

文章编号 1000 5013(2004) 03 0225 06

掺 Cr⁴⁺ 离子的激光材料与器件

王 加 贤

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 综合评述掺 Cr⁴⁺ 离子的激光材料, 特别是 Cr⁴⁺: YAG 和 Cr⁴⁺: Mg₂SiO₄ 晶体的重要特性及其在激光器件中的应用. Cr⁴⁺: YAG 和 Cr⁴⁺: Mg₂SiO₄ 这两种晶体有望成为近红外可调谐固体激光器的理想增益介质.
关键词 Cr⁴⁺: YAG, Cr⁴⁺: Mg₂SiO₄, 可调谐激光器, 增益介质
中图分类号 TN 248. 104 文献标识码 A

可调谐激光在生物、化学、环境监测、激光雷达、激光医疗和光通信等领域中有着广泛的应用, 所以在激光材料和激光技术研究中倍受关注. 20 世纪 60 年代中期, Sorokin 和 Schafer 发明了染料激光器, 实现由近紫外到近红外光谱区的连续可调谐运转. 此后十几年, 液态染料激光器在可调谐激光器领域一直占据着垄断地位. 直到 20 世纪 70 年代末至 80 年代初, 一系列性能优良的可调谐激光材料的相继出现和器件的运转成功, 才开始打破可调谐染料激光器一统天下的局面. 固体可调谐激光器, 具有结构紧凑、调谐范围宽、调谐方便、输出功率大、重复率高等优点. 它一出现就获得迅猛发展, 特别是激光二极管泵浦技术的引入, 使可调谐激光技术进入了全固化发展大趋势中, 成为当今激光高新技术领域发展的热点之一. 20 世纪 70 年代末至 80 年代初出现的实用型可调谐激光材料, 其代表是掺钛蓝宝石(Ti: Al₂O₃) 和掺 Cr³⁺ 的氟化物晶体, 调谐范围限制在 1 100 nm 波长以下. 诸如 Cr³⁺: LiCAF, Cr³⁺: LiSAF, Cr³⁺: LiSGF 几种氟化物晶体, 调谐范围分别为 700~ 900 nm, 800~ 1 010 nm, 800~ 950 nm; Ti: Al₂O₃ 的调谐范围为 660 ~ 1 100 nm. 由于 1 500 nm 以上为人眼安全波段, 1 300~ 1 500 nm 为光纤通信用波段, 所以获取近红外 (大于 1 100 nm) 的可调谐激光输出成为新的研究热点. 1988 年, Petricevic 等人报道了第一种掺 Cr⁴⁺ 晶体——掺铬镁橄榄石 (Cr⁴⁺: Mg₂SiO₄) 的激光发射作用, 其调谐范围为 1. 17~ 1. 34 μm^[1]. 同一年, Sheshtakov 等报道了掺铬钇铝石榴石 (Cr⁴⁺: YAG)^[2], 其调谐范围在 1 350~ 1 500 nm. 除了这两种典型的、已商品化的晶体外, 还出现了几种掺 Cr⁴⁺ 的黄长石晶体^[3], 如 Ca₂Al₂SiO₇ (CAS) 的调谐范围为 1. 0~ 1. 8 μm, Ca₂Ga₂SiO₇ (CGS) 的调谐范围为 0. 8~ 1. 8 μm. 近年来, 对掺 Cr⁴⁺ 激光材料及器件的研究已成为固体可调谐激光器研究的主要方向.

1 掺 Cr⁴⁺ 的钇铝石榴石

YAG(Y₃Al₅O₁₂) 是石榴石晶体家族中的重要成员, 具有立方晶体结构, 晶格常数为 1. 201 nm, 用提拉法可生长出机械和热学性能优良的高质量晶体. 掺 Cr⁴⁺ 时, YAG 四面体格位上的 Al³⁺ 被 Cr⁴⁺ 取代, 晶体呈暗褐色, 出现偏振特性. 熔料中 Cr 的质量分数为 0. 02, 为保证铬离子的正 4 价态, 掺入 0. 02(质量分数) 的 Ca 或 Mg, 以 Ca²⁺ 或 Mg²⁺ 进行电荷补偿.

