

文章编号: 0258-7025(2010)09-2278-11

被动调 Q 掺 Yb^{3+} 激光材料固体微片 激光器的研究进展

董俊 马剑

(厦门大学信息科学与技术学院电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要 激光二极管抽运的被动调 Q 固体激光器不仅结构简单、紧凑, 而且由于采用端面抽运的方式有效地耦合了抽运光和激光可以获得高光束质量的激光输出, 同时由于其独特的短腔长从而可以实现亚纳秒、高峰值功率的激光输出。在激光加工、激光通信、医疗、生物和材料微结构分析等方面有非常广阔的应用前景。在过去的十多年里, 采用掺镱离子(Yb^{3+}) 的激光材料作为激光增益介质, 用 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 和半导体可饱和吸收镜等作为被动调 Q 开关的被动调 Q 微片激光器取得了长足的进展, 不仅获得与基于掺钕离子激光材料作为增益介质所实现的相同的高峰值功率被动调 Q 激光输出, 而且在激光效率及激光设计的灵活性方面凸显出了明显的优点。系统地介绍了基于掺 Yb^{3+} 离子激光材料作为激光增益介质实现被动调 Q 微片激光器的研究进展及其在未来的发展趋势。

关键词 激光器; 微片激光器; 掺镱激光材料; 被动调 Q ; 高峰值功率; 可饱和吸收体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2278

Advances in Passively Q -Switched Yb^{3+} -Doped Laser Materials Microchip Solid-State Lasers

Dong Jun Ma Jian

(Department of Electronics Engineering, School of Information Science and Technology,
Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract Laser-diode pumped passively Q -switched solid-state lasers, with compact configuration, excellent beam quality owing to good match-up of pump and laser light, easy to achieve sub-nanosecond pulse width and high peak power, have widely applications in laser processing, telecommunications, surgery, biology, material microstructure analysis and so on. In the past decade, dramatic progresses have been made in passively Q -switched solid-state lasers based on ytterbium doped laser material and saturable absorber such as $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$, semiconductor saturable absorber mirror (SESAM). Passively Q -switched Yb^{3+} doped solid-state lasers have achieved not only the same high peak power output, but also with better efficiency and flexible designs. The progresses and future work on passively Q -switched Yb^{3+} doped laser materials microchip lasers have been overviewed.

Key words lasers; microchip lasers; ytterbium doped laser materials; passively Q -switched; high peak power; saturable absorber

1 引言

激光二极管抽运的固体激光器由于具有光束质量高的优点, 特别是通过采用调 Q 方式可以产生高能量的脉冲激光输出, 在机械加工、军事、通信、医疗及科研等领域得到了非常广泛的应用。由于被动调 Q 具有体积小、易调节、不需要腔外能量补给和偏振输出等特点而比主动调 Q 更加优越, 如今的调 Q 激光

器, 脉冲宽度可以压缩到亚纳秒量级, 峰值功率已达到兆瓦量级, 特别是调 Q 的 $\text{Nd} : \text{YAG}$ 和其他掺 Nd^{3+} 的激光由于比非调 Q 激光具有更高的脉冲能量和峰值功率($\text{kW} \sim \text{MW}$), 在科研、军事、工业、医疗等领域具有更为广泛的应用价值。如激光测距、遥感、非线性光学处理、材料加工和污染监控等方面。目前用于被动调 Q 的可饱和吸收体主要有 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$

收稿日期: 2010-04-19; 收到修改稿日期: 2010-06-11

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0669)资助课题。

作者简介: 董俊(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光陶瓷材料的制备及固体激光技术等方面的研究。

E-mail: jdong@xmu.edu.cn

晶体、半导体可饱和吸收镜(SESAM)及其他具有可饱和吸收特性的半导体材料。相对于SESAM及其他半导体材料而言,Cr⁴⁺:YAG可饱和吸收体由于具有高的损伤阈值、成本低和结构简单等优点而在被动调Q固体激光器中得到了广泛的应用。用Cr⁴⁺:YAG作为可饱和吸收体可以实现高效率、高功率、集成化、小型化和结构紧凑的调Q激光器。而目前这些激光器所用的激光介质主要是掺Nd³⁺的激光晶体,如Nd:YAG,Nd:YVO₄,尽管可以获得高功率、亚纳秒的激光脉冲输出,但是激光的光-光转换效率很低,通常只有5%左右。

基于能源保护的考虑,用尽可能少的能源获取尽可能多的有用能量也是目前研究固体激光器所要考虑的重点,即要获得高的激光输出效率。因此寻找适合高效被动调Q脉冲激光输出的新型激光增益介质成为当前被动调Q固体激光器的一个研究热点。与掺Nd³⁺的激光增益介质相比,掺Yb³⁺的激光增益介质在被动调Q激光器中具有更加优良的特性:1)小的发射截面(大约只有Nd:YAG晶体的十分之一),适合于高能量的激光脉冲输出;2)非常长的荧光寿命,适合储能;3)热性能也比Nd:YAG要好,非常适合于高功率激光输出。小的发射截面和长的荧光寿命在被动调Q激光器的设计与应用中可以获得高的激光脉冲能量输出,非常适合应用于小型化、集成化高功率脉冲微片激光器,可以获得高效的激光输出。而且采用掺Yb³⁺的激光材料作为被动调Q固体激光器的增益介质已经获得了高转换效率、亚纳秒、高功率的脉冲激光输出。因此采用掺Yb³⁺的激光材料作为被动调Q微片激光器的增益介质,不仅可以获得高的脉冲能量和短的脉宽激光输出,而且还可以保持高的光-光转换效率。本文详细阐述了基于掺Yb³⁺激光材料(激光晶体材料、透明激光陶瓷及激光玻璃)的被动调Q微片固体激光器的研究进展及其以后的发展趋势。

2 高功率微片固体激光器的研究现状及应用

激光二极管抽运的被动调Q微片激光器由于采用非常短的腔型,容易获得短脉冲激光输出,而且由于采用端面抽运的方式,抽运光和激光的光束有效地耦合,激光的输出光束质量好、效率高。20世纪90年代初J. J. Zayhowski^[1,2]就提出了微片激光器的概念并付诸于实践,用Nd:YAG作为激光

增益介质,Cr⁴⁺:YAG晶体作为可饱和吸收体对被动调Q微片激光器进行了一系列系统的研究。用功率为1W的光纤耦合的激光二极管作为抽运源,获得了脉冲宽度为400ps,脉冲能量高达14μJ,峰值功率高达30kW的被动调Q脉冲序列。采用不同初始透射率的Cr⁴⁺:YAG晶体作为可饱和吸收体还获得了脉冲宽度短达218ps,脉冲能量为4μJ的脉冲序列。这些微片激光器主要运行在重复频率8~15kHz的范围内而且具有理想的模式特性,脉冲之间的幅度波动低于0.05%。B. Braun等^[3]用半导体作为可饱和吸收体,Nd:YAG作为增益介质获得了脉冲宽度为56ps,脉冲能量为62nJ的被动调Q脉冲序列。J. J. Zayhowski^[4]研制出了用输出功率为12W的光纤耦合的二极管激光器阵列抽运的被动调Q微片激光器,这种激光器可以产生脉冲功率高达160μJ,脉冲宽度为640ps的单频TEM₀₀亚纳秒脉冲激光。通过在这个激光器的输出耦合镜附近放置适当取向5mm长的KTP晶体,得到二次谐波的转换效率为55%,并且获得了在532nm处86μJ的脉冲;同样把适当取向5mm长的BBO晶体放置在532nm输出光后面,绿光到紫外的转换效率为44%,而且获得了266nm处脉冲能量为38μJ的脉冲序列。这样可以得到从基波到四次谐波范围内20%的转换效率。高功率被动调Q的微片激光器未聚焦的1.064μm激光输出已经被用于驱动周期极化的铌酸锂光学参量放大器(OPA),其覆盖的波段范围为1.3~5μm。此外,高功率微片激光器二次谐波抽运的光学参量振荡器(OPO)在700~2000nm的信号和闲频范围内已经正常运行^[5]。光学参量放大器和光学参量振荡器的输出具有极佳的模式质量和高的峰值功率,适合于有效的谐波转换。光学谐振设备及其谐波器覆盖了微片激光器系统250nm~5μm的光谱范围。通过倍频手段,微片激光器抽运的具有谐波特性的光学参量振荡器的波长输出范围已经扩展到了大约190nm。最近,A. Agnesi等^[6]报道了用Cr⁴⁺:YAG晶体被动调Q的Nd:GdVO₄微片激光实验,获得了脉冲输出能量为0.5mJ,脉冲宽度为420ps,峰值功率高达1.2MW的调Q脉冲激光。但是这个激光器的效率还是比较低,只有5%。H. Sakai等^[7]最新报道了采用Cr⁴⁺:YAG晶体作为可饱和吸收体,Nd:YAG晶体作为激光增益介质,端面抽运方式下获得了高光束质量($M^2=1.36$),峰值功率高达2.1MW的被动调Q激光输出。

