

文章编号:1673-9981(2018)04-0236-08

钕掺杂含镱石榴石晶体的研究进展*

刘运连,狄聚青,朱 刘,王春泉,滕 飞

国家稀散金属工程技术研究中心,广东先导稀材股份有限公司,广东 清远 511517



摘 要:钕掺杂含镱石榴石晶体在超短超快、高功率、连续、多波长等激光方面,有着广泛的应用,近来得到更多的研究关注.主要介绍了钕掺杂含镱石榴石晶体的研究进展,包括常规含镱石榴石晶体、含镱石榴石混晶和多中心无序含镱石榴石晶体.
关键词:含镱石榴石晶体;钕掺杂;激光性能
中图分类号:O799 **文献标识码:**A

自1960年激光首次实现输出以来,激光技术已在军事、医疗、科研和工业加工等领域中得到广泛应用^[1].激光增益介质作为激光器的关键元器件,又决定着激光器的发展方向和应用范围.随着超短超快、高功率、连续、多波长激光等的发展,对激光的性能也在良好的相干性、方向性和高亮度的基础上提出更高的要求,因此需要积极探索新的激光增益介质,或研究具有不同结构、组成的全新材料,或对已有材料进行性能优化改造.目前,对激光增益介质的研究很多集中于掺Nd³⁺晶体^[2].含镱石榴石体系晶体,不仅具有石榴石晶体的易结晶、良好的热学和机械性能、物理化学性质稳定、激光波长透过率高及适宜Nd³⁺掺杂的晶格等优点^[3-4],而且在超短超快、高功率、连续、多波长等激光领域中有着其他石榴石类型晶体难以比拟的优点.

1 常规含镱石榴石晶体

常规含镱石榴石晶体有Gd₃Ga₅O₁₂(GGG), Y₃Ga₅O₁₂(YGG)和Lu₃Ga₅O₁₂(LuGG)等.

1.1 GGG

Gd₃Ga₅O₁₂(GGG)是目前研究最为广泛的镱酸

盐激光晶体. GGG晶体熔点1720℃,密度7.09 g/cm³. Nd:GGG晶体作为一种重要的高功率增益介质,其优点主要体现于:①该晶体生长相对容易,晶体生长速度可达5 mm/h,大大超过了Nd:YVO₄和Nd:YAG等钕掺杂增益介质;②该晶体可实现无应力集中的较平界面生长,杂质少,容易制备大功率晶体应用的大尺寸板条;③Nd在钇铝石榴石(YAG)晶体中的分凝系数为0.1~0.2,而在GGG晶体中Nd的分凝系数较高可达0.52,这有利于制备高浓度掺杂的激光晶体,从而提高泵浦功率;④相比于激光增益介质钕玻璃, Nd:GGG晶体的机械强度更高、热导率更大,能够在较短时间内实现晶体的冷却;⑤Nd和Gd在Nd:GGG晶体中都以+3价态存在, Nd³⁺同态取代Gd³⁺,能有效避免Nd³⁺的激光上能级出现发光淬灭现象^[5];⑥Nd:GGG晶体的激光效率比常用高功率激光增益介质钕玻璃高出一倍,可作为激光工作介质应用于功率达100 kW的短程战略激光武器中^[6-7].

Nd:GGG晶体最早于1964年由Linares R. C. 首次提出,并作为激光增益介质进行了研究^[8]. 2002年,美国利弗莫尔实验室研制出固体热容激光器,其运用二极管泵浦Nd:GGG板条晶体

收稿日期:2018-07-02
* 基金项目:工业和信息化部工业强基工程(TC160A310/17);“广东特支计划”科技创新青年拔尖人才(2016TQ03C535)
作者简介:刘运连(1990-),男,安徽涡阳人,硕士,研究方向为人工晶体生长.

首次输出激光,平均功率为2.7 kW,并在2004年达到了30 kW^[9].2010年我国也制备出直径为190 mm的大尺寸激光武器用的Nd:GGG晶体^[10].曾繁明等人^[11]采用提拉法制备了Nd:GGG晶体,测试结果表明:晶体的最强荧光发射峰和最强吸收峰分别位于波长1 062 nm和808 nm处;荧光发射由Nd³⁺的⁴F_{3/2}—⁴I_{11/2}谱项所致,其可适用于激光二极管泵浦,且光转换效率为33.8%.Qin L. J.等人^[12]利用半导体可饱和吸收镜研究了Nd:GGG晶体的被动锁模性能,重复频率为121.5 MHz,锁模脉冲为17.5 ps,最大输出频率为0.4 W.Xu B.等人^[13]研究了Nd:GGG晶体的端面泵浦激光,获得了1 054 nm和1 067 nm多波长激光.周景涛等人^[14]采用168 W的LD侧面泵浦,使Nd:GGG晶体输出1 110 nm单一波长连续激光,功率为25.5 W;Chen L. J.等人^[3]获得了1 105.6 nm和1 110.4 nm的双波长激光,并利用差频技术获得了1.2 THz的输出频率,表明Nd:GGG晶体在太赫兹方面有潜在应用.