1.1 Cr⁴⁺: YAG 的光谱性能与能级结构

室温下 Cr⁴⁺: YAG 的吸收光谱与发射光谱, 如图 1 所示^[4]. 图中, *a* 为吸收系数, *I* 为强度, λ 为波

收稿日期 2004 02 16
作者简介 王加贤(1955), 男, 教授, 在职博士, 主要从事固体激光技术与器件的研究. E-mail: wangjx@hqu.edu.cn
基金项目 福建省自然科学基金资助项目(A0310022); 国务院侨务办公室重点科研基金资助项目(02QZR04)

长. 可以看出, 吸收带主要有 $0.48\text{ }\mu\text{m}$, $0.65\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.00\text{ }\mu\text{m}$, 其中 $0.48\text{ }\mu\text{m}$ 吸收带是由八面体格位上的

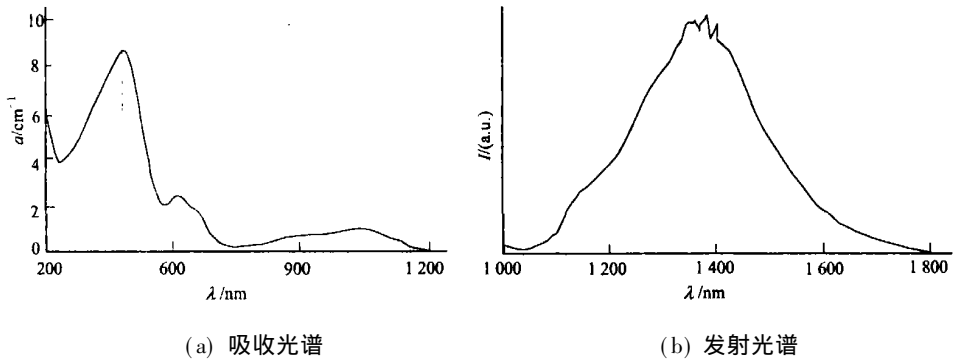


图 1 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的吸收光谱和发射光谱

Cr^{4+} 电荷转移或色心等造成, 其余吸收带是四面体格位上的 Cr^{4+} 所产生. 发射谱范围为 $1.1\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$, 峰值在 $1.37\text{ }\mu\text{m}$ 附近. 图 2 是 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的能级结构^[5], $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 的红外吸收带是 3A_2 到 3T_2 跃迁的结果, 其吸收截面为 $8.7\times 10^{-19}\text{ cm}^2$; 同时存在着 3T_2 到 3T_1 的吸收 $1\text{ }\mu\text{m}$ 激光的激发态吸收 (ESA), 其吸收截面为 $2.2\times 10^{-19}\text{ cm}^2$; 从 3T_2 到 3A_2 的跃迁发射的中心波长为 $1.37\text{ }\mu\text{m}$, 发射截面为 $4.0\times 10^{-19}\text{ cm}^2$. 室温下 3T_2 和 3T_1 的弛豫时间分别为 $\sim 3.4\text{ }\mu\text{s}$ 和 50 ps . 由于 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 在 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 处有一个很宽的吸收带, 与 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 发射的 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 波长重叠得很好, 而且吸收截面比 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 的发射截面大一个数量级, 所以 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器是 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的理想泵浦源. 除此之外, InGaAs 大功率激光二极管也是全固化小型化 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器的首选泵浦源.