被动调 Q 的微片激光器使得在实验室外和野外复杂的激光实验变得容易,而且可以被用于各种不同的场合。这种短脉冲通常被用于高精度测量、三维成像、目标识别以及智能机器人等方面。短的脉宽和理想的模式特性也可被用于进一步挖掘材料的特性。高的峰值功率可用于光蚀刻材料,从而导致其在激光诱导的破坏光谱学和微机械加工方面的应用,高的峰值功率也能设计结构更加紧凑的非线性光学系统。特别是紫外系统已经被用于包括环境监测在内的各种不同应用的荧光光谱学。正如激光系统本身一样,基于被动调 Q 微片激光器的系统具有小型化、高效率、耐用和价格便宜等优点,使得它们成为现场应用的理想选择。但是以上所研制的这些微片被动调 Q 激光器由于主要是采用 Nd: YAG 晶体作为激光增益介质,激光的输出效率低下,光-光转换效率还不到 5%^[2,6,8,9]。因此有待于寻求新的激光增益介质来实现高转换效率的高峰值功率激光输出。

3 基于掺 Yb³⁺ 激光材料的被动调 Q 固体微片激光器的研究现状

3.1 掺 Yb³⁺ 的激光晶体材料作为激光增益介质的被动调 Q 微片激光器

由于掺 Nd³⁺ 的激光晶体的发射截面积大、荧光寿命短,而且荧光寿命随 Nd³⁺ 掺杂浓度的增加而大幅缩短,非常不利于用调 Q 方式获得高的脉冲能量;而且用 808 nm 激光抽运时,掺 Nd³⁺ 的激光材料的量子效率低,在激光工作时的散热问题严重,因此研究人员逐渐在探索掺杂其他不同稀土离子的

激光材料用于实现高能量脉冲激光输出。用 940 nm 激光二极管抽运, Yb: YAG 的量子效率高,因此掺 Yb³⁺ 的激光材料就成为了其中的一个研究热点。国内外的科研人员采用 Yb³⁺ 掺杂的激光材料获得了高效的激光输出及调 Q 脉冲激光输出^[10~13]。表 1 列出一些常用的掺钇离子和镱离子激光材料,如 Yb³⁺: YAG 和 Yb³⁺: YAB, Nd³⁺: YAG, Nd³⁺: YVO₄ 等的光学性能及热性能参数,通过对比可以看出掺 Yb³⁺ 的激光材料在用于 Cr⁴⁺: YAG 被动调 Q 微片激光器中的优势。1993 年 T. Y. Fan 等^[14] 用 1.1 mm 厚两面平行、掺杂原子数分数为 15% 的 Yb: YAG 晶体作为增益介质,用镀有增透膜 1.1 cm 长的 LiNbO₃ 晶体与一个薄膜偏振片以及一个 M4(QWP) 的组合作为电-光调 Q 开关,首次用 InGaAs 激光二极管作为抽运源,获得了 1030 nm 的调 Q 脉冲激光输出。在重复频率约为 1.1 kHz 的情况下,获得的脉冲能量为 72 μ J, 脉冲宽度 (FWHM) 为 11 ns。1995 年 D. S. Sumida^[15] 用掺杂原子数分数为 15% 的 Yb: YAG 晶体作为增益介质,晶体的尺寸为 0.8 mm \times 4.5 mm \times 2.6 mm, 用 InGaAs 激光二极管抽运,在输入能量为 200 mJ 的情况下,获得了高重复频率 100 kHz 的调 Q 激光输出,单个脉冲的能量为 0.03 mJ。1999 年 E. C. Honea 等^[16] 用声-光调 Q 的方式对 Yb: YAG 晶体进行了激光二极管抽运的调 Q 激光实验,在激光二极管的输入功率为 2250 W 时,获得了脉冲宽度为 73 ns, 重复频率为 5 kHz 的调 Q 激光输出,输出的功率为 183 W。

表 1 各种常用于被动调 Q 微片激光器的激光材料的光学及热性能对比

Table 1 Optical and thermal properties of laser materials used in passively Q -switched lasers

Laser materials	λ_p /nm	λ_l /nm	$\sigma_a/(10^{-20} \text{ cm}^2)$	$\sigma_e/(10^{-20} \text{ cm}^2)$	$\tau/\mu\text{s}$	$\Delta\lambda_p/\text{nm}$	$\Delta\lambda_l/\text{nm}$	$k/[W/(m^2 \cdot K)]$	References
Yb: YAG	941	1030	0.8	2.3	951	18	8	14	[17, 18]
Yb: LuAG	940	1030	0.77	2.8	1100	22.5	8.4	8	[19]
Yb: YSAG	943.5	1031	0.73	1.8	1100	24.2	14	12	[20]
Yb: YAB	976	1040	3.4	0.8	680	20	-	4	[21]
S-FAP	900	1047	9	6	1140	-	5	2	[22]
Yb: KGW	981	1024	5.3	2.8	600	3.7	20	3	[23]
Yb: KYW	981	1024	13.3	3	600	-	20	3.3	[24]
Yb: GGG	941	1025	0.5	2	800	18	12	8	[25]
Yb: Y ₂ O ₃	978	1031	2.4	0.85	850	-	-	14	[26]
Yb: NaYW	975	1000	1.84(σ) 2.52(π)	1.3(σ) 3.4(π)	392	-	-	1.06	[27]
Nd: YAG	808	1064	67	28	230	< 2	0.6	14	[18]
Nd: YVO ₄	808	1064	27	120	90	4	0.96	5.1	[28]

Notes: λ_p and λ_l are the peak pump and laser wavelength. σ_a and σ_e are the absorption and emission cross section. τ is the fluorescence lifetime. $\Delta\lambda_p$ and $\Delta\lambda_l$ are the absorption and emission spectral bandwidth (FWHM). k is the thermal conductivity.

1999年G. J. Spuhler等^[12]首次用半导体可饱和吸收体腔镜(SESAM)作为被动调Q开关,实现了Yb: YAG晶体的被动调Q激光输出。被动调Q的激光实验装置如图1所示。Yb: YAG晶体掺杂原子数分数为20%,厚度为0.2 mm;采用968 nm激光二极管作为抽运源,在抽运功率为485 mW的情况下获得了13 mW的激光输出,实现了单个脉冲能量为1.1 μJ,脉冲宽度(FWHM)为530 ps的调Q脉冲(如图2所示),相对应的峰值功率为2.1 kW,重复频率为12 kHz。2000年A. A. Lagatsky等^[13]首次用Cr⁴⁺: YAG晶体作为可饱和吸收体对Yb: KGW晶体进行了被动调Q实验,获得了1026 nm的调Q激光输出。在二极管激光器抽运的被动调Q Yb: KGW的激光实验中,Lagatsky等得到了脉宽85~130 ns,重复频率3~20 kHz变化的被动调Q激光输出,脉冲能量为3.5 μJ,而且输出功率转换效率高达10%。2001年J. Dong等^[11]用Cr⁴⁺: YAG晶体作为可饱和吸收体对Yb: YAG晶体进行了被动调Q实验,获得了1030 nm的调Q激光输出。他们采用发射波长940 nm,输出功率约1 W的连续Mira900钛宝石激光器作抽运源,室温下用Cr: YAG晶体作为可饱和吸收体,实现了Yb: YAG晶体的被动调Q激光输出。激光实验装置采用由凹面镜M1,Yb: YAG晶体和平面镜M2组成的折叠腔。M1面对入射光的平面镀940 nm增透膜,凹面镀1.03 μm高反膜,放置在Yb: YAG晶体入射面的前面作为激光腔的后腔镜。0.5 mm厚的Yb: YAG晶体作为激光增益介质,Yb: YAG晶体的掺杂原子数分数为20%,抛光成平-平结构,一面镀940 nm和1.03 μm的增透膜,另一面镀940 nm和1030 nm的高反膜,Cr:

