

掺 Yb³⁺ 激光晶体的研究进展

杨培志¹, 邓佩珍², 殷之文¹

(1. 中国科学院无机功能材料开放实验室, 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050;

2. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 本文简要介绍了掺 Yb³⁺ 激光晶体的发展历史; 从 Yb³⁺ 离子的能级结构出发, 阐述了掺 Yb³⁺ 激光材料的特点, 介绍了几种掺 Yb³⁺ 激光晶体的光谱特性, 简述了近年来掺 Yb³⁺ 激光晶体激光性能的研究进展; 对掺 Yb³⁺ 激光晶体未来的发展做了展望。

关键词: 掺 Yb³⁺ 激光晶体; 光谱特性; 激光性能; 研究进展

中图分类号: O799

文献标识码: A

文章编号: 1000-985X(2000)02-0196-09

Research Progress on Yb³⁺-doped Crystal

YANG Pei-zhi¹, DENG Pei-zhen², YIN Zhi-wen¹

(1. Laboratory of Functional Inorganic Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences Shanghai 200050, China;

2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(Received 15 February 2000, accepted 20 March 2000)

Abstract: Recently, interests in Yb³⁺ doped crystals have been increased due to their advantages over Nd³⁺ and other rare earth doped laser crystals. We briefly present a historical overview of Yb³⁺ doped crystals beginning with the work in the early 1965's and extending to recent work on their spectroscopic and laser performances. The special properties of Yb³⁺ doped laser media were summarized. Several kinds of Yb³⁺ doped crystals which were widely investigated presently were compared, and the future of Yb³⁺ doped crystals were discussed.

Key word: Yb³⁺ doped crystals; spectroscopy properties; laser performances; progress

1 引言

1965年贝尔电话实验室的 L. F. Johnson 等人^[1]用闪光灯泵浦 Yb:YAG 晶体, 当时由于高的阈值(325J)和低的转换效率未引起人们的重视; 1967年, G. Burs 等人^[2]报道了掺 Yb³⁺ 离子的 LiNbO₃ 和 LiTaO₃ 晶体的光谱特性; 1971年, A. R. Reinberg 等人^[3]用 GaAs:Si LED 泵浦 Yb:YAG 晶体, 在 77K 温度下, 获得了 1.029 μ m 的脉冲激光输出, 峰值功率达 0.7W, 从而揭开了掺 Yb³⁺ 激光晶体的研究序幕。1976年, G. A. Bogomolova 等人^[4]将 Yb³⁺ 作为激活离子掺入到 YAG 和其它的石榴石结构晶体中。但在这之后的相当长一段时间里, 由于缺少更为有效的泵浦源, 掺 Yb³⁺ 激光晶体仅能在低温下实现激光运行, 因此, 对其研究仅限于一些光谱特性的研究, 而对激光性能

收稿日期: 2000-02-15; 修订日期: 2000-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(69578026); 国家高技术 863-416-2 项目资助

作者简介: 杨培志, (1966-), 男(白族), 云南大理人, 中国科学院上海硅酸盐研究所博士, 从事闪烁晶体的生长、缺陷和辐照性能的研究。

的研究, 则几乎处于停滞状态。进入 90 年代, 随着高强的窄带泵浦源 InGaAs LD (输出波长为 0.87 ~ 1.1 μm) 的发展^[5] 和成本的降低, 掺 Yb³⁺ 激光晶体的研究风起云涌。尤其是随着激光二极管作为惯性约束核聚变泵浦源的出现^[6] 和掺 Yb³⁺ 激光材料在通信、军事上的应用潜力, 更将掺 Yb³⁺ 激光晶体的研究推向了高潮。许多国际著名的研究机构, 如美国的利夫莫尔国家实验室 (LLNL), 林肯实验室 (MIT), 休斯研究实验室; 德国的斯图加特大学, 汉堡大学; 英国的南安普敦大学, 曼彻斯特大学; 瑞士联邦理工学院; 日本的大坂大学, 福田大学等相继开展了掺 Yb³⁺ 激光晶体的研究, 将其视为发展高效、高功率固体激光器的一个主要途径。利夫莫尔国家实验室还希望将其用作惯性约束核聚变点火装置中的增益介质。在国内, 中科院上海光学精密机械研究所, 山东大学等单位也相继开展了掺 Yb³⁺ 激光材料的研究。目前, 对其光谱和激光性能进行了较全面研究的当数 Yb:YAG 晶体、Yb³⁺ 掺杂磷灰石结构晶体和一些具有潜在自倍频效应的晶体。Yb:YAG 晶体由于具有优良的光学、热力学和机械性能, 化学稳定性好, 可进行较高浓度的掺杂等特点而成为掺 Yb³⁺ 激光材料中的佼佼者。在 Yb:FAP 和 Yb:S-FAP 晶体中, 由于 FAP 和 S-FAP 基质能给 Yb³⁺ 离子提供目前其它基质无可比拟的晶场环境而产生最大的晶场分裂能, 优异的光谱性能使它具有阈值低, 增益大, 效率高和成本低等特点。因此, 倍受人们青睐。Yb:BaCaBO₃F 晶体由于具有潜在的自倍频效应而受到人们的关注。