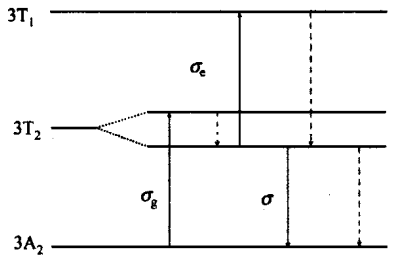


图 2 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的能级结构图

1.2 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的激光特性

由于 3T_1 的寿命极短 (50 ps), 所以激发态吸收 (ESA) 对亚稳态 3T_2 上的粒子数密度影响不大, 但对 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 泵浦光却是一种损耗, 它将影响到激光器的阈值和转换效率. 另一种 ESA 是对发射激光的吸收, 当发射光与 3T_2 和 3T_1 之间的能级匹配时, 就可能产生这种 ESA, 发射截面较大的波长, 则有较强的 ESA, 它对激光是一种损耗, 其影响轻则降低激光的输出, 重则使激光发射停止. 实验表明^[6]: ESA 是 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器长波端调谐范围受限制的主要原因; ESA 在长波长比短波长方向作用要强得多. 如在 135 mJ 泵浦能量时, 调谐范围为 $1.36\sim 1.53\text{ }\mu\text{m}$; 当提高到 180 mJ 时, 短波长扩至 $1.34\text{ }\mu\text{m}$, 而长波长却未扩展; 当泵浦能量降到 120 mJ 时, 长波端却能调谐到 $1.54\text{ }\mu\text{m}$. 因此, 减小 ESA 的影响, 可能是 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器在长波端扩展调谐范围的关键.

1.3 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器的研究

十几年来, 国内外的研究学者采用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为增益介质, 已先后实现了激光器的连续、调 Q、被动锁模和自锁模运转. 1990 年, Borodin 等在自由运转的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器中插入色散元件, 获得 $1.34\sim 1.60\text{ }\mu\text{m}$ 连续可调谐激光^[7]. 1994 年, 张国威等采用三镜腔结构, 用 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光经透镜聚焦到 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体上, 实现可调谐输出; 当阈值功率为 4 W 时, 调谐范围为 $1.39\sim 1.51\text{ }\mu\text{m}$, 斜率效率为 4.2% ; 当工作于准连续时 (占空比为 $1:15$), 其阈值功率降到 0.5 W , 斜率效率提高到 11.7% ^[8]. 1993 年, French 等人在图 3 所示的实验装置中用连续 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光泵浦 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, 采用声光调制主动锁模获得脉宽 26 ps 的超短脉冲, 在腔内插入双折射滤波器, 调谐范围为 $1.37\sim 1.51\text{ }\mu\text{m}$ ^[9]. 1994 年, 美国康乃尔大学的 Sennaroglu 等在 Z 形腔中插入棱镜对进行色散补偿, 实现 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器的自锁模运转, 获得 120 fs 的超短脉冲, 并可以在 $1.51\sim 1.53\text{ }\mu\text{m}$ 范围内调谐^[10]. 1997 年, Tong 等采用 LD 泵浦 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 输出的

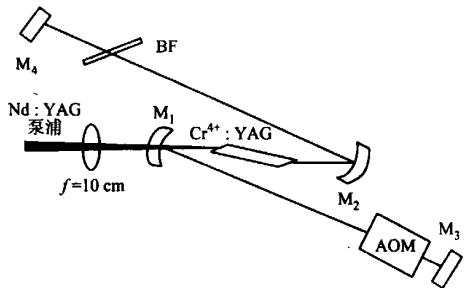


图 3 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 主动锁模激光器

激光作为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的泵浦源, 实现全固化自锁模运转, 获得 43 fs 超短脉冲, 同时在 1.34~ 1.58 μm 范围内调谐^[11].