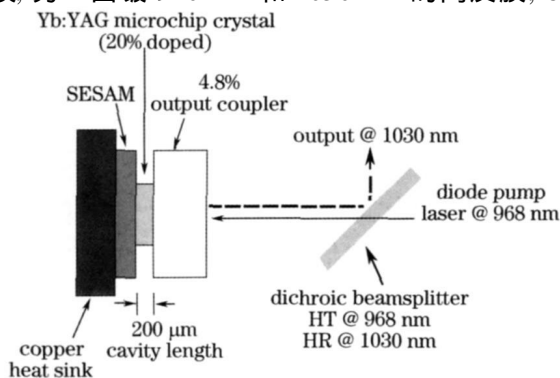


图1 SESAM被动调Q Yb: YAG微片激光器的实验装置图

Fig.1 Schematic diagram of passively Q-switched Yb: YAG microchip laser with SESAM

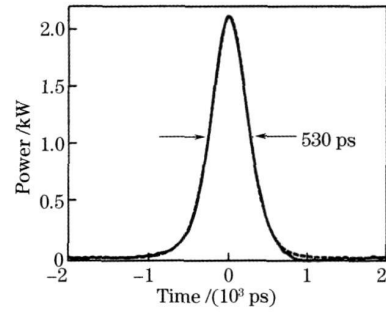


图2 激光脉冲波形

Fig.2 Profile of laser pulse

YAG晶体紧贴在Yb: YAG晶体上作被动调Q开关。M2镀940 nm的高反膜和在1.03 μm反射率为97%的部分反射膜作为输出耦合镜。实验得出抽运阈值功率约为400 mW,抽运光为800 mW时,得到了脉冲宽度0.32 μs,重复频率20 kHz,能量为3.2 μJ的调Q激光器脉冲。但是由于当时实验条件的限制,激光的效率很低。

2002年D. Y. Shen等^[29]将一个GaAs晶片同时作为Yb: YAG激光器的可饱和吸收体和输出耦合镜进行被动调Q,使激光器结构更紧凑。抽运源为光纤耦合的中心波长940 nm,最大输出功率15 W的激光二极管阵列,掺杂原子数分数为5%的Yb: YAG晶体作为激光增益介质,晶体的尺寸为φ3 mm×2 mm,晶体的一面镀1.03 μm高反膜及940 nm增透膜作为谐振腔输入镜,另一面镀1.03 μm增透膜及940 nm高反膜以减少腔内损耗和增加对抽运光的吸收。在12.2 W的抽运光下,获得了峰值75.6 μJ的稳定脉冲激光输出,脉冲宽度为15.5 ns,重复频率为7.3 kHz,最高峰值功率为4.9 kW。2003年Q. Liu等^[30]报道的一种侧面抽运被动调Q Yb: YAG激光器,是将一块GaAs晶片用作可饱和吸收体和布儒斯特板。抽运源为8根1 cm长、峰值功率60 W的InGaAs激光二极管组成的阵列,抽运掺杂原子数分数为5%,尺寸为8 mm×3 mm×1 mm的Yb: YAG激光晶体。当激光二极管在941 nm波长处的抽运能量为175 mJ时,产生13个1.03 μm的单模调Q脉冲激光输出,第一个脉冲的宽度为120 ns,峰值功率为83 W。同年,他们采用Cr⁴⁺: YAG晶体作为可饱和吸收体和输出耦合镜实现了微片Yb: YAG被动调Q激光输出^[31]。在实验中采用厚度为0.6 mm,掺杂原子数分数为10%的Yb: YAG作为激光增益介质,获得了脉冲能量为1.7 μJ,脉冲宽度为15 ns的被动

调 Q 激光脉冲输出, 相应的峰值功率为 110 W, 调 Q 激光器的工作重复频率为 2 kHz。

由于激光晶体 Yb: YAG 和可饱和吸收体 Cr⁴⁺: YAG 具有相同的基质材料 YAG, 因而, 更简洁紧凑的被动调 Q 微片激光器设计方式是通过在 YAG 基质中共掺镜离子和铬离子来实现自调 Q 激光输出的。1999 年 J. Dong 等^[32,33] 生长出了 Cr, Yb: YAG 自调 Q 激光晶体并对其光学性能进行了详细的报道。2002 年 J. Dong 等^[34] 采用高光束质量的钛宝石可调谐激光器作为抽运源, 实现了 Cr, Yb: YAG 自调 Q 激光的输出。2005 年 J. Dong 等^[35] 报道了激光二极管抽运的 Cr, Yb: YAG 自调 Q 激光器。激光腔为平-凹腔, 1 mm 厚的 Yb, Cr: YAG 晶体中 Cr⁴⁺ 和 Yb³⁺ 掺杂原子数分数分别为 0.025% 和 10%, Cr⁴⁺ 可饱和吸收体在 1030 nm 的初始透射率为 89%。晶体一面镀 940 nm 减反膜 1030 nm 全反膜作为谐振腔的输入镜, 另一面镀 1030 nm 减反膜 940 nm 全反膜减少腔内损耗。输出激光脉冲能量为 11.2 μJ, 脉冲宽度 12.3 ns, 重复频率为 6.3 kHz。最高平均输出功率 70 mW, 斜率效率 12.5%, 光-光转换效率 7%。随后 J. Dong 等^[36] 采用 Cr, Yb: YAG 自调 Q 激光晶体作为激光增益介质实现了激光二极管抽运的 Cr, Yb: YAG 微片自调 Q 激光输出, 其激光实验装置如图 3 所示, 获得了 440 ps, 23.5 μJ, 峰值功率高达 53 kW 的脉冲激光, 但是由于在 Yb: YAG 晶体中共掺了 Cr⁴⁺, 晶体的缺陷增多, 激光的阈值高, 而且 Cr⁴⁺ 在 Yb³⁺ 的吸收带有很强的吸收, 对于有效利用抽运光造成了很大的影响, 因此激光器的效率低。通过深入的研究表明, 如果进一步增加 Cr⁴⁺ 浓度, 不仅激光输出效率更低, 甚至不能获得激光输出, 因此双掺 Cr, Yb: YAG 自调 Q 材料不适合通过增加 Cr⁴⁺ 离子的浓度来实现高峰值功率、亚纳秒激光脉冲输出。