本文简述了近年来掺 Yb³⁺ 激光晶体的研究进展, 结合掺 Yb³⁺ 激光晶体的特性, 对掺 Yb³⁺ 激光晶体的未来作了展望。

2 掺 Yb³⁺ 激光晶体的特点

与其它的稀土激活离子相比, Yb³⁺ 离子具有如下特点^[7-8]:

(1) Yb³⁺ 为能级结构最简单的激活离子, 电子构型为 [Xe] 4f¹³, 仅有一个基态²F_{7/2} 和一个激发态²F_{5/2}, 两者的能量间隔约为 10000 cm⁻¹, 在晶场作用下, 能级产生斯塔克分裂, 形成准三能级的激光运行机制;

(2) Yb³⁺ 吸收带在 0.9 ~ 1.1 μm 波长范围, 能与 InGaAs LD 泵浦源有效耦合, 且吸收线宽 (FWHM) 宽, 无需严格的温度控制即可获得相位匹配的 LD 泵浦源的泵浦波长;

(3) 量子缺陷低, 泵浦波长与激光输出波长非常接近, 这将导致大的本征激光斜率效率, 理论上量子效率高达 90% 左右;

(4) 由于泵浦能级靠近激光上能级, 无辐射弛豫引起的材料中的热负荷低, 仅为掺 Nd³⁺ 同种激光材料的三分之一;

(5) 不存在激发态吸收和上转换, 光转换效率高;

(6) 荧光寿命长, 为掺 Nd³⁺ 同种激光材料的三倍多, 长的荧光寿命有利于储能;

(7) 在 Yb³⁺ 掺杂浓度较高的情况下 (Yb:YAG 晶体中 Y³⁺ 的原子分数可高达 10% 以上), 多数晶体不出现浓度猝灭现象。

从上述的特点可以看出: LD 泵浦的 Yb³⁺ 激光器在某些应用上将明显优于 Nd³⁺ 激光器。在掺 Yb³⁺ 激光材料中, 由于可实现 Yb³⁺ 离子的高浓度掺杂, 因此增益介质可做成微片, 这是一些传统的稀土离子所做不到的。这对实现 LD 泵浦的固体激光器的集成化、小型化和结构紧凑将具有十分重要的意义。

3 掺 Yb³⁺ 激光晶体的光谱特性

激活离子在晶体基质中的光谱特性能预测晶体的激光性能, 光谱参数是指导激光器器件设

计的基本参数之一。激光晶体的光谱特性通常用下列参数衡量:吸收截面、吸收线宽、发射截面、发射线宽、荧光寿命和荧光量子效率等。在掺 Yb^{3+} 激光晶体的光谱特性研究中,由于 Yb^{3+} 离子简单的能级结构特征,人们通常采用倒易法(Reciprocity Method)^[9] 计算 Yb^{3+} 离子的受激发射截面(σ_{em}),用 F-L 公式(Fuchtbauer-Ladenburg)计算辐射寿命(τ_{em}),并与实测的荧光寿命进行比较以确定其准确性。

表 1 为几种广泛研究的掺 Yb^{3+} 激光晶体的光谱性能参数。

Table 1 The spectroscopic performances of several Yb^{3+} doped crystals^[10-13]

Crystal	Parameters									
	λ_{abs} (nm)	$\Delta\lambda_{abs}$ (nm)	σ_{abs} (10^{-20}cm^2)	λ_{ext} (nm)	$\Delta\lambda_{ext}$ (nm)	σ_{em} (10^{-20}cm^2)	τ_{em} (ms)	β_{min}	I_{sat} (kW/cm^2)	I_{min} (kW/cm^2)
Yb:YAG	940	19	0.8	1030	9	2.0	1.3	0.055	28	1.53
Yb:FAP	905	2.4	10.0	1043	4.0	5.9	1.10	0.047	2.0	0.09
Yb:S-FAP	899	3.7	8.6	1047	4.1	7.3	1.26	0.043	2.0	0.09
Yb:BCBF	912	19	1.1	1034	24	1.3	1.17	0.097	17	1.64