1.2 YGG

Y₃Ga₅O₁₂(YGG)晶体可以看做是用离子半径更大的Ga³⁺取代YAG晶体中的Al³⁺,这种取代导致晶体的晶格间距扩大,有利于Nd³⁺的掺入.与YAG晶体类似,YGG晶体具有高的化学稳定性、硬度、热导率(9 W/mK)和光学均匀性,以及有适合稀土离子或者过渡金属离子取代的格位^[15].由于Nd:YGG晶体熔点较高且存在氧化镱挥发的问题,目前仅有的报导为光学浮区法生长的Nd:YGG单晶.

Nd:YGG晶体的激光性能最早于1964年由Geusic J. E.等人研究^[16].与其他Nd掺杂激光晶体相比,Nd:YGG的激光上能级⁴F_{3/2}寿命长,量子效率接近于1^[15],而且在1.06 μm附近的多个波长具有相近的发射截面,是一种潜在的多波长激光增益介质^[17].Strohmaier等人^[18]通过Nd:YGG晶体在935 nm波长处的二极管泵浦发射,得到输出功率为950 mW、效率为14%的激光,显示了Nd³⁺在⁴F_{3/2}和⁴I_{9/2}能级之间的激光活性.Löhring J.等人^[19]报道了在935 nm处使用二极管泵浦的Nd:YGG激光器的调Q激光运行情况,其产出脉冲持续时间小于60 ns的4 mJ脉冲,重复频率为100 Hz,光—光转换效率为9%.Yu H. H.等人^[17]研究了激光二极管泵浦的1%掺杂的Nd:YGG的激光性能,获得

了斜率效率52.7%、最高输出功率7.15 W的连续激光输出,激光波长为1 062.1 nm,1 060.3 nm和1 058.9 nm,利用差频技术可以获得0.47 THz,0.37 THz和0.85 THz的太赫兹输出.Li Y. L.等人^[20]在808 nm处通过二极管泵浦,在Nd:YGG晶体中发射1 110 nm的激光,匹配LBO晶体后产生555 nm的连续波激光,光—光转换效率达到12.4%.同时,Li Y. L.等人^[21]也通过二极管泵浦Nd:YGG晶体产出1.33 μm的连续波激光,在18.5 W的入射功率下于1.33 μm处的连续波输出功率高达3.09 W,相对于入射功率的斜率效率为21.3%.

1.3 LuGG

Lu₃Ga₅O₁₂(LuGG)也同样属于石榴石晶体.Wu K.等人^[22]研究了Nd:LuGG的吸收和发射光谱,其中Nd³⁺浓度为1%,晶体生长方法采用光学浮区法.结果表明:Nd:LuGG单晶具有与Nd:YAG单晶相比拟的激光性能;在5.2 W二极管泵浦功率下,于1 062 nm处产出的最大输出功率为855 mW的激光,斜率效率和光转换效率分别为23.4%和16.4%.

2 含镱石榴石混晶

含镱石榴石混晶是将石榴石晶体中的一种或多种元素被其他元素取代而得到的晶体,可以看做是多种石榴石晶体的固溶体.目前,研究较多的含镱石榴石混晶主要包括Gd₃(Ga_{1-x}Al_x)₅O₁₂(GGAG),Gd₃Sc₂Ga₃O₁₂(GSGG),Gd_{3-x}La_xGa₅O₁₂(LaGGG),Gd_{3-x}Lu_xGa₅O₁₂(LuGGG),Lu₃Sc_xGa_{5-x}O₁₂(LuSGG),Gd_xY_{3-x}Sc₂Ga₃O₁₂(GYSGG)等.

2.1 GGAG

GGAG晶体是用Al³⁺取代GGG晶体中部分Ga³⁺获得的一种晶体,通过掺杂Al³⁺,可以改善GGG晶体生长过程中偏心生长和铍金损耗严重等缺陷,同时降低晶体的原料成本.另一方面,通过掺杂增强了晶体的静态晶体场,有利于掺质晶体光谱的非均匀展宽,从而利于超快激光的产生^[10].

Zhang J.等人^[23]报道了Nd:GGAG晶体的生长和激光晶体性能,并获得了最大功率2.44 W、斜效率为28.8%的连续激光输出.Zhi Y. C.等人^[24]利用Nd:GGAG晶体获得了最大功率为5.7 W、

斜效率为 54.5% 的连续激光输出, 该晶体被动调 Q 激光最高功率为 1.12 W, 单脉冲能量为 66.7 μJ , 显示了 Nd:GGAG 晶体在高效率激光领域的应用前景. Agnesi A. 等人^[25]研究了 Nd:GGAG 晶体的锁模激光, 其输出功率为 65 mW, 脉宽为 3.7 ps. Nd:GGAG 晶体作为一种优异的激光增益介质, 也可以在 1.3 μm 波段以锁模的方式实现激光输出^[26].