而基于微片激光器的原理, 采用“Yb: YAG-Cr⁴⁺: YAG-output coupler”的三明治结构(如图 4 所

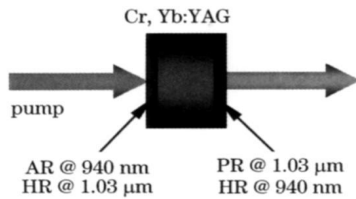


图 3 激光二极管抽运的 Cr, Yb: YAG 自调 Q 微片激光器

Fig. 3 LD pumped Cr, Yb: YAG self Q-switched microchip lasers

示)可以构造结构紧凑的激光二极管抽运微片激光器, 实现高峰值功率、亚纳秒、高光束质量激光输出。2006 年 J. Dong 等^[37] 采用不同掺杂浓度的 Cr⁴⁺: YAG 晶体作为可饱和吸收体, 对 Yb: YAG 晶体进行一系列的被动调 Q 微片激光器及倍频绿光输出的研究, 获得了光-光转换效率高达 27%, 脉冲宽度为 480 ps, 峰值功率高达 27 kW 的调 Q 脉冲激光, 而且通过腔外倍频技术获得了 155 mW 的倍频 515 nm 绿光输出。2007 年 J. Dong 等^[38] 采用 Yb: LuAG 作为激光增益介质, 用 Cr⁴⁺: YAG 晶体作为可饱和吸收体首次获得了高效率、亚纳秒的脉冲激光输出, 光-光转换效率高达 40%, 脉冲宽度为 610 ps。2008 年 J. Dong 等^[39] 研究另外一种掺杂 Yb³⁺ 的激光晶体 Yb: Y₃Sc₂Al₃O₁₂(Yb: YSAG), 用 Cr⁴⁺: YAG 晶体作为可饱和吸收体实现了被动调 Q 激光输出。研究表明由于用更大的 Sc³⁺ 离子部分取代了 Al³⁺, YSAG 的吸收谱和发射谱比 YAG 晶体更宽。输出激光脉冲的能量、宽度及重复频率分别为 31 μJ, 2.5 ns, 12.7 kHz, 峰值功率超过 12 kW。

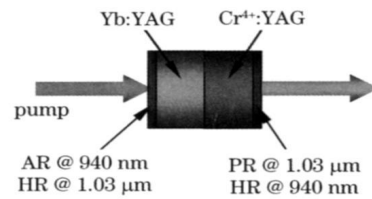


图 4 激光二极管抽运的“Yb: YAG-Cr⁴⁺: YAG-output coupler”三明治结构微片激光器

Fig. 4 LD pumped Yb: YAG-Cr⁴⁺: YAG-output coupler sandwiched microchip lasers

尽管 Yb: YAG 激光晶体作为一种优良的激光增益介质, 在用 Cr⁴⁺: YAG, SESAM 和 GaAs 半导体作为可饱和吸收体的被动调 Q 固体激光器中占据了重要的地位并得到了广泛的应用, 探索其他性能优良的掺 Yb³⁺ 激光晶体在被动调 Q 固体激光器中的应用一直是激光材料专家和固体激光专家研究的重心, 下面介绍一些用于被动调 Q 固体激光器的掺 Yb³⁺ 的激光晶体材料在被动调 Q 激光器中的应用。

2005 年 J. H. Liu 等^[39] 采用 Cr⁴⁺: YAG 晶体作为可饱和吸收体, 用 Yb: KLu(WO₄)₂ 晶体作为激光增益介质实现了高效的被动调 Q 激光输出, 获得了脉冲宽度为 1.41 ns, 脉冲能量为 32.4 μJ, 峰值功率高达 23 kW 的 1030.6 nm 基波激光输出, 同时还得到了脉冲宽度为 0.71 ns, 脉冲能量为 14.4 μJ,

峰值功率高达 15.2 kW 的 1137.6 nm 的拉曼激光输出。在抽运功率为 7 W 的情况下,获得了 0.9 W 的基波及 0.4 W 的拉曼激光输出,相应的基波和拉曼激光输出的光-光转换效率为 12.9% 和 5.7%。2005 年 X. Y. Zhang 等^[40]报道了 Yb: GGG 晶体用 Cr⁴⁺: YAG 作为可饱和吸收体被动调 Q 激光的实验和理论分析结果。在抽运光为 4 W 情况下,通过改变其他实验参数,获得输出激光脉冲宽度为 23~29 ns,脉冲能量为 37~97 μJ,重复频率为 2~11 kHz,平均输出功率为 200~400 mW。2007 年 J. H. Liu 等^[41]采用 Cr⁴⁺: YAG 晶体作为可饱和吸收体,用 Yb: NaGd(WO₄)₂ 晶体作为激光增益介质实现了高效的被动调 Q 激光输出,获得了重复频率为 13.3 kHz,脉冲宽度为 33 ns,脉冲能量为 154 μJ,峰值功率高达 4.67 kW 的 1018.3 nm 激光输出。在吸收的抽运功率为 7.7 W 的情况下获得了 2.05 W 的平均输出功率,斜率效率高达 40%,光-光转换效率高达 27%。2007 年 A. Brenier 等^[42]报道了用初始透射率为 96% 的 Cr⁴⁺: YAG 晶体作为可饱和吸收体对非线性激光晶体 Yb: GdAl₃(BO₃)₄(Yb: GAB)被动调 Q 获得激光脉冲输出。在不同实验条件下(输出耦合率为 2% 和 4%)获得 25% 和 39.5% 的斜率效率,获得的激光脉冲重复频率范围在 1~4.5 kHz,脉冲能量为 125 μJ 和 165 μJ,脉冲宽度约 30 ns。2007 年 Y. Kalisky 等^[43]研究了用 Cr⁴⁺: YAG 晶体作为可饱和吸收体的被动调 Q Yb: YAG, Yb: Gd₃Ga₅O₁₂(GGG), Yb: KGd(WO₄)₂(KGW), Yb: KY(WO₄)₂(KYW) 激光器,比较了它们的性能。被动调 Q 掺杂原子数分数为 5.7% 的 Yb: GGG 激光器在 30 W 抽运光下输出平均功率为毫瓦量级的激光脉冲,脉冲宽度 5.7 ns。由于信号很弱,无法测得 Q 开关运作下的调制频率。被动调 Q Yb: YAG(原子数分数 10%)激光器在 31 W 抽运光下输出平均功率为 1.32 W,斜率效率 12.8% 的激光脉冲,调制频率 13 kHz,脉冲宽度 22 ns,单脉冲能量约 100 μJ,峰值功率 4.5 kW。被动调 Q Yb: KGW 和 Yb: KYW(原子数分数均为 10%)的实验结果很接近,其中 Yb: KYW 激光器的被动调 Q 输出脉冲调制频率为 1~8 kHz,脉冲宽度 42~63 ns,输出平均功率 60~70 mW,斜率效率 41%。由于在实验中采用的抽运光束直径比较大,晶体的热效应比较严重,因而激光器的效率并不是很高,有待于进一步的提高。2007 年 J. H. Liu 等^[44]报道了一种 Yb: NaY(WO₄)₂(Yb: NaYW) 激光器。

用 Cr⁴⁺: YAG 作可饱和吸收体被动调 Q,平均输出功率为 2.0 W,斜率效率 35%,脉冲能量、宽度、峰值功率分别为 145 μJ, 26 ns 和 5.6 kW。

2008 年 J. H. Liu 等^[45]报道了用 Cr⁴⁺: YAG 晶体作为可饱和吸收体的高功率激光二极管端面抽运被动调 Q Yb: YAl₃(BO₃)₄(Yb: YAB) 激光器在 1 μm 工作波长下的激光性能。50 W 的光纤耦合激光二极管作为抽运光源,采用平凹腔结构,用 c 方向切割的 Yb: YAB 晶体产生的调 Q 平均输出功率为 3.15 W,斜率效率为 48%。对于不同切割方向的激光晶体,通过改变输出耦合镜的透射率,获得调 Q 脉冲几乎相同的最高脉冲能量、最短脉冲宽度、最高峰值功率。对于 a 方向切割的 Yb: YAB 晶体,采用透射率 T = 5% 的输出耦合镜获得脉冲能量为 139 μJ,脉冲宽度为 22.5 ns,峰值功率为 6.18 kW 的激光脉冲输出;对于 c 方向切割的 Yb: YAB 晶体,用透射率 T = 10% 的输出耦合镜获得脉冲能量为 132 μJ,脉冲宽度为 18 ns,峰值功率为 7.33 kW 的激光脉冲输出。2008 年 S. X. Xu 等^[46]用 Yb: LYSO 作为激光增益介质,采用 Z 型腔结构,SESAM 作为被动调 Q 锁模元件,实现了 Yb: LYSO 的调 Q 锁模脉冲激光输出。发射激光的中心波长约为 1060 nm,当晶体吸收的抽运光功率超过 9 W 时,调 Q 锁模脉冲激光开始运转;在晶体吸收 14.4 W 的抽运光功率时获得的最大输出功率为 820 mW,光-光转换效率为 5.7%,相应的斜率效率为 15.4%。当抽运光功率从 9.5 W 变为 12.7 W 时,调 Q 包络的脉冲宽度从 19 μs 变为 6 μs,重复频率由 6 kHz 近似线性增长到 19 kHz。与此同时,单脉冲能量也从 20.8 μJ 增加到 70.5 μJ。2008 年 J. H. Liu 等^[47]报道了一种新型的激光材料 Yb: Ca₃(NbGa)_{2-x}Ga₃O₁₂(CNGG),用 Cr⁴⁺: YAG 作可饱和吸收体对 Yb: CNGG 激光晶体进行被动调 Q 实验,输出 1033 nm 的激光脉冲,平均功率为 1.35 W,斜率效率 37%,脉冲能量、宽度、重复频率和峰值功率分别为 81 μJ, 25 ns, 16.7 kHz 和 3.24 kW。2009 年 F. M. Bain 等^[24]研究报道了一种被动调 Q 的 Yb: KY(WO₄)₂ 平面波导激光器。用 SESAM 作为被动调 Q 元件,获得输出脉冲宽度为 170 ns,脉冲重复频率 722 kHz,最高脉冲能量为 44 nJ,峰值功率 250 mW 的调 Q 脉冲激光输出。2010 年 R. Lan 等^[48]报道了用 GaAs 对 Yb: NaYW 激光器进行被动调 Q 的研究,在 12 W 的高抽运功率下获得 180 mW 的稳定激光脉冲输出,激光脉冲输出的能量、脉冲宽