从表 1 可见:4 种典型的掺 Yb^{3+} 激光晶体的光谱性能参数各有千秋。 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体具有长的上能级荧光寿命以及大的吸收线宽和发射线宽,这种特点主要由 Yb^{3+} 的 $f \rightarrow f$ 电子跃迁特征所决定, $4f^{13}$ 电子结构具有大的自旋-轨道耦合系数而存在较强的声子耦合。因此, $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体适于 LD 泵浦的固体激光器,并可在一定波长范围内调谐和实现飞秒激光运行。Peterson P 等人^[14] 建立了 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体的调谐模型。大的最低泵浦功率密度和饱和泵浦强度说明 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体的阈值高; $\text{Yb}:\text{FAP}$ 、 $\text{Yb}:\text{S-FAP}$ 晶体则具有小的吸收线宽和发射线宽;小的最低泵浦功率密度和饱和泵浦强度说明掺 Yb^{3+} 磷灰石结构晶体的阈值低; $\text{Yb}:\text{BCBF}$ 晶体的光谱特性参数与 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体接近,发射线宽较 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体宽。

4 掺 Yb^{3+} 激光晶体的研究现状和进展

4.1 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体

图 1 为 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体的能级结构^[13],在晶场作用下,基态能级和激发态能级产生斯塔克分裂,分别分裂为 4 个和 3 个子能级。 Yb^{3+} 离子在 913nm, 940nm 和 968nm 波长存在强的吸收峰,其中 940nm 和 968nm 常作为泵浦波长。 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体激光性能的主要研究进展如表 2 所示。

Table 2 The progress on laser performance of $\text{Yb}:\text{YAG}$

Year	Institute	Crystal size and doping level(atom fraction %)	Pump source	Slope efficiency	Output power ($\lambda=1.034\mu\text{m}$)	Ref.
1971	Texas Instrument Incorporation	$2 \times 2 \times 25\text{mm}$ (10%)	GaAs:Si(LED)	5%	0.7W (77K)	[4]
1991	Lincoln Lab.	1.65mm thick (6.5%)	Ti:Sapphire InGaAs(968nm)	56% 31%	46mW 23mW	[16]
1994	Lincoln Lab.	0.4mm thick (25%)	InGaAs	47%	210mW	[17]
1994	Universitat Stuttgart	0.7mm thick (9%)	InGaAs	68%	4.4W	[7]

续表

Year	Institute	Crystal size and doping level (Atom fraction, %)	Pump source	Slope efficiency	Output power ($\lambda = 1.03\mu\text{m}$)	Ref.
1995	Hughes Research Lab.	0.8 × 4.5 × 2.6mm (15%)	InGaAs	27%	50mJ/pulse 15Hz	[18]
1995	Universitat Stuttgart	0.3–0.4mm thick (8%)	InGaAs ID fiber coupled	66.5%	9.5W at 203K (1.018–1.05 μm)	[19]
1996	Hughes Research Lab.	$\phi 2 \times 20\text{mm}$ (1%)	InGaAs LD array (941nm)	30%	150W, average: 69W	[20]
1996	Fukui University	1.1mm thick (10%)	Ti:Sapphire (913nm)	32%	41.6mW (9.4ns)	[21]
1998	Lawrence Livermore National Lab. (LLNL)	$\phi 2 \times 50\text{mm}$ (0.5%)	InGaAs LD stack packaged	27%	434W	[22]
1998	Hughes Research Lab.	$\phi 3 \times 30\text{mm}$ (1.5%)	InGaAs LD array	50%	950W	[23]
1999	LLNL	$\phi 2 \times 50\text{mm}$ ($6 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$)	InGaAs LD array	12%	220W (CW) 195W (5kHz) Q-switched	[24]

从表 2 可见: 由于 Yb:YAG 晶体可实现高浓度掺杂而不产生浓度猝灭, 因此, 在一些泵浦方式中通常采用晶体微片作为增益介质, 这将有利于实现全固态固体激光器的小型化和集成化。针对这一特点, 我们生长了高掺杂浓度的 Yb:YAG 晶体, 并采用钛宝石激光器和 InGaAs 激光二极管作为泵浦源, 在室温下分别获得了 1.03 μm 和 1.05 μm 波长的高效激光输出^[25~27]。

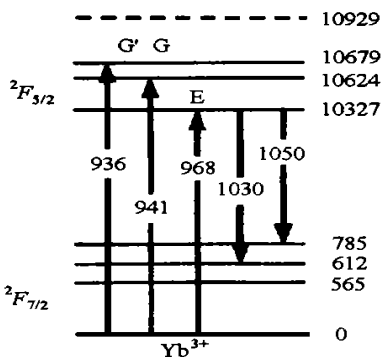


Fig. 1 The energy level diagram of Yb³⁺ in YAG

4.2 掺 Yb³⁺ 磷灰石结构晶体

掺 Yb³⁺ 磷灰石结构晶体主要包括 Yb:S-FAP 和 Yb:FAP, 其最大特点是光谱性能优异, 具有阈值低、增益大、效率高和成本低等优点。缺点是这类晶体的热力学性能和机械性能均不好、生长过程中由于组分严重挥发而难以获得高质量大尺寸单晶。Chai B H 等人^[28] 和 Orth C 等人^[29] 采用改进的提拉法工艺获得了较大尺寸的高质量单晶。Yb:FAP 和 Yb:S-FAP 激光性能研究的主要进展如表 3 所示。对 Yb:FAP 和 Yb:S-FAP 晶体, 由于吸收系数较小, 通常采用端面泵浦, 泵浦源既可用钛宝石激光器, 也可