2.2 GSGG

$\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (GSGG) 晶体是 Sc^{3+} 取代 GGG 晶体中的部分 Ga^{3+} 得到的晶体. Nd:GSGG 晶体的优越性: ①与 Nd:GGG 类似, 高质量无核心的 Nd:GSGG 晶体易生长, 可以避免小面生长引起的杂质、应力等缺陷; ② Nd^{3+} 离子在 GSGG 晶体中分凝系数为 0.75, 比 YAG 中的 0.1~0.2 高, 这更容易获得高泵浦效率激光, 而且有利于获得掺杂浓度均匀的激光晶体, 从而提高激光的输出质量, 同时不需要牺牲光学质量或显著地降低荧光寿命; ③Nd:GSGG 晶体能够抗辐射和抵御高能离子冲击, 可以用于空间科学研究等; ④含 Sc 的石榴石具有较高的热导率和稳定的物理化学特性; ⑤Nd:GSGG 晶体的上能级寿命高于 Nd:GGG 和 Nd:YAG 晶体, 有利于提高器件输出功率和能量; ⑥Nd:GSGG 晶体在 1.06 μm 附近的峰值发射截面低于 Nd:GGG 和 Nd:YAG 晶体, 有利于提高脉冲光输出功率^[10,27].

Nd:GSGG 晶体的首次人工生长是由 Brandle C. D. 等人^[28]在 1973 年以提拉法进行的. Caffey D. F. 等人^[29]报道了激光二极管泵浦的 Nd:GSGG 晶体的激光性能, 斜率效率达到 41.5%. 罗建乔等人^[30]研究了二极管泵浦的非对称平行平面腔 Nd:GSGG 晶体激光器, 在 2 355 mW 的泵浦功率下产出 345 mW 的激光, 光-光转换效率和斜率效率分别为 14.65% 和 16.61%. Tian L. 等人^[31]采用光学浮区法生长了 Nd:GSGG 单晶, 用功率为 7.36 W 的激光二极管泵浦时, 在 1 062 nm 波长处实现了连续波激光输出, 最大输出功率为 0.792 W, 光-光转换效率为 11.72%, 斜率效率为 11.89%.

也有一些研究人员对 GSGG 晶体进行 Nd, Cr 共掺杂的研究^[32]. 随着提纯技术的不断提高和 Sc 价格的下降, 未来对 Nd:GSGG 晶体的研究会逐渐增多.

2.3 LuGGG

LuGGG 晶体可以看做是 GGG 晶体中部分 Gd^{3+} 被半径较小的 Lu^{3+} 取代而获得的. Jia Z. T. 等人^[33]以提拉的方式生长 Nd:LuGGG 晶体, 发现其结构与 GGG 晶体存在非常大的相似性. Fu X. W. 等人^[34]测试了 Nd:LuGGG 晶体在 1 062 nm 波长处的连续激光性能, 其最大输出功率和相应的斜率效率为 9.73 W 和 61.2%. Yang H. 等人^[35]在 Nd:LuGGG 晶体被动调 Q 实验中获得了最高输出功率为 1.21 W, 最高重复频率 27.1 kHz, 最短脉宽为 9.1 ns 的激光. 由于 Nd:LuGGG 晶体利于光谱的非均匀展宽, 因此在超快激光方面将会获得更多深入研究.

2.4 LaGGG

LaGGG 晶体是 GGG 晶体中部分 Gd^{3+} 被 La^{3+} 取代而获得的. 与 Nd:GGG 晶体相比较, Nd:LaGGG 晶体中 La^{3+} 取代 Gd^{3+} 可以非均匀展宽光谱, 有利于超快激光的产生; 此外, La^{3+} 半径大于 Gd^{3+} , 取代后可以增加晶体晶格常数, 利于 Nd:LaGGG 晶体熔点的降低^[36].

Yang H. 等人^[37]研究了 Nd:LaGGG 晶体的连续激光运转, 在 1.06 μm 波长处的最高功率为 9.9 W, 斜率效率为 19.6%; 在被动锁模激光方面, 最高功率为 2.83 W, 脉宽 7.4 ns, 重复频率 13.87 kHz. 王祎然^[38]采用准连续的脉冲 LD 泵浦, 在波长 1.3 μm 处实现了 Nd:LaGGG 晶体的被动调 Q 运转, 获得激光的最大输出能量、脉宽和峰值功率分别为 1.0 mJ、8.1 ns 和 10.2 kW; 在波长 1.0 μm 处实现了 Nd:LaGGG 晶体的连续波锁模运转, 获得激光的最高输出功率和锁模脉宽分别为 3.2 W 和 17.25 ps.

2.5 LuSGG

掺杂 Sc^{3+} 的 Nd:LuSGG 晶体具有更宽的吸收和发射谱线、小的发射截面及长的荧光寿命, 有利于在超短超快激光方面有所应用. Kaminskii A. A. 在 1994 年^[39]用提拉法首次生长出 Nd:Lu₃Sc₂Ga₃O₁₂ 晶体, 在室温下用激光二极管和 Xe 闪光灯泵浦激发出 1 062.2 nm 波长的激光. 武奎^[40]利用 Nd:Lu₃Sc_{1.5}Ga_{3.5}O₁₂ 获得了斜率效率为 33%、最高的输出功率为 6.96 W 的连续激光和最窄的脉冲宽度为 5.1 ns、最大的脉冲能量为 62.5 MJ、最高的峰值功率约为 12 kW 的被动调 Q 脉冲激光, 由于该