度和重复频率分别为 2.2 μJ , 5 ns 和 83 kHz, 相应的峰值功率仅为 0.44 kW。

表 2 给出了一些掺 Yb^{3+} 激光晶体材料作为激光增益介质, 采用 Cr^{4+} : YAG 晶体, SESAM 和 GaAs 半导体作为可饱和吸收体实现被动调 Q 激光输出的性能对比。从表中可以看出, 采用 Yb : YAG 晶体作为增益介质可以获得光-光转换效率

大于 10% 的激光输出, 同时还可实现几十千瓦峰值功率的脉冲激光输出, 应该是一种非常有前景的被动调 Q 激光材料, 而且对掺 Yb 激光材料输出的 1030 nm 的基波激光, 通过合适的倍频晶体可以实现高效的 515 nm 激光输出, 可用于替代 Ar^+ 激光器实现激光二极管抽运的全固态、小型化固体激光器。

表 2 掺 Yb^{3+} 的激光晶体材料作为增益介质的被动调 Q 激光器

Table 2 Passively Q -switched lasers with Yb^{3+} doped laser crystal as gain media

Year	Gain medium/ saturable absorber	Wavelength/ nm	Pump power/ mW	Output power/ mW	Efficiency/ %	Energy/ μJ	R. R. / kHz	FWHM/ ns	Peak power/ kW	Reference
1999	Yb: YAG/SESAM	1030	485(968 nm)	13	2.7	1.1	12	0.53	2.1	[12]
2000	Yb: KGW/ Cr^{4+} : YAG	1033	650(980 nm)	61	10	3.4	17	85	0.038	[13]
2001	Yb: YAG/ Cr^{4+} : YAG	1030	720(940 nm)	55	7.6	3.2	17	350	0.009	[49]
2002	Cr, Yb: YAG	1030	810(940 nm)	75	9.3	1.5	50	400	0.004	[29]
2005	Cr, Yb: YAG	1030	1418(940 nm)	156	11	23.5	6.6	0.44	53	[36]
2006	Yb: YAG/ Cr^{4+} : YAG	1030	1200(940 nm)	120	10	13	9.2	0.48	27	[37]
2007	Yb: LuAG/ Cr^{4+} : YAG	1030	1240(940 nm)	243	19.5	19	12.8	0.61	31	[38]
2008	Yb: $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$ / Cr^{4+} : YAG	1030	3780(940 nm)	400	11	31	12.7	2.5	12	[20]
2009	Yb: KYW/SESAM	1044	320(980 nm)	33	10	0.044	722	170	0.00025	[24]
2010	Yb: NaYW/GaAs	1031	12000(976 nm)	180	1.5	2.2	83	5	0.44	[48]

Notes: R. R. is the repetition rate; FWHM is the pulse width.

3.2 掺 Yb^{3+} 激光陶瓷作为激光增益介质的被动调 Q 微片激光器

透明激光陶瓷材料相比于单晶的优点是低成本、可大规模生产、可制造大尺寸样本、容易获得高掺杂浓度以及适用于多功能复合材料的制备。随着激光陶瓷技术的发展, 激光二极管抽运的 Yb : YAG 微片激光器取得了很大的成功^[50-55], 用 Yb : YAG 激光陶瓷作为激光增益介质不仅可以获得高效的连续激光输出^[51,54], 而且光-光转换效率高达 60%。采用陶瓷烧结技术可以实现多功能复合激光陶瓷, 日本的 Taira 研究小组通过在 Yb : YAG 激光陶瓷微片边缘复合不掺杂的 YAG 陶瓷, 采用侧面边缘抽运的方式获得了 520 W 的准连续和 414 W 的连续激光输出^[56]。最近还报道了用 Cr^{4+} : YAG 作为可饱和吸收体被动调 Q Yb :

YAG 激光陶瓷获得了亚纳秒高功率的激光输出^[57,58], 光-光转换效率高达 30%。

2004 年 J. Kong 等^[59] 用 GaAs 作输出耦合镜和被动调 Q 开关, 实现了 Yb : Y_2O_3 陶瓷激光器的调 Q 脉冲输出, 脉冲宽度 50 ns, 重复频率 52.6 kHz, 脉冲能量为 7.7 μJ , 抽运功率 17.7 W 时平均输出功率为 0.51 W。2006 年 J. Dong 等^[57] 报道了全陶瓷被动调 Q Yb : YAG/ Cr^{4+} : YAG 微片激光器。作为激光增益介质的 Yb : YAG 陶瓷掺杂原子数分数为 9.8%, Yb : YAG 激光陶瓷的厚度为 1 mm, 作为 Q 开关的 Cr^{4+} : YAG 陶瓷初始透射率为 89%。输出脉冲激光的斜率效率 37%, 光-光转换效率 30%; 脉冲宽度 380 ps, 重复频率为 12.4 kHz, 脉冲能量 31 μJ , 峰值功率超过 82 kW。2007 年 J. Dong 等^[60,61] 在 Yb :

YAG/Cr⁴⁺:YAG 复合激光陶瓷中实现了高效率、亚纳秒、高峰值功率的自调Q激光输出。激光二极管抽运的Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG 复合激光陶瓷微片激光器的实验装置如图5所示。采用Yb³⁺掺杂原子数分数为9.8%,Cr⁴⁺掺杂原子数分数为0.1%的复合Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG激光陶瓷作为工作物质,其中Yb:YAG部分的厚度为1.2 mm,Cr⁴⁺:YAG部分的厚度为1.5 mm,输出耦合镜的透射率为50%。在连续940 nm激光二极管的抽运下,实现了斜率效率高达29%,光-光转换效率高达19%的高效自调Q激光输出,同时在该微片自调Q激光器中获得了TEM₀₀单模激光输出[如图6(a)所示],而且激光光束质量 $M^2 < 1.1$,接近衍射极限[如图6(b)所示]。输出的脉冲激光非常稳定,脉冲序列的波动小于3%[如图6(c)所示]。获得了脉冲能量高达172 μJ,脉冲宽度为237 ps,峰值功率高达0.72 MW激光输出[图6(d)所示]。这也是目前国际上报道的有关被动调Q Yb:YAG激光器的最好研究成果。在研究过程中发现复合激光陶瓷比通过光胶合技术形成的

复合晶体更具有优势,其一是通过陶瓷烧结技术可以非常方便地实现多功能复合陶瓷;其二是两种陶瓷的结合面的强度比复合晶体的要高。与用Cr⁴⁺:YAG被动调Q的Yb:YAG激光器相比,复合Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG激光陶瓷不仅具有整体化集成化的优点,而且通过把激光工作部位和被动调Q部位的结合消除了传统被动调Q激光器中存在的在高峰值功率运行情况下容易在两者界面之间发生空气击穿的问题,同时还减少了激光腔的损耗。

