

Nd³⁺ 掺杂无序晶体被动锁模激光器的研究现状

何坤娜^{1,2} 李德华² 魏志义^{2*}

¹ 中国农业大学理学院, 北京 100083

² 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190

摘要 全固态激光器被动锁模是产生超短脉冲的一种有效方法。在基于 Nd³⁺ 掺杂激光材料被动锁模产生超短脉冲的研究中, 无序晶体成为研究的热点。结合相关工作, 总结了 Nd³⁺ 掺杂无序晶体被动锁模激光器的研究现状, 展望了 Nd³⁺ 掺杂无序晶体在超强超短脉冲制备中的发展前景。

关键词 激光器; Nd³⁺ 掺杂无序晶体; 四能级激光运转; 准三能级激光运转; 被动锁模激光器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1000001

Research Status of Passively Mode-locked Laser Based on Nd³⁺-doped Disordered Crystals

He Kunna^{1,2} Li Dehua² Wei Zhiyi²

¹ College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China

² Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract An effective way to realize an ultra-short pulse is to use the passively mode-locked technology of all-solid-state lasers. Among the studies on the passively mode-locked Nd³⁺-doped lasers, the disordered crystals have been becoming a research hotspot. In combination with related works, the research status of passively mode-locked lasers based on Nd³⁺-doped disordered crystals are summarized, and the future prospect on the application of Nd³⁺-doped disordered crystals in the generation of ultra-short and ultra-intense pulses is discussed.

Key words lasers; Nd³⁺-doped disordered crystal; four-level laser operation; quasi-three-level laser operation; passively mode-locked lasers

OCIS codes 140.3380; 140.4050

1 引 言

超短脉冲具有短脉宽、高峰值功率等特点, 在许多领域有着重要的应用。全固态激光器被动锁模 (ML) 是产生超短脉冲的一种有效方法。一般情况下, 激光材料的荧光谱越宽, 通过锁模产生的脉宽就越短。除钛宝石晶体外, 掺 Yb³⁺ 和掺 Nd³⁺ 的激光材料是目前常用的两大类可产生超短脉冲的激光材料。基于 Yb³⁺ 掺杂的激光器输出激光波长相对单一, 主要集中在 1.03 μm 左右, 且激光器运转于准三能级系统。基于 Nd³⁺ 掺杂的激光器通常可输出 1.06, 1.3, 0.9 μm 左右的激光波长, 在许多方面具有不可替代的优势。目前, 基于 Nd³⁺ 掺杂的锁模超短脉冲激光已广泛应用于多个领域。

2002 年, Han 等^[1] 利用 Nd:glass 获得了 38 fs 的锁模脉冲输出, 这是目前利用 Nd:glass 材料获得的最短脉宽。但 Nd:glass 的热导性较差, 目前基于 Nd:glass 的被动锁模振荡器的输出功率一般只有几十毫

收稿日期: 2016-05-31; **收到修改稿日期:** 2016-07-07

基金项目: 国家自然科学基金国际合作与交流项目 (61210017)、国家重点基础研究发展计划 (2013CB922402)、中央高校基本科研业务费 (2016lx002)

作者简介: 何坤娜 (1976—), 女, 博士, 讲师, 主要从事新型激光器件与技术方面的研究。E-mail: hekunna@cau.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: zywei@aphy.iphy.ac.cn

瓦^[2-5],且实验装置非常复杂。无序晶体具有晶体的高导热性能和玻璃的宽荧光谱,且适合二极管激光抽运,因此,在利用 Nd³⁺ 掺杂激光器被动锁模产生超短脉冲的研究中, Nd³⁺ 掺杂无序晶体已成为研究热点。

Ober 等^[6-7]借助加成脉冲锁模(APM)技术,利用 GSAG:YSGG:Nd³⁺ 无序晶体分别获得了 500 fs 和 260 fs 的超短脉冲输出。但 APM 技术所用的干涉装置的内部结构非常复杂,因此,随着锁模技术的发展,APM 技术不再是人们利用无序晶体获取超短脉冲时首选的锁模技术。