晶体生长制备的方法为浮区法,晶体的缺陷较多,其激光性能受到影响。

2.6 GYSGG

Nd: GYSGG 是一种前景广阔的晶体,具有双波长性质^[41]。与 Nd: YAG 相比, Nd: GYSGG 晶体具有良好的抗辐射性和非均匀加宽效应,在太空领域中有着潜在应用;在波长 1.06 μm 附近的荧光光谱宽度为 4.95 nm,远大于 Nd: YAG 的 0.8 nm,有利于产生超短超快激光^[42]。

孙崇玲^[43]分别对 Nd: GYSGG 晶体在 1 058.4 nm 和 1 061.5 nm 处的双波长激光运转、在 1.3 μm 处的 $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ 能级跃迁激光运转和在 937 nm 处单波长激光运转进行了研究,并对 Nd: GYSGG 晶体在不同泵浦功率和边界温度下内部三维温度场的分布进行了模拟。Zhong K. 等人^[44]利用 Nd: GYSGG 晶体获得了斜效率 42.92%、最高输出功率 4.17 W 的连续激光,被动调 Q 激光方面,获得了 1 053 nm 和 1 058.4 nm 的双波长激光,最高单脉冲能量和峰值功率分别为 172 μJ 和 26.1 kW,证明 Nd: GYSGG 晶体是一种潜在的通过差频效应获得 1.53 THz 激光的增益介质。Song Q. 等人^[45]对 Nd: GYSGG 晶体的被动调 Q 锁模激光性能进行了测试,获得了 1 057.28 nm 和 1 060.23 nm 的双波长激光,最高输出功率为 0.189 W、脉宽为 441 ps。Wang B. L. 等人^[46]采用光学浮区法生长制备了 Nd: LuYSGG 晶体,在波长 1.06 μm 处研究了连续激光输出特性,其斜率效率为 48.0%,也实现了被动调 Q 激光输出,其最窄脉冲宽度、最大脉冲能量和最高峰值功率分别为 4.1 ns, 157.1 μJ 和 38.3 kW,表明 Nd: LuYSGG 晶体适用于脉冲较短、能量较大的脉冲激光器中。

3 多中心无序含镓石榴石晶体

多中心无序含镓石榴石晶体结构是包括 Ga^{3+} 在内的两种或两种以上离子以任意分布的形式占据晶体结构中某个格位,同时排列时不存在晶体结构周期性或所属空间群对称性,其结合了光学玻璃基质的非均匀加宽光谱和有序晶体基质的高热机械性能。此类无序结构晶体进行钕离子掺杂,通过激光二极管泵浦后通常具有更宽的吸收和发射光谱,是高重复频率、超短脉冲激光和高功率激光所用晶体。

3.1 CNGG, CLNGG 和 CTGG

在钙铌镓石榴石 [$\text{Ca}_3(\text{Nb}, \text{Ga})\text{Ga}_3\text{O}_{12}$] (CNGG) 晶体中, Nb^{3+} 和 Ga^{3+} 无序地占据同一个八面体格位,导致晶格内离子排列无序,稀土离子 Nd^{3+} 取代 Ga^{3+} 离子后, Nd^{3+} 周围格位无序,易展宽光谱^[47]。 Nb^{3+} 化学计量比在 1.710~1.665 之间波动,而 Ga^{3+} 在 3.150~3.22 之间,即 CNGG 石榴石相的组成在 $\text{Ca}_3\text{Nb}_{1.710}\text{Ga}_{3.150}\text{O}_{12}$ 与 $\text{Ca}_3\text{Nb}_{1.665}\text{Ga}_{3.22}\text{O}_{12}$ 之间波动。同时,在 Nd: CNGG 晶体内部的电荷匹配不平衡,导致易有空位出现,将 Li 引入 CNGG 晶体中后生成了 Nd: CLNGG 晶体,空位得到进一步的减少。这两种晶体与 Nd: YAG 晶体相比具有显著优势^[48]: ①两者熔点都在 1 450 $^{\circ}\text{C}$ 左右,可以用钛金坩埚在空气中直接生长,简化了长晶步骤; ② Nd^{3+} 掺杂浓度更高; ③晶体晶格无序, Nd^{3+} 掺杂晶体的光谱半高宽为十几微米,适合产生超短超快激光。

马小涛等人^[49]报道了连续激光器二极管端面泵浦的 Nd: CNGG 非均匀加宽激光器,实现了 1 061.3, 1 059.1 和 1 065.6 nm 三波长同时激光输出。张辉荣等人^[50]测量了 Nd: CNGG 晶体的光谱性能,利用激光二极管泵浦在波长 1.062 μm 处获得了斜率效率为 22.3%、功率为 123.1 mW 的连续激光输出。Mukhopadhyay P. K. 等人^[51]研究了 Nd: CNGG 晶体的激光性能,以二极管激光阵列进行端面泵浦,在波长 1.06 μm 处得到了最大功率为 1.63 W 的连续激光输出。Li Y. L. 等人^[52]利用 885 nm 激光二极管(LD)直接泵浦 Nd: CNGG 激光器,吸收泵浦功率为 13.5 W 时在 1 061 nm 和 1 329 nm 处的最大输出功率分别为 4.5 W 和 2.9 W,斜率效率分别为 32.2% 和 22.1%。施玉显等人^[53]利用 885 nm 激光二极管(LD)直接泵浦 Nd: CNGG 激光器,相比于 808 nm 泵浦方式,在 935 nm 处的斜率效率从 4.6% 增加到 6.6%,阈值从 3.31 W 减少到 3.05 W。