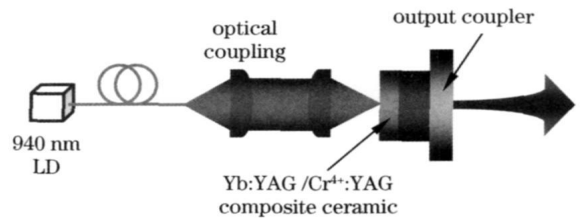


图5 激光二极管抽运的Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG复合陶瓷自调Q微片激光器

Fig. 5 LD pumped Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG composite ceramics self-Q-switched laser

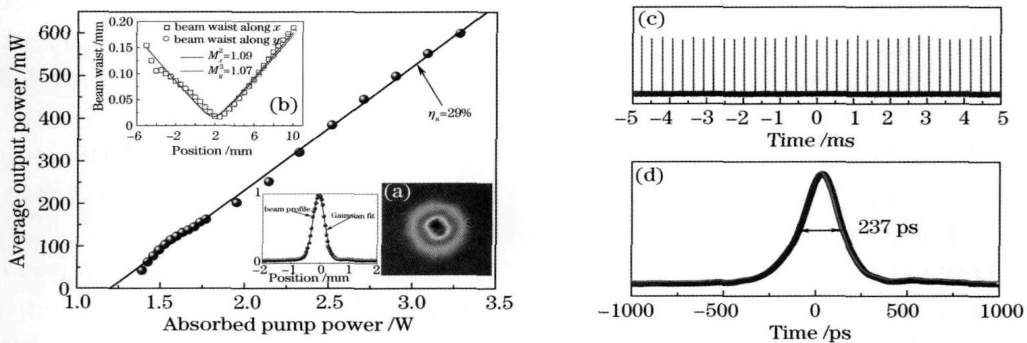


图6 Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG 复合激光陶瓷自调Q激光性能

Fig. 6 Performance of Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG composite ceramics self-Q-switched laser

2008年H. Cai等^[62]也报道了Yb:YAG/YAG复合激光陶瓷的连续与调Q激光性能。在实验中采用0.6 mm厚Yb:YAG陶瓷(掺杂原子数分数为9.8%)和2.5 mm厚YAG陶瓷的复合结构作为激光增益介质,当970 nm激光二极管的抽运功率为20 W时获得了1.05 W的连续激光输出。采用声光调Q获得了工作在1 kHz重复频率下脉冲宽度为166 ns,峰值功率为2.6 kW的脉冲激光输出,平均输出功率为0.44 W。2010年J. Dong等^[63]报道了不同激光偏振态对Yb:YAG/Cr,Ca:YAG被动调Q微片激光器激光性能的影响。在研究中采用不同Yb:YAG陶瓷和晶体与Cr,Ca:YAG陶瓷和晶体的组合,通过研究被动调Q脉冲激光输出的偏振特性,发现在

Yb:YAG/Cr,Ca:YAG全陶瓷的组合中,只有随机偏振态存在,而在至少有一个晶体的Yb:YAG/Cr,Ca:YAG组合中,获得了线性偏振激光输出,而且线性偏振的消光比在不同的组合中也不同,在Yb:YAG/Cr,Ca:YAG全晶体组合中获得了最强的线性偏振激光输出。由于Yb:YAG透明激光陶瓷是由无数Yb:YAG微晶组成的,材料整体上呈现各向同性的特点而且激光输出是随机偏振的。而Cr,Ca:YAG陶瓷虽然存在可饱和吸收特性,但是不存在如Cr,Ca:YAG晶体所拥有的依赖抽运光强度的非线性可饱和吸收特性,因此通过该研究证实和完善了用Cr,Ca:YAG被动调Q固体激光器的线性偏振输出是由Cr⁴⁺:YAG的非线性可饱和吸收的特性和掺稀

土离子的 YAG 晶体的晶体取向自选择的线性偏振特性^[64]共同决定的。

表 3 给出了一些典型的用 Cr⁴⁺: YAG 及 GaAs 可饱和吸收体被动调 Q 掺 Yb 透明激光陶瓷材料的研究进展及激光性能对比。从表中可以看出采用激

光陶瓷作为激光增益介质和可饱和吸收体,不仅可以获得高的峰值功率,而且还保持了高的光-光转换效率。通过进一步对 Yb 和 Cr 浓度及厚度的优化设计及提高透明陶瓷的制备技术,采用复合透明激光陶瓷可以实现更高的峰值功率输出。

表 3 掺 Yb³⁺ 的激光陶瓷材料作为增益介质的被动调 Q 激光器

Table 3 Passively Q-switched lasers with Yb³⁺ doped laser ceramics as gain media

Year	Gain medium/ saturable absorber	Wavelength/ nm	Pump power/ W	Output power/ mW	Efficiency/ %	Energy/ μJ	R. R. / kHz	FWHM/ ns	Peak power/ kW	Reference
2004	Y ₂ O ₃ / GaAs	1076.5	17.7(940 nm)	510	3	7.7	52.6	50	0.154	[59]
2006	Yb: YAG/ Cr ⁴⁺ : YAG all ceramics	1030	1.330(940 nm)	372	30	31.3	12.4	0.38	82	[57]
2007	Yb: YAG/ Cr ⁴⁺ : YAG composite ceramics	1030	3.280(940 nm)	610	19	172	3.5	0.237	720	[61]

3.3 掺 Er, Yb 激光玻璃作为增益介质的被动调 Q 微片激光器

1998 年 R. Fluck 等^[65]报道了用半导体饱和吸收体进行调 Q 的 Er/Yb: glass 微片激光器。在实验中通过改变饱和吸收体参量、抽运功率、抽运光斑尺寸,获得能量 4 μJ, 重复频率在 300~100 kHz, 脉宽达到 1.2 ns 的 1.535 μm 脉冲输出。2000 年 G. Karlsson 等^[66]以 Co²⁺: MgAl₂O₄ 作为激光二极管抽运的 Er: Yb: glass 激光器的被动调 Q 可饱和吸收体,输出激光脉冲有 2 kW 的峰值功率,脉冲宽度为 2.3 ns。2001 年 R. Haring 等^[67]用半导体饱和吸收镜实现被动调 Q 的 Er: Yb: glass 微片激光器。这个紧凑的激光光源可产生约 1.5 μm, 重复频率超过 1 kHz 的激光脉冲。它的脉宽为 0.84 ns, 峰值功率达到了 10.6 kW。2006 年 F. Song 等^[68]用波长为 973 nm 的国产 1 W 半导体激光器为光源,采用平凹腔结构,激光介质为厚度 1 mm 的 Er/Yb 共掺的玻璃(Er³⁺ 掺杂原子数分数约 1%),以厚度为

1 mm 的 Co²⁺: MgAl₂O₄ 晶体作为被动调 Q 开关元件,在吸收的抽运功率为 475 mW 的情况下,实现了重复频率约为 800 Hz, 脉冲宽度为 7.4 ns, 平均功率为 13.3 mW, 峰值功率率达 2.2 kW 的调 Q 激光输出。2007 年 M. Brunel 等^[69]用在 1.5 μm 处具有可饱和吸收特性的 Co²⁺: SrLaAlO₄ 作为被动调 Q 开关进行被动调 Q 微片 Er, Yb: glass 激光实验, Er, Yb: glass 的掺杂原子数分数为 1.5%, 输出激光脉冲宽度为 6 ns, 重复频率为 2.6 kHz, 平均输出功率为 4 mW, 从以上结果可推知峰值功率约为 270 W, 脉冲能量 1.6 μJ。

表 4 列出了一些典型的被动调 Q 掺 Yb-Er 玻璃微片激光器的激光性能进展对比。由于玻璃本身的热性能不太好,限制了激光的运行。同时掺 Yb-Er 玻璃是通过抽运 Yb³⁺ 实现 Er³⁺ 粒子数的反转来输出激光的,激光器的效率比较低,今后的发展趋势应该是采用 Er³⁺ 掺杂的激光晶体作为可饱和吸收体来实现对人眼安全的 1.5 μm 激光输出。