用 InGaAs 激光二极管(900nm)。最近, 美国利夫莫尔国家实验的 Bayramian A J 等人^[30] 又生长了 Yb:SB-FAP 晶体, 即 Yb_{15-x}Ba_x(PO₄)₃F, 其中 x=0.25, 0.5, 1, 2, 并研究了它们的光谱和激光性能。Yb:SB-FAP 的最大特点是吸收线宽和发射线宽均较 Yb:FAP 和 Yb:S-FAP 宽, 且随着 Ba²⁺ 浓度的增加而增加。

Table 3 The progress on laser performance of Yb³⁺:FAP and Yb³⁺:S-FAP

year	Institute	Crystal specimen	Pump source	Slope efficiency	Output power	Ref.
1993	LLNL	Yb ³⁺ :FAP	Ti:Sapphire(905nm)	60.5%	214mW	[30]
1994	LLNL	Yb ³⁺ :FAP	Ti:Sapphire(905nm)	79%	900mW	[31]
1994	LLNL	Yb ³⁺ :S-VAP	Ti:Sapphire(905nm)	67.1%	440mW	[32]
		Yb ³⁺ :C ₅ S ₂ -FAP		55.2%	420mW	
1994	LLNL	Yb ³⁺ :S-FAP	Ti:Sapphire(905nm)	71.5%	505mW	[33]
1996	LLNL	Yb ³⁺ :S-FAP	InGaAs LD array	43%	13W 70Hz(50 μ s)	[34]
1996	LLNL	Yb ³⁺ :S-FAP	InGaAs LD array		47mJ/ 27ns 2Hz, 50W	[35]
1996	University of Manchester	Yb ³⁺ :S-FAP	InGaAs(900nm)	78%	75mW	[36]
1997	Tianjin University (China)	Yb ³⁺ :S-FAP	Ti:Sapphire(905nm)		50mW pulse-width 35.4ps	[37]
1998	University of Manchester	Yb ³⁺ :SFAP	InGaAs(900nm)	53%	150mW 125 μ J/pulse	[38]
1998	LLNL	Yb ³⁺ :S-FAP	InGaAs LD array	10%	100J at 1-10ns, 10Hz	[29]

Table 4 Survey for laser and spectroscopic characteristics of rare-earth-doped gain media^[6]

Rare earth ion	Storage lifetime (ms)	Emission cross section (10 ⁻²⁰ cm ²)	Extraction efficiency (%)	Laser wavelength (nm)	Diode material		
Nd	0.2-1.3	o	> 1.3 *	< 70	×	~ 1050 *	AlGaAs *
Yb	1-5	o	0.1-6 *	< 95	*	~ 1030 *	InGaAs *
Er	5-15	*	0.1-0.5	< 90	*	~ 1630	o InGaAsP
Tm	5-15	*	0.1-0.5	< 90	*	~ 1950	o InGaAsP
Ho	5-15	*	0.3-1.8 *	< 75	×	~ 2100	o InGaAsP

*: Acceptable; o: Marginal; ×: Not acceptable

值得注意的是,由于 Yb³⁺:S-FAP 跟二极管的输出特性匹配很好,类似 Nd 玻璃与闪光灯泵浦源相位匹配的情况。Yb³⁺:S-FAP 在 900nm 附近具有吸收线宽约为 4nm 的吸收带,可用 InGaAs 二极管阵列作为泵浦源。与其它掺 Yb³⁺ 激光介质不同的是:Yb³⁺:S-FAP 晶体的吸收和发射截面都比较大,这使 Yb 粒子数反转容易做到大于 50%。在 1.047 μ m 处的增益截面为 7.3 \times 10⁻²⁰ cm²,确保能有效地提取能量,其 1.26ms 的荧光寿命为有效地储存泵浦能量创造了条件。因此,随着 LD 作为惯性聚变能择优泵浦源的出现, Yb³⁺:S-FAP 就成为了惯性约束核聚变(ICF)理想增益介质的候选材料^[4]。表 4 概述了几种稀土激活离子的光谱和激光特性^[4]。总体上看,仅 Yb³⁺ 激活离子能满足惯性约束核聚变的所有性能要求。因此,掺 Yb³⁺ 激光晶体在未来的 ICF 中将具有很大的应用潜力。

