体激光振荡器。对 Yb³⁺: Ho³⁺: YSGG 晶体, 由于掺入了 Yb, 使在 970nm 采用激光二极管作为有效的泵浦源成为可能, 其能级图如 3 所示。Yb³⁺ 吸收能量并将能量转移给 Ho³⁺ 的上激光能级 ⁵I₆ 能级。下激光能级 ⁵I₈ 的漂白由下列过程实现: 从 Yb 转移的能量, 贮存于长寿命 (10ms) 的 ⁵I₇ 能级。从 ⁵I₇ 能级, 实现有效的上转换和向更高能级的激发吸收, 这不断的供给上激光能级粒子数也抑制了 Ho³⁺ 向基态的弛豫。

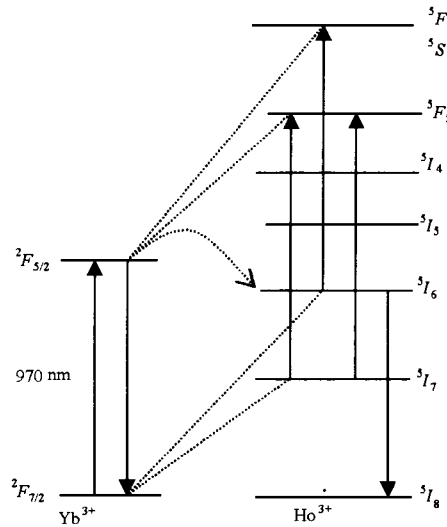


图 3 Yb: Ho: YSGG 晶体能级图

Fig. 3 Energy level scheme of the Yb: Ho: YSGG crystal

Cr³⁺: Yb³⁺: Ln³⁺ (Ho³⁺, Tm³⁺, Er³⁺): YSGG 晶体都是固体激光器材料的候选材料。在这类晶体中, Cr³⁺ 有效吸收泵浦闪光灯激发能并转移给 Yb³⁺, Yb³⁺ 达到某个的浓度可使得转移给镧系 Ln³⁺ 的能量显著的增加, 这种 Cr³⁺ → Yb³⁺ → Ln³⁺ 的能量转移机理, 允许减少激光离子 Ln³⁺ 的浓度, 并且能在低浓度下实现激光输出 [22]。其中, Cr³⁺: Yb³⁺: Ho³⁺: YSGG 晶体具有高激光效率和高的增益系数, 在 2.85 ~ 3.05 μm 范围内输出连续调谐波长, 这在激光医学上具有很好的应用潜力 [23]。据统计世界上用的导弹红外寻弹头大部分是采用 3 ~ 5 μm 的中波红外探测器, 因此研制 Cr, Yb, Ho: YSGG 激光晶体, 可对于中红外制导武器对抗提供有效的干扰源, 具有深远的军事意义。另外, 3 ~ 5 μm 的红外光可以用来远距离探测化学物质, 可用于反化学战和环境保护 [24]。

3.4 掺铬、铥、钬离子的 YSGG 体系

Ho³⁺ 离子的 ⁵I₇ → ⁵I₈ 能级跃迁发射 2.0 μm 激光, Tm³⁺ 离子的 ⁵H₄ → ⁵I₈ 能级跃迁发射 1.9 μm 激光, 均处于人眼安全波段。在环境研究探测大气悬浮颗粒及激光医学、激光雷达等领域有重要的应用前景。

在 Cr³⁺: Ho³⁺: YSGG 和 Cr³⁺: Tm³⁺: YSGG 晶体中, Cr → Ho 和 Cr → Tm 之间存在有效的能量转移, 使得这种晶体很有潜力作红外激光器的活性介质 [25-27]。文献首次在室温下, 用 Ar⁺ 激光器泵浦, 在

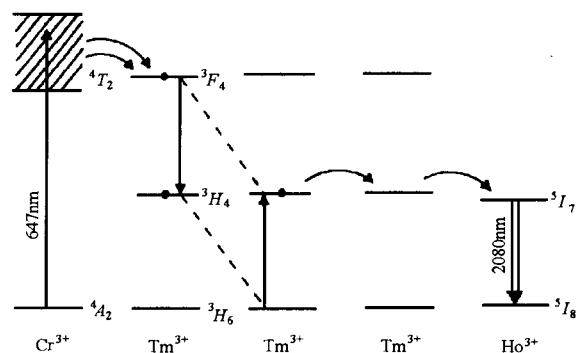


图 4 Cr³⁺: Tm³⁺: Ho³⁺: YSGG 晶体泵浦示意图

Fig. 4 Pump scheme of the Cr³⁺: Tm³⁺: Ho³⁺: YSGG crystal

Cr^{3+} : Tm^{3+} : Ho^{3+} : YAG、YSGG 晶体材料获得了有效连续 2.086 μm 激光。 Cr^{3+} 离子将吸收的能量转移给 Tm^{3+} 离子, Tm^{3+} 离子间发生交叉弛豫(${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_4$, ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$), 而后将能量转移给 Ho^{3+} , 如图 4 所示。阈值输出功率为 25mW, 斜率效率为 13%^[28]。另外, 用 Ar^+ 激光器泵浦, 由 Cr^{3+} : Tm^{3+} : Ho^{3+} : YSGG 晶体可获得 1.924、2.010、2.086 μm 激光, 最高斜效率为 41%, 表明在该晶体中存在有效下转换^[29]。