表 4 掺 Yb³⁺ 的激光玻璃材料作为增益介质的被动调 Q 激光器

Table 4 Passively Q-switched lasers with Yb³⁺ doped laser glass as gain media

Year	Gain medium/ saturable absorber	Wavelength/ nm	Pump power/ mW	Output power/ mW	Efficiency/ %	Energy/ μJ	R. R. / kHz	FWHM/ ns	Peak power/ kW	Reference
1998	Er/Yb: Glass/ SESAM	1535	200(975 nm)	2.1	1	0.045	47	1.2	0.037	[65]
2000	Er-Yb: glass/ Co ²⁺ : MgAl ₂ O ₄	1530	750(975 nm)	-	-	4.6	-	2.3	2	[66]
2001	Er: Yb: glass/ SESAM	1500	608(975 nm)	16	2.6	11.2	1.4	0.85	10.6	[67]
2006	Er/Yb-glass/ Co ²⁺ : MgAl ₂ O ₄	1540	475(973 nm)	13.3	2.8	16.6	0.8	7.4	2.2	[68]

4 结 论

激光二极管抽运的被动调Q微片激光器具有全固化、体积小、结构简单紧凑和高光束质量等优点,越来越受到人们的关注。采用掺镱离子的激光材料作为激光增益介质,通过被动调Q方式可以有效地获得高效、亚纳秒、峰值功率高达数百千瓦的调Q脉冲激光输出,因此,用掺镱离子激光材料作为增益介质的被动调Q微片激光器在激光加工、激光测距、激光手术、环境监测和生物化学分析等方面将有十分广泛的应用前景。同时这种激光器也存在一些问题,如需要提高激光镀膜的抗损伤阈值从而获得高峰值功率输出;研制新型高增益激光玻璃提高被动调Q玻璃微片激光器的输出功率和效率;提高脉冲激光输出的稳定性等。目前,被动调Q掺镱离子微片激光器的发展趋势主要是:探索新型的高掺杂浓度激光晶体;采用激光陶瓷烧结技术实现复合结构消除增益介质和被动调Q元件之间的空气间隙,从而提高激光器的效率,避免由于空气击穿而造成激光材料损伤;开发其他多功能集成程度高的微片固体激光器。

参 考 文 献

- J. J. Zayhowski. Microchip lasers [J]. *Opt. Mater.*, 1999, **11**(2-3): 255~ 267
- J. J. Zayhowski. Passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers and applications [J]. *J. Alloys Comp.*, 2000, **303-304**: 393~ 400
- B. Braun, F. X. Kartner, G. Zhang *et al.*. 56-ps passively Q-switched diode-pumped microchip laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(6): 381~ 383
- J. J. Zayhowski. Periodically poled lithium niobate optical parametric amplifiers pumped by high-power passively Q-switched microchip lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(3): 169~ 171
- J. J. Zayhowski. Microchip optical parametric oscillators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 925~ 927
- A. Agnesi, P. Pirzio, G. Reali *et al.*. Subnanosecond diode-pumped passively Q-switched Nd:GdVO₄ laser with peak power > 1 MW [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(10): 101120
- H. Sakai, H. Kan, T. Taira. > 1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched Nd³⁺:YAG microchip laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(24): 19891~ 19899
- J. J. Zayhowski, C. Dill, C. Cook *et al.*. Mid- and high-power passively Q-switched microchip lasers [C]. *Advanced Solid-State Lasers, OSA Trends in Optics and Photonics*, 1999, **26**: 178~ 186
- M. W. Gao, C. Q. Gao, K. Tang *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator at 1.57 μm wavelength pumped by passive Q-switched Nd:GdVO₄ laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2): 127~ 129
- J. Du, X. Y. Liang, Y. Xu *et al.*. Diode pumped efficient laser action of Yb³⁺:LYSO crystal [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3): 172~ 174
- J. Dong, P. H. Deng, Y. P. Liu *et al.*. Passively Q-switched Yb:YAG laser with Cr⁴⁺:YAG as the saturable absorber [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(24): 4303~ 4307
- G. J. Spuhler, R. Paschotta, M. P. Kullberg *et al.*. Passively Q-switched Yb:YAG microchip laser using a semiconductor saturable absorber mirror [C]. *Advanced Solid-State Lasers, OSA Trends in Optics and Photonics*, 1999, **26**: 187~ 189
- A. A. Lagatsky, A. Abdolvand, N. V. Kuleshov. Passive Q-switching and self-frequency Raman conversion in a diode pumped Yb:KGd(WO₄)₂ laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(9): 616~ 618
- T. Y. Fan, S. Klunk, G. Henein. Diode pumped Q-switched Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(6): 423~ 425
- D. S. Sumida. Recent advance in high-pulse-repetition-frequency Q-switched diode-pumped Yb:YAG laser technology [C]. *CLEO/Pacific Rim*, 1995, TuN2-1345
- E. C. Honea, R. J. Beach, S. C. Mitchell. 183-W, M² = 2.4 Yb:YAG Q-switched laser [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3): 154~ 156
- J. Dong, M. Bass, Y. Mao *et al.*. Dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on the temperature and concentration in yttrium aluminum garnet [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(9): 1975~ 1979
- C. Honninger, R. Paschotta, M. Graf *et al.*. Ultrafast ytterbium-doped bulk lasers and laser amplifiers [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **69**(1): 3~ 17
- A. Brenier, Y. Guyot, H. Canibano *et al.*. Growth, spectroscopic, and laser properties of Yb³⁺-doped Lu₃Al₅O₁₂ garnet crystal [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(4): 676~ 683
- J. Dong, K. Ueda, A. A. Kaminskii. Continuous-wave and Q-switched microchip laser performance of Yb:Y₃Sc₂Al₃O₁₂ crystals [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5241~ 5251
- P. Wang, J. M. Dawes, P. Dekker *et al.*. Highly efficient diode-pumped ytterbium-doped yttrium aluminum borate laser [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **174**(5-6): 467~ 470
- K. I. Schaffers. Yb:S-FAP lasers [J]. *Opt. Mater.*, 2004, **26**(4): 391~ 394
- A. A. Lagatsky, A. Abdolvand, N. V. Kuleshov. Passive Q-switching and self-frequency Raman conversion in a diode pumped Yb:KGd(WO₄)₂ laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(9): 616~ 618
- F. M. Bain, A. A. Lagatsky, S. V. Kurilchick *et al.*. Continuous-wave and Q-switched operation of a compact, diode-pumped Yb:KY(WO₄)₂ planar waveguide laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(3): 1666~ 1670
- S. Chenais, F. Druon, F. Balembois *et al.*. Diode pumped Yb:GGG laser: comparison with Yb:YAG [J]. *Opt. Mater.*, 2003, **22**(2): 99~ 106
- J. Kong, J. Lu, K. Takaichi *et al.*. Diode-pumped Yb:Y₂O₃ ceramic laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(16): 2556~ 2558
- A. Garcia-Cortes, J. M. Cano-Torres, M. D. Serrano *et al.*. Spectroscopy and lasing of Yb-doped NaY(WO₄)₂: tunable and femtosecond mode-locked laser operation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2007, **43**(9): 758~ 764
- H. R. Xia, X. L. Meng, M. Guo *et al.*. Spectra parameters of Nd-doped yttrium orthovanadate crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **88**(9): 5134~ 5137
- D. Y. Shen, D. Y. Tang, J. Kong. Passively Q-switched Yb:YAG laser with a GaAs output coupler [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **211**: 271~ 275
- Q. Liu, H. S. Wu, M. L. Gong *et al.*. GaAs as a passive Q-switch and Brewster plate for pulsed Yb:YAG laser [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **222**: 355~ 361
- H. S. Wu, P. Yan, M. L. Gong *et al.*. A passively Q-switched diode pumped Yb:YAG microchip laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(12): 697~ 698
- J. Dong, P. Deng, J. Xu. The growth of Cr⁴⁺, Yb³⁺:yttrium aluminum garnet (YAG) crystal and its absorption spectra properties [J]. *J. Crystal Growth*, 1999, **203**(1-2): 163~ 167
- J. Dong, P. Deng, J. Xu. Spectral and luminescence properties of Cr⁴⁺ and Yb³⁺ ions in yttrium aluminum garnet (YAG) [J]. *Opt. Mater.*, 2000, **14**(2): 109~ 113