Li Y. L. 等人^[54]采用二极管泵浦 Nd: CLNGG 晶体,在 928 nm 处产生了功率为 1.3 W 的连续波输出,吸收功率为 17.8 W,相对斜率效率是 11.2%,是由 $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$ 能级跃迁所产生。Yu H. H. 等人^[55-56]进行了 Nd: CNGG 和 Nd: CLNGG 的被动调 Q 激光实验,发现 Nd: CNGG 激光器和 Nd: CLNGG 激光器分别以双波长和单波长的连

续波运转,两者分别得到最窄脉冲宽度、最高峰值功率及最大脉冲能量为 12.9 ns, 173.16 μJ , 12.3 kW 和 12.3 ns, 199.1 μJ , 16 kW 的脉冲输出。石自彬^[57]研究了 Nd: CNGG 和 Nd: CLNGG 的被动锁模激光性能,实现 Nd: CNGG 激光器的双波长同步锁模运转,可得到宽度为 5 ps 的脉冲;对 Nd: CLNGG 激光器进行连续锁模运转,可得到宽度为 900 fs 的脉冲。Xie G. Q. 等人^[58]利用 Nd: CLNGG-CNGG 晶体获得了 534 fs 的锁模激光,是当时 Nd³⁺ 掺杂晶体中获得的最短脉冲。CLNGG 和 CNGG 这两种晶体成为为数不多的可以产生飞秒超快激光的 Nd³⁺ 掺杂激光晶体,表明他们在超短超快激光领域中有优异的潜力。

CTGG 晶体可以看做是 CNGG 晶体中的 Nb³⁺ 完全被同族 Ta³⁺ 所取代。Guo S. Y. 等人^[59]报道了提拉法生长的 CTGG 晶体,在波长 1.06 μm 处得到激光输出。Xie G. Q. 等人^[60]进行了 Nd: CTGG 晶体的被动锁模激光实验,其最短脉冲宽度为 4.3 ps。鉴于 Nd: CNGG 晶体在超短超快激光方面突出的表现,其仍有潜力可以发掘。

3.2 YGaO₃

YGaO₃ 晶体[Nd: Y₃(Y, Ga)Ga₃O₁₂]与 YAG 晶体类似,具有立方晶系结构。YGaO₃ 晶体中 Y³⁺ 不仅占据十二面体格位,还占有一半八面体格位。因此, Nd³⁺ 取代 Y³⁺ 的格位,就会导致 Nd³⁺ 离子格位不固定,导致部分 Nd³⁺ 周围晶格无序,从而展宽光谱^[61]。Kaminskii A. A. 等人^[61]在激光泵浦下实现了 Nd: YGaO₃ 双波长连续激光运转,斜效率约为 25%,最大输出功率约为 55 mW,激光波长分别是 1 059.3 nm 和 1 062 nm,显示了良好的双波长增益介质潜质。

3.3 CGGG

当 Nd³⁺ 掺入到 Ca₃Ga₂Ge₃O₁₂ 中后, Nd³⁺ 将会取代离子半径相近的 Ca²⁺, 从而导致周围的八面体和四面体格位上的 Ga³⁺ 与 Ge⁴⁺ 位置重排,产生 Ga³⁺ 与 Ge⁴⁺ 反位缺陷,造成 Nd³⁺ 周围晶格无序排列,从而展宽激光光谱^[62]。相比较于 Nd: YAG 晶体, Nd: CGGG 晶体具有更高的热导率和更低的熔点^[63]。Eskov N. A. 等人^[64]采用直拉生长了 Nd: CGGG 晶体。Jaque D. 等人^[65]研究了掺杂不同 Nd³⁺ 浓度的 CGGG 光谱和激光性能,浓度为 0.1% 时在 1 060 nm 和 1 065 nm 附近发射双激光,浓度

在 2% 以上时出现发光猝灭。Montes M. 等人^[66]进行了 Nd: CGGG 多中心激光晶体的被动调 Q 二极管泵浦实验,获得的脉冲能量和脉冲峰值功率几乎是由在完全相同的实验条件下操作的 Nd: YAG 晶体获得的脉冲能量的三倍。Belovolov M. I. 等人^[67]研究了二极管泵浦的 Nd: CGGG 晶体在波长 1.06 μm 处激光性能,在 2.7 W 的吸收泵浦功率下获得了 700 mW 的连续激光输出。

4 结 语

含镱石榴石激光晶体展现出了众多优异的激光性能,特别是在高功率、连续、多波长、超短超快激光等方面。目前,随着对含镱石榴石晶体研究的进一步深入,在太赫兹激光、被动调 Q 激光、被动锁模激光及激光武器等方面的应用将成为最新研究热点。