1.4 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为可饱和吸收体的研究

1988 年, 人们就发现 Cr^{4+} 离子在 0.9~ 1.2 μm 波长范围内有可饱和吸收特性, 但直到 1995 年才首次采用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为调 Q 元件实现对 Nd:YAG 激光器的被动调 Q 运转^[12]. 与传统的有机染料(如 BDN)和色心晶体(如 LiF:F_2^-)比较, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 具有吸收截面大、饱和光强低、损伤阈值高、光化学性能稳定、使用方便等优点. 近几年来, 国内外对 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 的理论和实验研究的论文频频出现. 在国内, 1996 年欧阳斌等实现了初始透过率在 10%~ 70% 范围的各种 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体在脉冲式 Nd:YAG 激光器中的被动调 Q, 获得脉宽仅为 8 ns 的短脉冲^[13]. 同年, 雷海容等采用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 对 Nd:YAG 激光器被动调 Q, 输出的单脉冲能量为 145 mJ、脉宽为 30~ 40 ns, 这是首次报道获得单脉冲能量大于 100 mJ 的实验结果^[14]. 1997 年, 万小柯等在采用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 对脉冲 Nd:YAG 激光器的被动调 Q 实验中, 得到脉宽 5 ns、能量 90 mJ 的激光脉冲^[15], 这是至今得到的最窄调 Q 脉冲. 1998 年, 王明伟等采用不同初始透过率的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体对连续 Nd:YAG 激光器进行调 Q 实验, 获得重复频率 2.2~ 10.0 kHz、频率抖动小于 3%、脉冲宽度 120~ 900 ns、幅度抖动小于 3% 的脉冲序列^[16]. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 除了在 Nd:YAG 激光器中实现被动调 Q 外, 在 Nd:YVO₄(钒酸钕)、Nd:SFAP(氟磷酸铽)和 Nd:glass(磷酸盐钕玻璃)中也实现了被动调 Q. 例如, 在 LD 泵浦的四镜折叠腔 Nd:YVO₄ 激光器中被动调 Q, 获得脉宽 70 ns、重复频率 40 kHz、单脉冲能量 52 mJ、平均功率 2.1 W 的激光输出^[17]. 由于 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 存在着很强的激发态吸收, 而且 3T_1 能级的寿命极短, 所以当腔内激光功率密度足够大, 使得激发态吸收达到饱和时, 激发态的饱和吸收和恢复可以起到快饱和吸收体的作用而导致被动锁模. 1998 年, 王加贤等首次在脉冲 Nd:YAG 激光器中用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为可饱和吸收体实现被动锁模, 获得脉宽 180 ps、能量 13.5 mJ 的单脉冲序列, 而且从理论上分析实现被动锁模的机理、动力学过程和关键因素^[18~ 20]. 2000 年, Chen Yungfu 等人在高功率 LD 泵浦的 Nd:YVO₄ 激光器中, 采用了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为可饱和吸收体, 同样也实现了被动锁模运转^[21]. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动锁模的成功实现为该类激光器的全固化创造了条件, 进一步的研究是优化激光器的各项参数来压缩脉宽、提高锁模几率和稳定性.

1.5 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 在复合腔中的双重作用

1993 年, Spariosu 等提出了一种新思想, 即把 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 和 Nd:YAG 二种晶体组合成一个特殊的复合腔, 在 1.06 μm 和 1.44 μm 两种波长上同时实现双调 Q 运转^[5]. 在 1.06 μm 谐振腔中, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为调 Q 器件, 对 Nd:YAG 发射的 1.06 μm 激光调 Q(损耗调 Q); 在 1.44 μm 谐振腔中, 当 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的 3T_2 基态被倒空后, 3T_2 上的 Cr^{4+} 离子产生 1.44 μm 的激光跃迁(增益调 Q). 基于这一思想, 2004 年王加贤等在图 4 所示的实验装置中(M_1 与 M_3 组成 1.06 μm 谐振腔, M_2 与 M_4 组成 1.44 μm 谐振腔), 采用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 既作为可饱和吸收体又作为增益介质, 实现双波长双调 Q 运转. 输出的 1.06 μm 和 1.44 μm 的激光

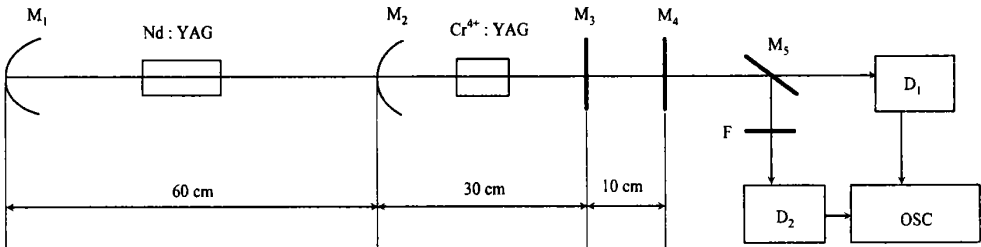


图 4 双调 Q 复合腔激光器的实验装置

脉冲的能量分别是 18 mJ 和 0.25 mJ, 脉宽分别是 52 ns 和 19 ns^[22]. 这种相干双波长短脉冲在激光光谱和激光探测中将重要应用.