4.3 掺 Yb³⁺ 激光自倍频晶体

在掺 Yb³⁺ 激光晶体中,由于通过倍频可以获得蓝绿光,因此一些具有潜在自倍频效应的晶体受到了人们的广泛重视。目前,此类晶体主要有 Yb³⁺:BaCaBO₃F^[13]、Yb³⁺:YAl₃(BO₃)₄^[40] 和 Yb³⁺:YCa₄O(BO₃)₃^[41]。Yb³⁺:BaCaBO₃F 晶体属于非对称中心的六方晶系,其光谱特性参数如表 1 所示。用钇宝石激光器泵浦 Yb³⁺:BaCaBO₃F 晶体,获得了 140mW 的激光输出,斜效率为 38%,

阈值功率约为 100mW。Yb :BaCaBO₃F 晶体的相位匹配角 $\theta_m(I) = 37^\circ$, 非线性系数 $d_{\text{eff}} = 0.26\text{pm/V}$, 比 KDP(0.39pm/V) 稍小。

Yb :YAB 即 Yb :YA₃(BO₃)₄ 晶体, 为三角晶系, 负单轴晶体, 空间群为 R32, 也是一种潜在的激光自倍频晶体, 其主吸收峰位于 975nm, 线宽(FWHM)为 25nm; 荧光峰有 2 个, 一个位于 1.03 μm , 另一个位于 1.04 μm , 主荧光峰(1.03 μm)的荧光寿命为 1.40ms^[40], YAB 晶体的非线性光学系数在四硼酸双盐中是最大的, 其非线性光学系数约为 KDP 晶体的 3.9 倍, 相匹配角 $\theta_m(I) = 34^\circ$ 。

Yb :YCOB, 即 Yb :YCa₄O(BO₃)₃, 具有荧光寿命长(为 Yb :YAG 晶体的 2.4 倍); 吸收带宽(850 ~ 1050nm), 中心波长位于 976.4nm; 发射谱带宽, 波长范围为 940 ~ 1100nm, 有五个明显的发射峰, 有较大应用价值的强峰中心波长分别为 1032.4nm 和 1084.7nm; 非线性系数大, 损伤阈值高, 能实现自倍频运转并具有一定的调谐波长范围(1020 ~ 1090nm)等特点, 是一种新的激光倍频和自倍频晶体。目前, 用 LD 泵浦 Yb :YCOB 晶体, 获得了 446.4mW 的最大激光输出功率, 斜率效率高达 73%^[42], 并发现有自倍频绿光。

4.4 掺 Yb³⁺ 超快激光晶体

在掺 Yb³⁺ 激光晶体中, 由于 Yb³⁺ 的 4f¹³ 电子具有大的自旋-轨道耦合系数而导致较强的声子耦合, 因此具有宽的发射带和发射线宽, 可支持飞秒锁模激光输出。目前, 一些掺 Yb³⁺ 激光材料已实现飞秒激光输出。瑞士联邦理工学院的 Hönninger C 等人^[43~44] 用钛宝石激光器泵浦 Yb :YAG 晶体, 采用主动锁模技术获得了脉宽为 80ps 的超快激光输出; 用 A-FPSA (antiresonant Fabry-Perot saturable absorber) 被动锁模技术, 在 1.03 μm 和 1.05 μm 波长处获得了脉宽为 540fs 的飞秒激光输出, 通过调整可饱和吸收体的厚度可获得不同的激光输出波长; Aus der Au J 等人^[45] 用 InGaAs LD 泵浦 Yb :YAG 晶体, 采用被动锁模技术。在 1.03 μm 波长处获得脉宽为 1.0ps 的激光输出, 峰值功率高达 74kW。Yb :FAP 晶体和 Yb :S-FAP 晶体的荧光峰宽分别为 4.1nm 和 4.0nm, 理论上可支持约 300fs 的锁模激光。天津大学的龙晓等人^[37] 用钛宝石激光器泵浦 Yb :S-FAP 晶体, 采用主动锁模技术获得了脉宽为 35.4ps 的超快激光输出。可以预见: 随着锁模技术的提高和新的掺 Yb³⁺ 超快激光晶体的出现, 掺 Yb³⁺ 激光晶体在未来的飞秒激光领域将占有举足轻重的作用。

4.5 其它的掺 Yb³⁺ 激光晶体

人们在对 Yb :YAG 晶体、掺 Yb³⁺ 磷灰石结构晶体和掺 Yb³⁺ 激光自倍频晶体进行深入研究的同时, 一些新的掺 Yb³⁺ 激光晶体也开始崭露头角, 其中, 比较重要的有 Yb :KY(WO₄)₂^[46], Yb :KGd(WO₄)₂^[47], Yb :Lu₃Al₅O₁₂^[48], Yb :Ca₄Gd₃B₃O₁₀^[49] 等。