参考文献:

- [1] 刘羽桐. 基于电磁诱导透明效应的非线性增强研究[D]. 上海:华东理工大学, 2017.
- [2] 汤刚,肖卓豪,左成钢,等. 掺 Nd³⁺ 激光材料的研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(11): 40-44.
- [3] CHEN L J, WANG Z P, DONG C M, et al. LD end-pumped 1.11 μm laser of Nd: GGG crystal[J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(9): 721-725.
- [4] SUGAK D, MATKOVSKII A, DURYGIN A, et al. Influence of color centers on optical and lasing properties of the gadolinium gallium garnet single crystals doped with Nd³⁺ ions[J]. Journal of Luminescence, 1999, 82(1): 9-15.
- [5] 张庆礼,殷绍唐,王爱华,等. GGG 系列激光晶体研究进展[J]. 量子电子学报, 2002, 19(6): 481-484.
- [6] 孙晶,刘景和,关效贤,等. Nd: Gd₃Ga₅O₁₂ 多晶原料合成及单晶生长研究[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(5): 585-589.
- [7] ZIMIK K, CHAUHAN R R, KUMAR R, et al. Study on the growth of Nd³⁺: Gd₃Ga₅O₁₂ (Nd: GGG) crystal by the czochralski technique under different gas flow rates and using different crucible sizes for flat interface growth[J]. Journal of Crystal Growth, 2013, 363(3): 76-79.
- [8] OKUDA T, ANDO K, KOSHIZUKA N. Preparation of Nd³⁺ doped Gd₃Ga₅O₁₂ films by liquid-phase epitaxy[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 21(S1): 409.

- [9] ROTTER M D, DANE C B, FOCHS S, et al. Solid-state heat-capacity lasers: good candidates for the marketplace[J]. *Photonics Spectra*, 2004, 38(8): 44-52.
- [10] 付秀伟. Nd: $\text{Re}_x\text{Gd}_{3-x}\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ ($\text{Re}=\text{Lu}^{3+}, \text{La}^{3+}$) 激光晶体的生长和性能表征[D]. 济南:山东大学, 2013.
- [11] 曾繁明, 孙晶, 郭丹, 等. 掺钕钐石榴石晶体的激光性能[J]. *硅酸盐学报*, 2005, 33(11):1339-1343.
- [12] QIN L J, TANG D Y, XIE G Q, et al. Diode-end-pumped passively mode-locked Nd: GGG laser with a semiconductor saturable mirror [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(18):4762-4764.
- [13] XU B, XU H Y, CAI Z P, et al. Efficient laser-diode end-pumped Nd: GGG lasers at 1054 and 1067nm[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(29): 6812-6815.
- [14] 周景涛, 黄敬霞, 李莉. 1110nm Nd: GGG 激光器与 555nm 倍频激光器[J]. *红外与激光工程*, 2015(3): 867-871.
- [15] VERMA A, MALHAN N, GANGULI A K. Preparation, structure and characterization of nanocrystalline-Nd: $\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ [J]. *Materials Letters*, 2012, 81(3):242-244.
- [16] GEUSIC J E, MARCOS H M, UITERT L G V. Laser oscillations in Nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets[J]. *Applied Physics Letters*, 1964, 4(10):182-184.
- [17] YU H H, WU K, YAO B, et al. Efficient triwavelength laser with a Nd: YGG garnet crystal [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11):1801-1803.
- [18] STROHMAIER S G P, EICHLER H J, CZERANOWSKY C, et al. Diode pumped Nd: GSAG and Nd: YGG laser at 942 and 935 nm [J]. *Optics Communications*, 2007, 275(1):170-172.
- [19] LÖHRING J, NICKLAUS K, HOFFMANN D. Diode pumped Nd: YGG laser for direct generation of pulsed 935 nm radiation for water vapour measurements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6451:1-8.
- [20] LI Y L, LI J H, LIU X H, et al. 555 nm laser sources based on intracavity frequency doubling of Nd: YGG laser[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(3):527-530.
- [21] LI Y L, LI J H, LIU X H, et al. Diode-pumped Nd: YGG continuous-wave laser at 1.33 μm [J]. *Laser Physics*, 2012, 22(3):531-534.
- [22] WU K, YAO B, ZHANG H J, et al. Growth and properties of Nd: $\text{Lu}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ laser crystal by floating-zone method[J]. *J Cryst Growth*, 2010, 312(24): 3631-3636.
- [23] ZHANG J, TAO X T, DONG C M, et al. Crystal growth, optical properties, and CW laser operation at 1.06 μm of Nd: GAGG crystals[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 6(5): 355-358.
- [24] ZHI Y C, DONG C M, ZHANG J, et al. Continuous-wave and passively Q-switched laser performance of LD-end-pumped 1062 nm Nd: GAGG laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8):7584-7589.
- [25] AGNESI A, PIRZIO F, REALI G, et al. Multi-wavelength Nd: GAGG picosecond laser[J]. *Optical Materials*, 2010, 32(9):1130-1133.
- [26] LI Y B, JIA Z T, YANG Y, et al. Diode-end-pumped passively mode-locked Nd: GAGG laser at 1.3 μm with SESAM[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(8): 557-560.
- [27] 孙敦陆, 张庆礼, 王召兵, 等. Nd: GSGG 激光晶体的光谱性能研究[J]. *量子电子学报*, 2005, 22(4): 570-573.
- [28] BRANDLE C D, BARNES R L. Crystal stoichiometry and growth of rare-earth garnets containing scandium [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1973, 20(1):1-5.
- [29] CAFFEY D P, UTANO R A. Diode array side-pumped neodymium-doped gadolinium scandium gallium garnet rod and slab lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(9): 808-810.
- [30] 罗建乔, 吴路生, 马明俊, 等. 激光二极管纵向抽运 Nd: GSGG 全固化激光器的输出特性[J]. *中国激光*, 2007(2):191-194.
- [31] TIAN L, WANG S X, WU K, et al. Thermal, spectroscopic and laser properties of Nd^{3+} in gadolinium scandium gallium garnet crystal produced by optical floating zone method[J]. *Optical Materials*, 2013, 36(2):521-528.
- [32] 郭强, 张少飞, 王瑾. Nd, Cr: GSGG 激光棒在应用方面的研究[J]. *光学技术*, 2006, 32(S1):146-147.
- [33] JIA Z T, TAO X T, YU H H, et al. Growth and properties of Nd: $(\text{Lu}_x\text{Gd}_{1-x})_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ laser crystal by czochralski method[J]. *Optical Materials*, 2008, 31(2):346-349.
- [34] FU X W, JIA Z T, YANG H, et al. Continuous wave and passively Q-switched laser performance of Nd: $\text{Lu}_x\text{Gd}_{3-x}\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ crystal at 1062 nm[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(10):704-708.
- [35] YANG H, JIA Z T, ZHANG B T, et al. Diode pumped CW and passively Q-switched Nd: LGGG laser at 1062nm[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(5): 1-5.
- [36] FU X W, JIA Z T, LI Y B, et al. Crystal growth and