1.6 Cr^{4+} 与其它激活离子双掺的激光晶体及器件

在单掺杂 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体被广泛用于被动调 Q 的同时, Cr^{4+} 与其它离子, 如 Nd^{3+} , Yb^{3+} 等的双掺杂激光晶体最近也有报道, 这类晶体集激光辐射与被动调 Q 于一体, 成为自调 Q 增益介质而被应用. 1993 年, Zhou Shouhuan 等首次报道 LD 泵浦 $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 双掺杂晶体, 获得重复率 500 Hz 的调 Q 脉冲输

出^[23]. 2000 年, 陈军等用 4 W 的 LD 激光泵浦 $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 微片, 获得重复率 10 kHz、脉宽 40 ns 的自调 Q 脉冲输出^[24]. 1999 年, 董俊等报道了利用提拉法生长 $\text{Cr}^{4+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 双掺杂晶体^[25]. 这种晶体在 937 nm 和 968 nm 处存在 Yb^{3+} 离子的两个吸收带, 适合 InGaAs 激光二极管泵浦, 而且在 1.03 μm 处有一 Cr^{4+} 的吸收峰, 可用作可饱和吸收体, 从而实现对 Yb^{3+} 的自调 Q 激光输出. 由于采用 LD 泵浦和自调 Q 可以实现激光器的小型化、全固化和集成化, 所以 $\text{Cr}^{4+}:\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 将会比 $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 更有实用化和发展前景.

2 掺四价铬离子镁橄榄石

掺四价铬离子镁橄榄石($\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$, 简称为 $\text{Cr}^{4+}:\text{MSO}$) 是 1988 年出现的重要激光晶体. 通过对其光谱特性的研究, 证实产生该谱区的发射中心为 Cr^{4+} , 其光谱覆盖范围很宽, 约为 680~1 400 nm, 现已实现的激光可调谐范围为 1 130~1 367 nm. 如果通过改善晶体的质量, 最终有可能实现在 840~1 400 nm 的调谐范围内产生激光.

2.1 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 的基本特性

镁橄榄石(Forsterite) 具有斜方晶格结构, 属 P_{nmb} 点群, 晶格常数为 $a = 0.476 \text{ nm}$, $b = 1.022 \text{ nm}$, $c = 0.599 \text{ nm}$. 由于该晶体是各向异性材料, 所以不同取向的晶体呈现明显的偏振特性. Cr^{4+} 在 Mg_2SiO_4 的能级结构仍然如图 2 所示, 图 5 是 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 的吸收光谱和发射光谱^[26]. 当用 1.06 μm 激光泵浦 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 时, Cr^{4+} 吸收光子产生 $3A_2$ 到 $3T_2$ 跃迁, 在上能级 $3T_2$ 和下能级 $3A_2$ 上形成粒子数反转, 从而发射激光. 但若泵浦速率过高, $3T_2$ 上的 Cr^{4+} 数密度较大, 将产生 $3T_2$ 到 $3T_1$ 的激发态吸收跃迁. 这种跃迁白白浪费了泵浦光, 对提高激光效率不利. 由于激发态吸收截面远小于受激发射截面, 所以在长脉冲或连续泵浦情况下, 可忽略激发态吸收的影响. 为了增大对 1.06 μm 泵浦光的吸收系数, 提高 Cr^{4+} 浓度是主要的途径, 但同时会使 1.2~2.0 μm 谱区的红外吸收增大. 例如, 当 Cr^{4+} 离子浓度达到 $3.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时, 红外吸收显著增加, 对 1.06 μm 泵浦光的吸收系数约为 1.0 cm^{-1} , 而对发射的 1.25 μm 激光的吸收系数将为 0.07 cm^{-1} . 因此, 为实现低阈值、高效率的激光振荡, 必须控制适当的 Cr^{4+} 离子浓度.