Yb :KY(WO₄)₂ (Yb :KYW) 和 Yb :KGd(WO₄)₂ (Yb :KGW) 晶体为单斜晶系, 空间群为 C2/c, 晶胞参数如下, KGW: $a = 0.8095\text{nm}$, $b = 1.043\text{nm}$, $c = 0.7588\text{nm}$, $\beta = 94^\circ$; KYW: $a = 0.805\text{nm}$, $b = 1.035\text{nm}$, $c = 0.754\text{nm}$, $\beta = 94^\circ$ 。Yb³⁺ 取代具有 C₂ 对称的 Y³⁺ 格位或 Gd³⁺ 格位。在 E // a 的偏振方向, 当掺杂浓度为 5at. % 时, 981.2nm 处的峰值吸收系数高达 40cm⁻¹, 两种晶体的峰值吸收截面分别为 $1.33 \times 10^{-19}\text{cm}^2$ 和 $1.2 \times 10^{-19}\text{cm}^2$ 。用钛宝石激光器和激光二极管泵浦在室温下获得脉冲、CW 激光输出^{[47][50~51]}, 斜率效率分别为 78% 和 86.9%。由于 Yb :KYW 和 Yb :KGW 具有大的吸收系数、低的量子缺陷、高的吸收和发射截面, 因而对调谐的微片激光器的发展将具有重要的意义。

目前研究的一些掺 Yb³⁺ 晶体的光谱和激光特性参数如图 2 所示。

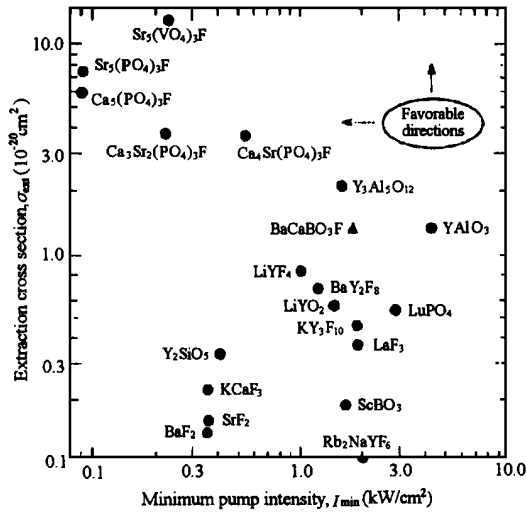


Fig. 2 A log plot of the emission cross section σ_{em} versus minimum pump intensity I_{min} for the selected extraction wavelength of numerous Yb-doped crystal

从图 2^[13] 可以看出: 就目前掺 Yb^{3+} 晶体的研究现状看, 尽管 Yb^{3+} 的能级结构十分简单, 但由于基质的不同导致晶场的不同和 Yb^{3+} 所处格位的不同, 从而使 Yb^{3+} 在不同的基质晶体中的光谱和激光性能有着很大的差异。磷灰石结构的晶体具有优异的光谱特性, 其中 $Yb: Sr_{15}(VO_4)_3F$ 具有最佳的光谱特性。但因其热力学性能和机械性能不够理想, 所以其应用受到一定限制。综合考虑, $Yb: YAG$ 晶体将具有广阔的应用前景。

5 掺 Yb^{3+} 激光晶体未来的发展方向

纵观掺 Yb^{3+} 激光晶体的研究现状和进展, 我们认为在未来一段时间里, 将重点向以下几个方向发展:

(1) 对 $Yb: YAG$ 晶体, 通过优化腔结构和腔参数, 实现千瓦级的 LD 泵浦的固体激光器; 通过较高浓度的掺杂, 获得 LD 泵浦的高效、高功率微片固体激光器。

(2) 探索复合石榴石结构的新晶体, 以进一步改善 $Yb: YAG$ 晶体的光谱性能, 提高其荧光寿命和增大发射截面。

(3) 探索新的生长工艺, 获得高质量、大尺寸的掺 Yb^{3+} 磷灰石结构晶体以满足惯性约束核聚变用增益介质的要求。

(4) 在现有的激光基质晶体中, 通过双掺 (Yb^{3+} 、 Cr^{4+}) 获得自调 Q 晶体。

(5) 探索新的掺 Yb^{3+} 自倍频晶体。

(6) 探索新的掺 Yb^{3+} 超快激光晶体。

参 考 文 献

- 1 Johnson L F, Geusic J E & Van Uitert L G. Coherent Oscillations from Tm^{3+} , Ho^{3+} , Yb^{3+} and Er^{3+} Ions in YAG. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, 7(5): 127
- 2 Bums G. Optical properties of Yb^{3+} in $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$. *Phys. Rev.*, 1968, 167(2): 314
- 3 Reinberg A R, Riseberg L A, Brown RM, et al. GaAs:Si LED Pumped Yb-doped YAG Laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, 19(1): 11