4 结 语

YSGG 系列晶体具有可生长高浓度掺杂、尺寸大、光学质量高的优点, 它们化学性能稳定、硬度大, 转换效率高。在医学、环境研究、光通讯及遥感、军事等方面具有重要的应用价值。本文对 YSGG 系列晶体生长、物化性能、激光性能及发光机理进行了介绍, 为 YSGG 系列晶体和激光器的研究及应用提供参考。

参 考 文 献

- [1] Barndle C D, Barns R L. Crystal Stoichiometry and Growth of Rare-earth Garnets Containing Scandium [J]. *J. Cryst. Growth*, 1973, **20**(1-5):1.
- [2] Kuck S, Petermann K, Pohlmann U, et al. Near-infrared Emission of Cr^{4+} -doped Garnets: Lifetimes, Quantum Efficiencies, and Emission Cross Sections [J]. *Physical Review B*, 1995, **51**(24):17323.
- [3] John Gruber B, Marian Hills E, Michael Seltzer D, et al. Analysis of the Optical Spectra of the Trivalent Holmium in Yttrium Scandium Gallium Garnet [J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**(11):5253.
- [4] Zavartsev Yu D, Yakovlev A A. Surface Tension and Electrocapillary Phenomena of Yttrium Scandium Gallium Garnet Melts [J]. *J. Cryst. Growth*, 1994, **142**:129.
- [5] Molecular Technology GmbH. Er, Cr, Er or Cr, Nd Doped Yttrium Scandium Gallium Garnet (YSGG) Crystals [EB/OL]. http://www.mt-berlin.com/frames_cryst/crystals_frameset1.htm, 1997/2004-11-10.
- [6] Dinerman B J, Moulton P F. CW Laser Operation from Er:YAG, Er:GGG, Er:YSGG and Er:BYF [C]. Conference Proceedings of IEEE LEOS'92 Annual Meeting, 1992:310.
- [7] Chen Xuesheng, John Collins, DiBartolo B, et al. Up-conversion Luminescence of Er^{3+} -doped Yttrium, Scandium, Gallium Garnet at Different Temperatures [J]. *Journal of Luminescence*, 1997, **72-74**:168.
- [8] Chen Xuesheng, Timothy Nguyen, Qui Luu, et al. Green and Red Luminescence of YSGG:Er under Up-conversion and Regular Excitation at Different Er Concentrations [J]. *Journal of Luminescence*, 1999, **83-84**:471.
- [9] Zharikov E V, Il'ichev N, Kalitin S P, et al. Spectral, Luminescence, and Lasing Properties of a Yttrium Scandium Gallium Garnet Crystal Activated with Chromium and Erbium [J]. *Sov. J. Quantum Electron*, 1986, **16**(5):635.
- [10] Peter Moulton F, Jeffrey Manni G, Glen Rines A. Spectroscopic and Laser Characteristics of Er, Cr:YSGG [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, **24**(6):960.
- [11] Nogin M A, Caulfield H J, Venkateswarlu P, et al. Study of Migration in Cr:Er:YSGG Using an Up-conversion Light Induced Grating Technique [J]. *Optical Materials*, 1996, **5**:97.
- [12] Nogin M A, Caulfield H J, Venkateswarlu P, et al. Transient Light Induced Grating Study of Excitation Diffusion in $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ Laser Crystals [J]. *Optical Materials*, 1996, **6**:245.
- [13] Lukashov A. Tunable Operation of an YSGG:Cr:Er Laser [C]. EQEC94, 1994:256.
- [14] Vodopyanov K L, Voevodin V G. 2.8 μm Laser Pumped Type I and Type II Travelling-wave Optical Parametric Generator in GaSe [J]. *Optical Communication*, 1995, **114**:333.
- [15] Vodopyanov K L, Chazapis V. Extra-wide Tuning Range Optical Parametric Generator [J]. *Optical Communication*, 1997, **135**:98.
- [16] Vodopyanov K L. Megawatt Peak Power 8-13 μm CdSe Optical Parametric Generator Pumped at 2.8 μm [J]. *Optical Communication*, 1998, **150**:210.
- [17] Kalisky Y, Ben-Amar Baranga A, Shimony Y, et al. Cr^{4+} Doped Garnets: Their Properties as Non-linear Absorbers [J]. *Optical Materials*, 1996, **6**:275.
- [18] Kalisky Y, Ben-Amar Baranga A, Shimony Y, et al. Cr^{4+} Doped Garnets: Novel Laser Materials and Non-linear Saturable Absorbers [J]. *Optical Materials*, 1997, **8**:129.
- [19] Lipavsky B, Kalisky Y, Burshtein Z, et al. Some Optical Properties of Cr^{4+} -doped Crystals [J]. *Optical Materials*, 1999, **13**:117.
- [20] Tsvetkov V B, Klimov I V, Shcherbakov I A, et al. Cr^{4+} : YSGG-crystal as a Q-switched for Single-frequency Nd Laser [C]. CLEO, 1994/Europe, 1994:193.