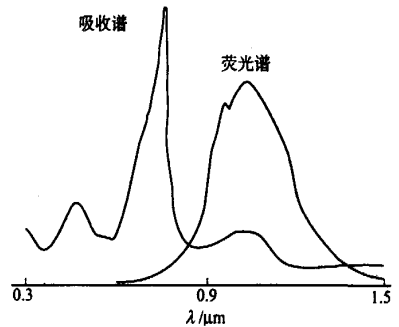


图 5 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 的吸收光谱和发射光谱

2.2 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 激光器的研究

十几年来, $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 激光器已实现用闪光灯、固体激光器、LD 激光二极管泵浦的连续、脉冲、调 Q 及锁模运转. 1988 年最早报道的 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 激光器用 Nd:YAG 激光器作为泵浦源, 实现增益调 Q 运转, 调谐范围为 1.167~1.345 μm , 中心波长在 1.24 μm 附近^[1]. 1989 年, Sugimoto 等用两根闪光灯泵浦 $\varnothing 5 \text{ mm} \times 52 \text{ mm}$ 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 激光棒, 实现了灯泵脉冲运转, 当输入能量为 283 J 时, 输出能量为 49.5 mJ, 并用棱镜实现了 1.206~1.250 μm 的可调谐激光输出^[27]. 1991 年, Seas 等报道用锁模 Nd:YAG 激光器同步泵浦 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$, 在 1.195~1.295 μm 范围内获得 260 ps 的脉冲; 在腔内用声光调制器进行主动锁模时, 获得的脉冲宽度 31 ps, 调谐范围在 1 204~1 277 nm^[28]. 1993 年, 中科院上海光机所丘治等采用调 Q 的 Nd:YAG 激光器作为 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 的泵浦源, 输出激光的可调谐范围为 1.167~1.332 μm , 能量为 11.5 mJ^[29]. 1998 年, 中科院西安光机所阮双琛等采用连续 Nd:YAG 激光器泵浦 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$, 在吸收 2.7 W 的泵浦功率时, 得到了调谐范围在 1 186~1 306 nm、平均功率 1.05 W 的连续光输出^[30]. 1999 年, 阮双琛等用 Nd:YAG 激光器泵浦掺铬镁橄榄石晶体, 实现自锁模运转, 得到脉宽 85 fs、中心波长 1 246 nm、平均功率 200 mW 的超短脉冲输出^[31]. 近年来, 美国康乃尔大学的 Wise 等用砷化镓二极管发射的 915 nm 激光泵浦掺镱光纤激光器, 产生 1.1 μm 激光, 用它泵浦掺铬镁橄榄石晶体, 实现全固化自锁模运转, 获得 80 fs 的激光脉冲.

3 其它掺 Cr^{4+} 激光晶体

掺 Cr^{4+} 的其它基质材料有晶体, 也有玻璃. 如 $\text{Cr}^{4+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5(\text{YSO})^{[32]}$, 其 3A_2 到 3T_1 跃迁有宽吸收带 $0.55\sim 0.80\text{ }\mu\text{m}$, 3A_2 到 3T_2 跃迁的吸收较弱, 吸收带可延伸到 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 附近, 发射光谱以 $1.35\text{ }\mu\text{m}$ 为中心, 范围为 $1.1\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$. 1995 年还报道了一类新晶体, 如 $\text{Cr}^{4+}:\text{SrGd}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}(\text{SGdS})$, $\text{Cr}^{4+}:\text{CaGd}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}(\text{CGdS})^{[33]}$, 它们在室温下有极宽的吸收带 $500\sim 1200\text{ nm}$, 其中 $500\sim 800\text{ nm}$ 是 3A_2 到 3T_1 的跃迁结果, $800\sim 1200\text{ nm}$ 是 3A_2 到 3T_2 的跃迁结果, 其发射谱在 $1.1\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ 范围. 吸收谱和发射谱呈偏振性, 室温下荧光寿命分别为 $2.6\text{ }\mu\text{s}(\text{CGdS})$ 和 $3.3\text{ }\mu\text{s}(\text{SGdS})$, 可能的调谐范围为 $1.2\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$, 已实现 $1.37\sim 1.44\text{ }\mu\text{m}$ 输出.