- 4 Bogomolova G A, Vylegzhanin D N, Kaminskii A A. Spectra and Lasing Investigations of Garnets with Yb³⁺ Ions. *Sov. Phys. JETP*, 1976 **42**: 440
- 5 Bour D P, Gilbert D B, Fabian K B. Low Degradation Rate in Strained InGaAs/AlGaAs Single Quantum Well Laser. *IEEE Photo Technol. Lett.*, 1990, **2**: 173
- 6 Payne S A, Powell H T & Krupke W F. Can Solid-state Laser Technology Serve Usefully Beyond Fusion Ignition Facilities? *SPIE*, 1997, **2633**: 256
- 7 Fan T Y. Heat Generation in Nd:YAG and Yb:YAG. *IEEE J. Quantum Electron*, 1993, **29**(6): 1457
- 8 Giesen A, Hugel H, Voss A, et al. Scalable Concept for Diode-pumped High-power Solid State Lasers. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**: 365
- 9 Deloach L D, Payne S A, Chase L L, et al. Evaluation of Absorption and Emission Properties of Yb³⁺ Doped Crystal for Laser Applications. *IEEE J. Quantum Electron*, 1993, **29**(4): 1179
- 10 Weber M J, Varitimos T E & Matsinger B H. Optical Properties of Yb³⁺ and Nd³⁺-Yb³⁺ Energy Transfer in YAlO₃. *Phys. Rev.*, *B*, 1973, **8**(7): 47
- 11 Gorobets B S. On the Luminescence of Fluorapatite Activated by Rare-earth Elements. *Opt. Spectrosc.*, 1971, **29**: 590
- 12 Deloach L D, Payne S A, Smith L K, et al. Laser and Spectroscopic Properties of Sr₃(PO₄)₃F:Yb. *J. Opt. Soc. Amer. B*, 1994, **11**: 269
- 13 Schaffers K I, Debach L D & Payne S A. Crystal Growth, Frequency Doubling and Infrared Laser Performance of Yb³⁺:BaCaB₃F₆. *IEEE J. Quantum Electron*, 1996, **32**(5): 741
- 14 Peterson P, Shama M P & Gavrielides A. Modeling of Yb:YAG Tuning Curves. *Opt. Comm.*, 1997, **134**: 155
- 15 Krupke W F & Chase L L. Ground-state Depleted Solid-state Lasers; Principles, Characteristics and Scaling. *Optical & Quantum Electronics*, 1990, **22**: S1
- 16 Lacovara P, Choi H K, Wang C A, et al. Room-temperature Diode-pumped Yb:YAG Laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(14): 1089
- 17 Fan T Y. Aperture Guiding in Quasi-three-level Lasers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(8): 554
- 18 Sumida D S & Fan T Y. Room-temperature 50mJ/Pulse Side-diode-pumped Yb:YAG Laser. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(23): 2384
- 19 Brauch U, Giesen A, Karszewski M, et al. Multiwatt Diode-pumped Yb:YAG Thin Disk Laser Continuously Tunable Between 1018 and 1013nm. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 713
- 20 Bruesselbach H & Sumida D S. 65-W-average-power Yb:YAG Laser. *Opt. Lett.*, **21**(7): 480
- 21 Taira T, Kobayashi T, Tullch W M, et al. Single Axial-mode Oscillation of a Coupled Cavity Yb:YAG Laser. *Advanced Solid-State Lasers*, 1996, **1**: 14-15
- 22 Bibeau C, Beach R J, Mitchell S C, et al. High-average-power 1- μ m Performance and Frequency Conversion of a Diode-end-pumped Yb:YAG Laser. *IEEE J. Quantum Electron*, 1998, **34**(10): 2010
- 23 Sumida D S, Bruesselbach H, Byren R W, et al. High-power Yb:YAG Rod Oscillators and Amplifiers. *Pro. SPIE*, 1997, **3265**: 100
- 24 Honea E C, Beach R J, Mitchell S C, et al. 183-W, M²=2.4 Yb:YAG Q-switched Laser. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3): 154
- 25 杨志培, 徐军, 邓佩珍, 等. Yb:YAG 的生长与激光性能. *人工晶体学报*, 1998, **27**(3): 229
- 26 杨培志, 邓佩珍, 徐军, 等. Yb:YAG 晶体的光谱和激光性能. *光学学报*, 1999, **19**(1): 132
- 27 YANG Peizhi, DENG Peizhen, ZHANG Yinghua et al. Ti:Sapphire Laser Pumped 20at. % Yb:YAG Thin Chip with CW Laser Output of 356mW at 1.053 μ m. *Chin. Phys. Lett.*, 2000, **17**(2): 104
- 28 Loutts G B & Chai B H T. The Growth of High Quality Crystals of FAP(Ca₅(PO₄)₃F) and Its Isomorphs. *SPIE*, 1994, **1863**: 31
- 29 Orth C, Beach R, Bibeau C, et al. Design Modeling of 100J-diode-pumped Solid-state Lasers for Project Mercury. *SPIE*, 1998, **3265**: 114
- 30 Scheps R, Myers J F & Payne S A. End-pumped Yb-doped Fluorapatite. *IEEE Photo Technol. Lett.*, 1993, **5**(11): 1285
- 31 Payne S A, Smith L K, Deloach L D, et al. Laser, Optical, and Thermomechanical Properties of Yb-doped Fluorapatite. *IEEE J. Quantum Electron*, 1994, **30**(1): 170
- 32 Payne S A, Deloach L D, Smith L K, et al. Yb-doped Apatite-structure Crystals: A New Class of Laser Materials. *J. Appl. Phys.*, 1994, **76**(1): 497
- 33 Debach L D, Payne S A, Smith L K, et al. Laser and Spectroscopic Properties of Sr₃(PO₄)₃F:Yb. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(2): 269