在基于 Nd³⁺ 掺杂无序晶体的激光器实现激光运转时,常见的输出谱线主要有三条。以 Nd:CLNGG 激光器为例,波长分别为 1.06^[8],1.3^[9],0.935 μm^[10],其中 1.06 μm 和 1.3 μm 是激光器实现四能级运转时输出的激光波长,0.935 μm 是激光器实现准三能级运转时输出的激光波长。本文结合本课题组在这方面的研究工作,对基于 Nd³⁺ 掺杂无序晶体的全固态被动锁模激光器的相关研究进展进行了介绍。

2 被动锁模实现 1 μm 激光输出

目前已研制生长出多种 Nd³⁺ 掺杂无序激光晶体,并对它们进行了广泛的研究,表 1 为近年报道过的一些 Nd³⁺ 掺杂无序晶体与典型 Nd³⁺ 掺杂有序晶体及 Nd:glass 的特性比较结果^[8,11-26]。

表 1 Nd³⁺ 掺杂无序晶体与其他激光材料的特性比较

Table 1 Characteristic comparison between Nd³⁺-doped disordered crystals and other laser materials

Laser material	Absorption bandwidth /nm	Fluorescence bandwidth /nm	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·k ⁻¹)	Reference No.
Nd:CNGG	12	15.1	4.7	[8,11-12]
	8.5	14.7	3.43	
Nd:CLNGG	13	16.6	2.97	[8]
Nd:CLTGG	-	16	-	[13]
Nd:CYA	5 ^σ	12 ^σ	-	[14]
	5 ^π	15 ^π	-	
Nd:CGA	3.3	12	-	[15-16]
Nd:CGB	15 ^I	30 ^I	0.849 ^a	[17]
	15 ^{II}	30 ^{II}	0.887 ^b	
	16 ^{III}	30 ^{III}	0.841 ^c	
Nd:CLB	17	27	1.08~1.30 ^a	[18]
			1.12~1.45 ^b	
			1.03~1.35 ^c	
Nd:SGG	18	24	1.59 ^a	[8]
			1.4 ^c	
Nd:SLG	8	14	1.95 ^a	[8]
			1.7 ^c	
Nd:BLG	15	27	1.96 ^a	[8]
			1.72 ^c	
Nd:LGS	5	10.2	1.7 ^c	[19]
			1.4 ^a	
Nd,Y:SrF ₂	4	15.5	3.5	[20]
Nd,Y:CaF ₂	>10	31	9.7	[21-22]
Nd,La:CaF ₂	>5	>15	-	[23]
Nd:YAG ^H	2.1	0.5	11.1	[12,24]
Nd:YVO ₄ ^H	2	1.1	5.1	[18,24-25]
Nd:GdVO ₄ ^H	1.6	1.25	11.7	[24-25]
Nd:glass ^P	12.7	21.3	0.6	[12,26]

H: ordered crystals; P: disordered crystals; σ and π: pump laser polarization directions; a, b and c: directions of crystallographic axis; I, II, and III: electric field along a-axis, b-axis, and c-axis of laser material

以 Nd:YAG, Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 为代表的 Nd³⁺ 掺杂有序晶体的荧光谱宽在 1 nm 左右, 而 Nd³⁺ 掺杂无序晶体的谱线宽度在 5~31 nm 之间, 远远大于有序晶体谱线宽度, 与 Nd:glass 的荧光谱宽相当, 甚至更宽; 无序晶体的吸收谱宽在 3~15 nm 之间, 大于以 Nd:YAG, Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 为代表的有序晶体的吸收谱宽(约 2 nm)。图 1^[19] 和图 2^[21] 为两种典型的无序晶体 Nd:LGS 和 Nd,Y:CaF₂ 的吸收谱和荧光谱。