- characterization of $\text{Nd}^{3+} : (\text{La}_x \text{Gd}_{1-x})_3 \text{Ga}_5 \text{O}_{12}$ laser crystal[J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(9): 1242-1253.
- [37] YANG H, FU X W, JIA Z T, et al. Continuous-wave and passively Q-switched laser performance of $\text{Nd} : (\text{La}_x \text{Gd}_{1-x})_3 \text{Ga}_5 \text{O}_{12}$ crystal at 1062nm [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(10): 704-708.
- [38] 王祎然. LD泵浦石榴石晶体激光脉冲特性研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- [39] KAMINSKII A A, BOULON G, BUONCRISTIANI M, et al. Spectroscopy of a new laser garnet $\text{Lu}_3 \text{Sc}_2 \text{Ga}_3 \text{O}_{12} : \text{Nd}^{3+}$ [J]. Intensity luminescence characteristics, stimulated emission, and full set of squared reduced-matrix elements $|\langle U(t) \rangle|^2$ for Nd^{3+} ions[J]. *Physica Status Solidi: A*, 1994, 141(2): 471-494.
- [40] 武奎. 石榴石 $\text{A}_3 \text{B}_2 \text{C}_3 \text{O}_{15}$ 系列晶体生长及性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [41] GAO J Y, ZHANG Q L, SUN D L, et al. Energy levels fitting and crystal-field calculations of Nd^{3+} doped in GYSGG crystal[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(21-22): 4420-4426.
- [42] 蔡旭武, 王礼, 杨经纬, 等. LD端面抽运 $\text{Nd} : \text{GYSGG}$ 最佳增益长度分析与实验研究[J]. *激光技术*, 2014, 38(1): 83-86.
- [43] 孙崇玲. $\text{Nd} : \text{GYSGG}$ 晶体激光特性的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [44] ZHONG K, SUN C L, YAO J Q, et al. Efficient continuous-wave 1053 nm $\text{Nd} : \text{GYSGG}$ laser with passively Q-switched dual-wavelength operation for terahertz generation [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, 49(3): 375-379.
- [45] SONG Q, WANG G J, ZHANG B Y, et al. Diode-pumped passively dual-wavelength Q-switched $\text{Nd} : \text{GYSGG}$ laser using graphene oxide as the saturable absorber [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 2688-2692.
- [46] WANG B L, TIAN L, YU H H, et al. Energy enhancement of mixed $\text{Nd} : \text{LuYSGG}$ crystal in passively Q-switched lasers [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3213-3216.
- [47] LUPEI A, LUPEI V. Spectroscopy and energy transfer characteristics of Nd^{3+} in CNGG [J]. *Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering*, 2001, 4430: 62-70.
- [48] VORONKO Y K, SOBOLOV A A, KARASIK A Y, et al. Calcium niobium gallium and calcium lithium niobium gallium garnets doped with rare earth ions-effective laser media[J]. *Optical Materials*, 2002, 20(3): 197-209.
- [49] 马小涛, 李瑞宁, 来引娟, 等. 激光二极管抽运掺铈钙铌石榴石激光器的研究[J]. *光学学报*, 2003(1): 50-52.
- [50] 张辉荣, 徐观峰, 李斌. $\text{Nd} : \text{CNGG}$ 晶体的生长及其性能研究[J]. *激光技术*, 2005, 29(6): 599-600.
- [51] MUKHOPADHYAY P K, RANGANATHAN K, GEORGE J, et al. 1.6 W of TEM₀₀ CW output at 1.06 μm from $\text{Nd} : \text{CNGG}$ laser end-pumped by a fiber-coupled diode laser array [J]. *Opt Laser Technol*, 2003, 235(3): 173-180.
- [52] LI Y L, JIANG H L, NI T Y, et al. Efficient 1061 and 1329 nm laser emission of $\text{Nd} : \text{CNGG}$ lasers under 885 nm diode pumping into the emitting level[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(3): 485-488.
- [53] 施玉显, 卢铁林, 冯宝华, 等. 885 nm 和 808 nm LD 抽运 $\text{Nd} : \text{CNGG}$ 935 nm 激光器热效应研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 17-21.
- [54] LI Y L, JIANG H L, NI T Y, et al. Diode-pumped quasi-three-level $\text{Nd} : \text{CLNGG}$ laser at 928 nm [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(4): 648-651.
- [55] YU H H, ZHANG H J, WANG Z P, et al. Continuous-wave and passively Q-switched laser performance with a disordered $\text{Nd} : \text{CLNGG}$ crystal [J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 19015-19020.
- [56] YU H H, ZHANG H J, WANG Z P, et al. High-power dual-wavelength laser with disordered $\text{Nd} : \text{CNGG}$ crystals [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(2): 151-153.
- [57] 石自彬. 无序激光晶体 $\text{Nd} : \text{CNGG}$ 和 $\text{Nd} : \text{CLNGG}$ 的生长及性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [58] XIE G Q, QIAN L J, YUAN P, et al. Generation of 534 fs pulses from a passively mode-locked $\text{Nd} : \text{CLNGG-CNGG}$ disordered crystal hybrid laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(7): 483-486.
- [59] GUO S Y, YUAN D R, ZHANG X Q, et al. Growth and characterizations of calcium tantalum gallium garnet single crystal [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2008, 311(1): 214-217.
- [60] XIE G Q, TANG D Y, TAN W D, et al. Diode-pumped passively mode-locked $\text{Nd} : \text{CTGG}$ disordered crystal laser [J]. *Applied Physics B*, 2009, 95(4): 691-695.
- [61] KAMINSKII A A, UEDA K, TEMPLE D, et al. Spectroscopy and continuous wave near-infrared