4 展望

掺 Cr^{4+} 激光材料的出现和器件的运转成功, 把可调谐固体激光器的调谐范围由 Cr^{3+} , Ti^{3+} 离子的 $0.7\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$ 谱区扩展到了 $1.0\sim 1.8\text{ }\mu\text{m}$ 谱区. 这一谱区可调谐的相干光, 可以达到 10^{-12} m 的光谱分辨率和 10^{-15} s 的时间分辨率, 在激光光谱研究和激光雷达中有重要应用. $1.3\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$ 是石英光纤的低损耗和低色散区, 而且固体激光器比半导体激光器更容易获得高单色性的相干光, 所以掺 Cr^{4+} 材料的激光器在光通信中也会有重要应用. 由 $1.37\text{ }\mu\text{m}$ 基波产生的三次谐波波长为 $0.46\text{ }\mu\text{m}$, 即为水下探测和通讯的蓝绿激光, 而且波长可根据不同海域的要求调谐, 所以比 Nd:YAG 的倍频光有更广泛的适应性. Cr^{4+} 的主要不足是, 辐射寿命短 ($< 10\text{ }\mu\text{s}$); 吸收谱与闪光灯的发射谱匹配不好, 难以用闪光灯泵浦. 但是, 随着长波长大功率激光二极管的发展, 这一问题将得到很好解决. LD 泵浦的、以掺 Cr^{4+} 离子激光材料为增益介质的全固化可调谐激光器将会有快速发展, 并且在各个领域中得到广泛应用.

参 考 文 献

- 1 Petricevic V, Gayen S K, Alfano R R, et al. Laser action in chromium doped forsterite [J]. Appl. Phys. Lett., 1988, 52(13): 1040~1042
- 2 Angert N B, Borodin N I, Shestakov A V. Lasing due to impurity color centers in yttrium aluminum garnet crystals at wavelengths in the range $1.35\sim 1.4\text{ }\mu\text{m}$ [J]. Sov. J. Quant. Electr., 1988, 18(1): 73~75
- 3 Allik T H, Chai B H T, Merkle L D. Crystal growth and spectroscopic analysis of Cr^{4+} -doped melilite compounds, in advanced solid state lasers [A]. Vol. 10 of the OSA proceeding series[C]. Washington D. C.: Optical Society of America, 1991. 84~86
- 4 Eilers H, Dennis W M. Performance of a Cr^{4+} :YAG laser[J]. IEEE J. of Quantum Electronics, 1993, 29(9): 2508~2512
- 5 Spariosu K, Chen W, Stultz R, et al. Dual Q switching and laser action at $1.06\text{ }\mu\text{m}$ and $1.44\text{ }\mu\text{m}$ in a Nd:YAG oscillator at 300 K [J]. Opt. Lett., 1993, 18(10): 814~816
- 6 张国威. 可调谐激光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 101~102
- 7 Borodin N I, Zhitnyuk V A, Okhrimchuk A G, et al. Oscillation of a $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Cr}^{4+}$ laser in wave length region of $1.34\sim 1.6\text{ }\mu\text{m}$ [J]. Izv. Akad. Nauk. SSSR Ser. Fiz., 1990, 54(8): 1500~1506
- 8 张国威, 徐天华. 四价铬离子可调谐激光器研究的进展[J]. 激光技术, 1994, 18(5): 281~288
- 9 French P M W, Rizvi N H, Taylor J R. Continuous wave mode locked $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ laser [J]. Opt. Lett., 1993, 18(1): 39~41
- 10 Sennaroglu A, Pollock C R. Continuous wave self mode locked operation of a femtosecond $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ laser [J]. Opt. Lett., 1994, 19(6): 390~392
- 11 Tong Y P, French P M W, Taylor J R, et al. All solid state femtosecond sources in the near infrared [J]. Opt. Commun., 1997, 136: 235~238
- 12 Shimony Y, Bushtein Z, Kalisky Y. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ as passive Q-switch and Brewster plate in a pulsed Nd:YAG laser [J]. IEEE J. Quantum Electron., 1995, 31(10): 1738~1741
- 13 欧阳斌, 丁彦华, 万小珂等. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的可饱和吸收特性与被动 Q 开关性能研究[J]. 光学学报, 1996, 16(12): 1665~1669
- 14 雷海容, 刘宏发, 严柏生等. 一种新型固体开关—— $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的实验研究[J]. 光学学报, 1996, 16(8): 1191~1193
- 15 万小珂, 林礼煌, 欧阳斌等. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 与激光激发态吸收饱和[J]. 光学学报, 1997, 17(11): 1567~1570