- 34 Marshall C D, Smith L K, Beach R, et al. Diode-pumped Yb-doped $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ Laser Performance. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(4): 650
- 35 Bibeau C, Bass I L, Beach R J, et al. Performance of a Q-switched Yb: $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ laser. *Advanced Solid-state Lasers*, 1996, **1**: 19
- 36 Dickinson M R, Gbster L A W, Hopps N W, et al. CW Diode-pumped Yb^{3+} :S-FAP Laser. *Opt. Commun.*, 1996 **132**: 275
- 37 龙晓 阮双琛, 董玉平. 锁模 Yb:S-FAP 激光器. *光子学报*, 1997, **26**(11): 1008
- 38 Gloster L A W, Comont P, Cox A M, et al. Diode-pumped Q-switched Yb:FAP Laser. *Opt. Comm.*, 1998 **146**: 177
- 39 Bayramian A J, Marshall C D, Schaffers K L et al. Characterization of Yb^{3+} : $\text{Sr}_{5-x}\text{Ba}_x(\text{PO}_4)_3\text{F}$ Crystals for Diode-pumped Lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(4): 665
- 40 田丽莉, 王继扬, 魏景谦, 等. Yb:YAB 晶体的生长及性质研究. *人工晶体学报*, 1998, **27**(3): 225
- 41 Chai B H et al. Lasing, Second Harmonic Conversion and Self-frequency Doubling of Yb:YCOB. OSA Topical Conference on Advanced Solid State Lasers, 1998, Postdeadline 11-2
- 42 孟宪林, 张怀金, 祝俐, 等. Yb:YCa₄O(BO₃)₃ 晶体及其激光器研究. *中国激光*, 1999, **26**(1): 108
- 43 Honninger C, Zhang G, Keller U, et al. Femtosecond Yb:YAG Laser Using Semiconductor Saturable Absorber. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(23): 2402
- 44 Honninger C, Kartner F X, Zhang G, et al. Femtosecond Mode Locked Yb:YAG Lasers. *Advanced Solid-state Lasers*, 1996, **1**: 16
- 45 Aus der Au J, Schaer S F, Paschotta R, et al. High-power Diode pumped Passively Mode-locked Yb:YAG Lasers. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(18): 1281
- 46 Metrat G, Boudeulle M, Muhlstein N, et al. Nucleation Morphology and Spectroscopic Properties of Yb^{3+} -doped KY(WO₄)₂ Crystals Grown by the Top Nucleated Floating Crystal Method. *J Crystal Growth*, 1999, **197**: 883
- 47 Kuleshov N V, Lagatsky A A, Shcherbitsky A G, et al. CW Laser Performance of Yb^{3+} and Er^{3+} , Yb^{3+} Doped Tungstate. *Appl. Phys., B*, 1997, **64**: 409
- 48 Sumida D S, Fan T Y & Grutcheson R. Spectroscopy and Diode-pumped Lasing of Yb^{3+} Doped $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Yb:LuAG). OSA Proceedings on Advanced Solid State Lasers, 1995, 2384
- 49 Auge F, Mougel F, Balembois F, et al. Diode-pumped Yb-doped $\text{Ca}_4\text{Gd}_2\text{B}_3\text{O}_{10}$ Laser. *Advanced Solid State Lasers Digest*, Boston, USA, Paper TuC4-1, 1999
- 50 Kuleshov N V, Lagatsky A A, Podlipensky A V, et al. Pulsed Laser Operation of Yb-doped KY(WO₄)₂ and KGa(WO₄)₂. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(17): 1317
- 51 Lagatsky A A, Kuleshov N V, Mikhailov V B, et al. Diode-pumped CW Lasing of Yb:KYW and Yb:KGW. *Opt. Commun.*, 1999, **165**: 71