stimulated emission of new yttrium gallium garnet $Y_3(Y,Ga)Ga_3O_{12}:Nd^{3+}$ ($YGaO_3:Nd^{3+}$) [J]. Optical Review, 2000,7(2): 101-111.

[62] PADLYAK B, RYBAROMANOWSKI W, LISIECKI R. Optical spectroscopy and local structure of the Nd^{3+} luminescence centres in glasses of the $CaO-Ga_2O_3-GeO_2$ system[J]. Optica Applicata, 2008, 38(1):189-202.

[63] SHCHERBA I D, KOSTYK L V, NOGA H, et al. X-ray spectra and electronic structure of the $Ca_3Ga_2Ge_3O_{12}$ compound[J]. Solid State Sciences, 2017, 71: 1-2.

[64] ES'KOV N A, OSIKO V V, SOBOL' A A, et al. A new laser garnet $Ca_3Ga_2Ge_3O_{12}-Nd^{3+}$ [J]. Inorganic Materials. 1978,14(12): 1764-1765.

[65] JAQUE D, CALDINO U, ROMERO J J, et al. Influence of neodymium concentration on the CW laser properties of Nd doped $Ca_3Ga_2Ge_3O_{12}$ laser garnet crystal[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 86(12): 6627-6633.

[66] MONTES M, HERAS C D L, JAQUE D. Passive Q-switching of a diode pumped Nd^{3+} : CGGG crystal: Benefits of inhomogeneous line broadening and short pulse generation[J]. Optical Materials, 2006, 28(4): 408-414.

[67] BELOVOLOV M I, SHATALOV A F. Lasing from a solid-state $Ca_3Ga_2Ge_3O_{12}:Nd^{3+}$ laser at a high power of diode pumping [J]. Technical Physics, 2008, 53(11): 1513-1514.

Research progress on Nd-doped gallium-containing garnet crystals

LIU Yunlian, DI Juqing, ZHU Liu, WANG Chunquan, TENG Fei
National Engineering & Technology Research Center of Scattered Metals,Vital Materials Co. , Ltd. ,Qingyuan 511517, China

Abstract: Nd-doped gallium-containing garnet crystals have been widely used in ultra-short, ultra-fast, high power, continuous wave, multi-wavelength lasers, and more research attention has recently been received. In this paper, the research progress of Nd-doped gallium-containing garnet crystals is reviewed, including conventional gallium-containing garnet crystals, gallium-containing garnet mixed crystals and multi-center disordered gallium-containing garnet crystals.

Key words: gallium-containing garnet crystal;Nd-doped;laser performance