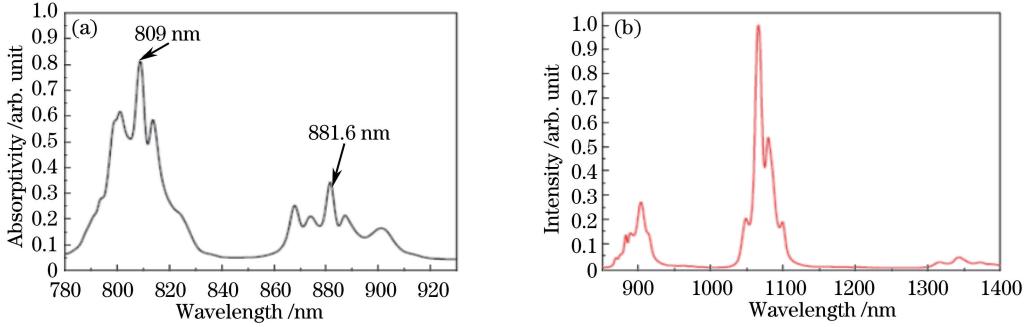


图 1 Nd:LGS 晶体的 (a) 吸收谱和 (b) 荧光谱^[19]

Fig. 1 (a) Absorption and (b) fluorescence spectra of Nd:LGS crystal^[19]

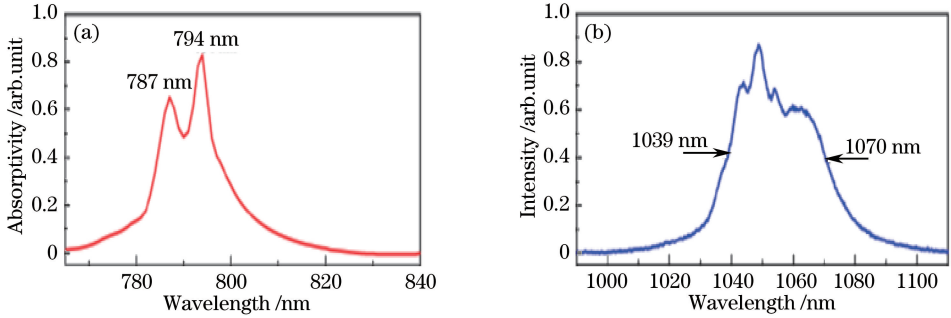


图 2 Nd,Y:CaF₂ 晶体的 (a) 吸收谱和 (b) 荧光谱^[21]

Fig. 2 (a) Absorption and (b) fluorescence spectra of Nd,Y:CaF₂ crystal^[21]

近年来, 基于 Nd³⁺ 掺杂无序晶体的 1 μm 超短脉冲激光器的研究取得了令人瞩目的成果, 具体情况参见表 2^[11,13,14,16,20-23,27-38]。

表 2 基于 Nd³⁺ 掺杂无序晶体的 1 μm 被动锁模实验结果列表

Table 2 Result list of 1 μm passively mode-locking experiments based on Nd³⁺-doped laser materials

Laser material	Pump source	Dispersion compensation element	Laser wavelength / nm	Pulse width / ps	Repetition frequency / MHz	Output power / mW	Efficiency	Reference No.
Nd,Y:SrF ₂	Ti	GTI mirror	1061	0.097	96	102	11% ^A	[27]
	Ti	GTI mirror	1057	0.332	89.8	395	39.5% ^A	[20]
Nd,Y:CaF ₂	LD	Prism pairs	1064	0.103	100	89	26% ^A	[21]
	LD	GTI mirror	1061	0.264	85	180	7.2% ^D	[22]
Nd:LGS	Ti	Prisms pairs	1084	0.278	102.4	21	0.8% ^A	[28]
	Ti	Prisms pairs	1067.5	0.335	102.4	47	1.8% ^A	
	LD	Prisms pairs	1066	0.381	133.4	75	1.3% ^A	[29]
	LD	No	1063	10.9	173.7	28.5	1.5% ^A	[30]
Nd:BLG	Ti	One prism	1075	0.290	200	30	-	[31]
			1060	0.316	200	-	-	
			1070~1090 ^t	<1	200	-	-	
Nd:SLG ^M	Ti	One prism	1061	0.378	201	33	-	[32]