- 34 J. Dong, P. Deng, Y. Liu *et al.*. Performance of the self-*Q*-switched Cr, Yb: YAG laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(3): 342~ 344
- 35 J. Dong, J. Li, S. Huang *et al.*. Multilongitudinal mode oscillation of self-*Q*-switched Cr, Yb: YAG laser with a plano-concave resonator [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **256**(1-3): 158~ 165
- 36 J. Dong, A. Shirakawa, S. Huang *et al.*. Stable laser diode pumped microchip subnanosecond Cr, Yb: YAG self-*Q*-switched laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2005, **2**(8): 387~ 391
- 37 J. Dong, A. Shirakawa, K. Ueda. Sub-nanosecond passively *Q*-switched Yb: YAG/Cr⁴⁺: YAG sandwiched microchip laser [J]. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, 2006, **85**(4): 513~ 518
- 38 J. Dong, K. Ueda, A. A. Kaminskii. Efficient passively *Q*-switched Yb: LuAG microchip laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(22): 3266~ 3268
- 39 J. H. Liu, U. Griebner, V. Petrov *et al.*. Efficient continuous-wave and *Q*-switched operation of a diode-pumped Yb: KLu(WO₄)₂ laser with self-Raman conversion [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(18): 2427~ 2429
- 40 X. Y. Zhang, A. Brenier, Q. P. Wang *et al.*. Passive *Q*-switching characteristics of Yb³⁺: Gd₃Ga₅O₁₂ crystal [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7708~ 7719
- 41 J. H. Liu, V. Petrov, H. J. Zhang *et al.*. Efficient passively *Q*-switched laser operation of Yb in the disordered NaGd(WO₄)₂ crystal host [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1728~ 1730
- 42 A. Brenier, C. Y. Tu, Z. J. Zhu *et al.*. Diode pumped passive *Q*-switching of Yb³⁺-doped GdAl₃(BO₃)₄ nonlinear laser crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(7): 071103
- 43 Y. Kalisky, O. Kalisky, U. Rachum *et al.*. Comparative performance of passively *Q*-switched diode-pumped Yb³⁺-doped tungstate and garnet lasers using Cr⁴⁺: YAG saturable absorber [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 502~ 510
- 44 J. H. Liu, H. J. Zhang, J. Y. Wang *et al.*. Continuous-wave and *Q*-switched laser operation of Yb: NaY(WO₄)₂ crystal [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20): 12900~ 12904
- 45 J. H. Liu, V. Petrov, H. J. Zhang *et al.*. Highly efficient passively *Q*-switched Yb: YAl₃(BO₃)₄: Cr⁴⁺: YAG laser end-pumped by a high-power diode [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2008, **44**(3-4): 283~ 287
- 46 S. X. Xu, W. X. Li, Q. Hao *et al.*. Efficient laser diode end-pumped passively *Q*-switched mode locked Yb: LYSO laser based on SESAM [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(2): 548~ 551
- 47 J. H. Liu, H. J. Zhang, W. J. Han *et al.*. Polarized laser oscillation of isotropic disordered Yb: Ca₃(NbGa)_{2-x}Ga₃O₁₂ crystal [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(16): 12201~ 12206
- 48 R. Lan, L. Pan, I. Utkin *et al.*. Passively *Q*-switched Yb³⁺: NaY(WO₄)₂ laser with GaAs saturable absorber [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 4000~ 4005
- 49 J. Dong, P. H. Deng, Y. P. Liu *et al.*. Passively *Q*-switched Yb: YAG laser with Cr⁴⁺: YAG as the saturable absorber [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(24): 4303~ 4307
- 50 T. Takaichi, H. Yagi, J. Lu *et al.*. Yb³⁺-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramics—a new solid-state laser material [J]. *Phys. Status Solidi (a)*, 2003, **200**(1): R5~ R7
- 51 J. Dong, A. Shirakawa, K. Ueda *et al.*. Efficient Yb³⁺: Y₃Al₅O₁₂ ceramic microchip lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(9): 091114
- 52 J. Dong, A. Shirakawa, K. Ueda *et al.*. Laser-diode pumped heavy doped Yb: YAG ceramic lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(13): 1890~ 1892
- 53 J. Dong, K. Ueda, H. Yagi *et al.*. Comparative study the effect of Yb concentrations on laser characteristics of Yb: YAG ceramics and crystals [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(4): 282~ 289
- 54 S. Nakamura, H. Yoshioka, Y. Matsubara *et al.*. Efficient tunable Yb: YAG ceramic laser [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(17): 4411~ 4414
- 55 Y. Wu, J. Li, Y. Pan *et al.*. Diode-pumped Yb: YAG ceramic laser [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2007, **90**(10): 3334~ 3337
- 56 M. Tsunekane, T. Taira. High-power operation of diode edge-pumped, composite all-ceramic Yb: Y₃Al₅O₁₂ microchip laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(12): 121101
- 57 J. Dong, A. Shirakawa, K. Takaichi *et al.*. All ceramic passively *Q*-switched Yb: YAG/Cr⁴⁺: YAG microchip laser [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(20): 1154~ 1156
- 58 J. Dong, A. Shirakawa, K. Ueda *et al.*. Near-diffraction-limited passively *Q*-switched Yb: Y₃Al₅O₁₂ ceramic lasers with peak power > 150 kW [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(13): 131105
- 59 J. Kong, D. Y. Tang, J. Lu *et al.*. Passively *Q*-switched Yb: Y₂O₃ ceramic laser with a GaAs output coupler [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15): 3560~ 3566
- 60 J. Dong, A. Shirakawa, K. Ueda *et al.*. Ytterbium and chromium doped composite Y₃Al₅O₁₂ ceramics self-*Q*-switched laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(19): 191106
- 61 J. Dong, K. I. Ueda, A. Shirakawa *et al.*. Composite Yb: YAG/Cr⁴⁺: YAG ceramics picosecond microchip lasers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(22): 14516~ 14523
- 62 H. Cai, J. Zhou, H. M. Zhao *et al.*. Continuous-wave and *Q*-switched performance of an Yb: YAG/YAG composite thin disk ceramic laser pumped with 970-nm laser diode [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 852~ 854
- 63 J. Dong, K. Ueda, H. Yagi *et al.*. Effect of polarization states on the laser performance of passively *Q*-switched Yb: YAG/Cr, Ca: YAG microchip lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(1): 50~ 56
- 64 J. Dong, A. Shirakawa, K. Ueda. A crystalline-orientation self-selected linearly polarized Yb: Y₃Al₅O₁₂ microchip laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(10): 101105
- 65 R. Fluck, R. Haring, R. Paschotta *et al.*. Eyesafe pulsed microchip laser using semiconductor saturable absorber mirrors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(25): 3273~ 3275
- 66 G. Karlsson, V. Pasiskevicius, F. Laurell *et al.*. Diode pumped Er: Yb: glass laser passively *Q*-switched by use of Co²⁺: MgAl₂O₄ as a saturable absorber [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(33): 6188~ 6192
- 67 R. Haring, R. Paschotta, R. Fluck *et al.*. Passively *Q*-switched microchip laser at 1.5 μm [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(12): 1805~ 1812
- 68 F. Song, Z. H. Wu, S. J. Liu *et al.*. A passive *Q*-switched microchip Er/Yb glass laser pumped by laser diode [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(5): 1195~ 1197
- 69 M. Brunel, M. Vallet. Wavelength locking of CW and *Q*-switched Er³⁺ microchip lasers to acetylene absorption lines using pump power modulation [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(4): 1612~ 1620