- 16 王明伟, 邢岐荣, 王清月等. CW Nd YAG 激光器中 Cr^{4+} : YAG 被动调 Q 的实验研究[J]. 中国激光, 1998, 25(10): 872~ 875
- 17 何京良, 侯伟. 全固化连续波 Nd YVO₄ 激光器中 Cr^{4+} : YAG 被动调 Q 的实验研究[J]. 量子电子学报, 16(15): 618~ 619
- 18 Wang Jiaxian, Zhang Wenzhen, Xing Qirong, et al. Investigation of Cr^{4+} : YAG passive mode locked in a pulsed Nd YAG laser[J]. Optics & Laser Technology, 1998, 30(5): 303~ 305
- 19 王加贤, 张文珍, 王清月等. Cr^{4+} : YAG 在对撞脉冲锁模的 Nd YAG 激光器中被动锁模的研究[J]. 光学学报, 1998, 18(8): 983~ 987
- 20 王加贤, 张文珍. Cr^{4+} : YAG 被动锁模与被动调 Q 的研究[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 1999, 20(1): 25~ 29
- 21 Chen Yungfu, Tsai S W, Wang S C. High power diode pumped Q switched and mode locked Nd YVO₄ laser with a Cr^{4+} : YAG saturable absorber [J]. Opt. Lett., 2000, 25(19): 1 442~ 1 444
- 22 王加贤, 吕凤萍, 苏娅菲. 双调 Q 复合腔 Nd YAG- Cr^{4+} : YAG 激光器的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 399~ 402
- 23 Zhou Shouhuan, Lee K K, Chen Y C. Monolithic self Q switched Cr^{4+} : Nd YAG laser [J]. Opt. Lett., 1993, 18(2): 511~ 512
- 24 陈军, 葛建虹, 洪治等. LD 泵浦的自调 Q Cr^{4+} : Nd³⁺: YAG 激光器的研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(1): 1~ 4
- 25 董俊, 邓佩珍, 徐军等. Cr^{4+} , Yb^{3+} : YAG 晶体的生长及其吸收特性[J]. 人工晶体学报, 1999, 28(2): 140~ 143
- 26 Vetricic V, Gayen S K, Alfano R R. Chromium activated forsterite laser, in tunable solid lasers [A]. Vol. 5 of the OSA proceeding series [C], Washington, D. C.: Optical Society of America, 1989. 77~ 84
- 27 Sugimoto A, Segawa Y, Yamaguchi Y. Flash lamp pumped tunable forsterite laser [J]. J. Appl. Phys., 1989, 28(10): 1 833~ 1 835
- 28 Seas A, Petricevic V, Alfano R R. Continuous wave mode locked operation of a chromium doped forsterite laser [J]. Opt. Lett., 1991, 16(21): 1 668~ 1 670
- 29 丘治, 刘晔, 褚春霖等. 镁橄榄石可调谐激光的研究[J]. 中国激光, 1993, 20(6): 406~ 409
- 30 阮双琛, 侯洵. 掺铬的镁橄榄石晶体连续波可调谐激光器[J]. 光子学报, 1998, 27(2): 97~ 99
- 31 阮双琛, 朱勤. 自锁模飞秒掺铬镁橄榄石激光器的实验研究[J]. 光子学报, 1999, 28(10): 892~ 894
- 32 Koetke J, Kuck S, Petermann K, et al. Quasi continuous wave laser operation of Cr^{4+} -doped Y_2SiO_5 at room temperature [J]. Opt. Commun., 1993, 101: 195~ 198
- 33 Moncorge R, Manaa H, Deghoul F, et al. Spectroscopic study and laser operation of Cr^{4+} -doped (Sr, Ca) $\text{Gd}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$ single crystals [J]. Opt. Commun., 1995, 116: 393~ 398

A Commentary on Laser Materials and Devices

Doping with Chromium Ions

Wang Jiaxian

(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362021, Quanzhou, China)

Abstract A commentary is made on Cr^{4+} ions doped laser materials, especially the important characteristics of Cr^{4+} : YAG and Cr^{4+} : Mg_2SiO_4 crystals and their application to laser devices. These two crystals are expected to become ideal gain media of tunable solid laser in near infrared region.

Keywords Cr^{4+} : YAG, Cr^{4+} : Mg_2SiO_4 , tunable laser, gain media