- Nucl. Instru. and Meth.*, 1987, **B27**: 417-421.
- [2] Raneri V, Rimini E. Functional Voids by Gas Ion Implantations in Semiconductor Processing [J]. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 2002, **719**: 205-210.
- [3] Godey S, Sauvage T, Ntsoenzok E, et al. Cavities and Dislocations Induced in Silicon by MeV He Implantation [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**: 2158-2161.
- [4] Mayers S M, Follstaedt D M. Interaction of Copper with Cavities in Silicon [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**: 1337.
- [5] Raneri V, Falica P G, Percolla G, et al. Gettering of Metals by Voids in Silicon [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**: 3727-3731.
- [6] Williams J S, Ridgway M C, Conway M J, et al. Interaction of Defects and Metals with Nanocavities in Silicon [J]. *Nucl. Instru. and Meth.*, 2001, **B178**: 33-40.
- [7] Raneri V, Camoisano S U. Secondary Defect Dissolution by Voids in Silicon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(12): 1783-1785.
- [8] Raneri V, Saggio M, Rimini E, et al. Voids in Silicon by He Implantation: From Basic to Applications [J]. *J. Mater. Res.*, 2000, **15**: 1449-1455.
- [9] Cerofolini G F, Corni F, Frabboni S, et al. Hydrogen and Helium Bubbles in Silicon [J]. *Mater. Sci. and Eng.*, 2000, **27**: 1-52.
- [10] Raineri V, Saggio M, Rimini E. Voids in Silicon by He Implantation: from Basic to Applications [J]. *Mater. Res.*, 2000, **15**: 1449-1477.
- [11] Ziegler J P, Biersack J P, Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids [M]. Pergamon, New York, 1985.
- [12] Eaglesham D J, Stolk P A, Gossmann H J, et al. Implantation and Transient B Diffusion in Si: The source of the Interstitials [J]. *Nucl. Instru. Meth.*, 1995, **B106**: 191-196.
- [13] Schroeder H, Fichtner P F P. On the Coarsening Mechanisms of Helium Bubbles -ostwald Ripening Versus Migration and Coalescence [J]. *J. Nucl. Mater.*, 1991, **179-181**: 1007-1010.
- [14] Schroeder H, fichtner P F P, Trinkaus H. Fundamental Aspects of Inert Gases in Solids [M]. In: Donnelly S E, Evans J H ed. New York: Plenum Press, 1991, **279**: 289.
- [15] Godey S, Ntsoenzok E, Sauvage T, et al. Helium Desorption from Cavities Induced by High Energy ^3He and ^4He Implantation in Silicon [J]. *Mater. Sci. & Eng.*, 2000, **B73**: 54-59.

(上接第 713 页)

- [21] Diening A, Fornasiero L, Kueck S, et al. Diode-pumped Continuous Wave Laser Oscillation of Yb, Ho:YSGG at 1.2 μm [C]. CLEO,1998/Europe, 1998:129.
- [22] Zavartsev Yu D, Osiko V V, Studenikin P A, et al. The $\text{Cr}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{Ln}^{3+}:\text{YSGG}$ Crystals as Solid-state Laser Materials[C]. CLEO,1994/Europe,1994:193.
- [23] Zagumennyi A I, Zavartsev Yu D, Umyskov A F, et al. A Water Passively Q-switched Cr:Yb:Ho:YSGG Laser[C]. CLEO,1998/Europe,1998: 72.
- [24] 徐学珍. 稀土在激光晶体中的应用及发展前景[EB/OL]. http://rev.cn/cn/xtzg/xtzg_show.php?id=75,2003-11-03/2004-11-10.
- [25] Zharikov E V, Kalitin S P, Laptsev V V, et al. Chromium-doped Scandium Gallium Garnet Crystals as Active Media of Lasers Utilizing Ho^{3+} and Tm^{3+} Infrared Transitions [J]. *Sov. J. Quantum Electron*, 1986, **16**(1):145.
- [26] Alpat'ev A N, Denisov A L, Zharikov E V, et al. Crystal YSGG: $\text{Cr}^{3+}:\text{Tm}^{3+}$ Laser Emitting in the 2 μm Range [J]. *Sov. J. Quantum Electron*, 1990, **20**(7):780.
- [27] Zubenko D A, Noginov M A, Semenov S G, et al. Interionic Interactions in YSGG: Cr:Tm and YSGG: Cr:Tm:Ho Laser Crystals [J]. *Sov. J. Quantum Electron*, 1992, **22**(2):133.
- [28] Duczynski E W, Huber G, Ostroumov V G, et al. CW Double Cross Pumping of the $^5I_7-^5I_8$ Laser Transition in Ho^{3+} -doped Garnets [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**(23):1562.
- [29] Huber G, Duczynski E W, Klaus Petermann. Laser Pumping of Ho-, Tm-, Er-doped Garnet Lasers at Room Temperature [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, **24**(6):920.