Laser material	Pump source	Dispersion compensation element	Laser wavelength / nm	Pulse width /ps	Repetition frequency / MHz	Output power / mW	Efficiency	Reference No.
Nd:SLG ^N	Ti	One prism	1060~1063 ^t	-	201	-	-	[33]
			1067~1070 ^t	0.534	201	25	-	
			1078~1083 ^t	0.660	201	16	-	
Nd:CNGG-CLNGG	LD	Prisms pairs	1061.5	0.534	88	60	1% ^A	[33]
Nd:CLNGG	LD	Prisms pairs	1061	0.900	88	486	26% ^G	[34]
	LD	No	1061.2	2.0	88.4	101	3.6% ^D 8.9% ^G	[35]
Nd:CGA	LD	No	1079	3.1	157	93	4.8% ^A 5.3% ^B	[16]
Nd:CLTGG	LD	No	1059, 1061	3.5	42	383	6.8% ^G	[13]
Nd:CYA	LD	No	1080.2	3.9	148.9	2250	23.2% ^G	[14]
Nd:CTGG	LD	Prisms pairs	1059.6, 1063.5, 1064.9	4.3	88	-	-	[36]
		No	1059.6, 1061.6, 1063.5, 1064.9	5.2	88	107	3.6% ^G	
Nd:CNGG	LD	Prisms pairs	1059.35, 1061.71	5	88	90	1.6% ^A	[37]
Nd,La:CaF ₂	LD	No	1065.8	11	87.5	110	7.8% ^G	[23]
Nd:CaNb ₂ O ₆	LD	No	1061.8	17.3	88.4	843	27% ^D	[38]

M and *N*: cutting directions of laser material; *A*: optical-optical conversion efficiency for incident pump power; *B*: slope efficiency for incident pump power; *D*: optical-optical conversion efficiency for absorbed pump power; *G*: slope efficiency for absorbed pump power; *t*: tune

由表 2 可知,实现 1 μm 波段超短脉冲运转时,输出激光波长情况主要有三种:单波长输出、双或多波长输出以及连续调谐输出,其中输出超短激光脉冲脉宽主要为皮秒量级和飞秒量级。

2.1 单波长输出

假设 Nd³⁺ 掺杂无序晶体激光器输出双曲正割形锁模脉冲,根据傅里叶变换关系式 $\Delta\tau \times \Delta\nu = 0.315$,其中 $\Delta\tau$ 为脉冲宽度, $\Delta\nu$ 为频谱宽度,0.315 为双曲正割形脉冲的时间带宽积极限值。理论上,Nd³⁺ 掺杂无序晶体的荧光谱宽足以支持飞秒量级的锁模脉冲运转。但由表 2 可知,在单波长锁模激光器中,若不引入色散补偿,通常只能产生皮秒量级脉冲。在现有的基于 Nd³⁺ 掺杂无序晶体的 1 μm 单波长飞秒被动锁模激光器中,均采取了腔内色散管理。利用激光器实现 1 μm 单波长被动锁模运转时,锁模激光器的抽运方式、输出波长、平均输出功率和效率、脉冲宽度等都是衡量激光器性能的重要指标。

目前,在基于 Nd³⁺ 掺杂无序晶体的 1 μm 单波长被动锁模激光器中,主要采用二极管激光器作为抽运源,而钛宝石激光器由于价格昂贵较少用作抽运源。抽运源抽运波长大部分在 808 nm 附近,少部分在 790 nm 附近^[20-23]。利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 进行被动锁模具有自启动、结构简单、稳定可靠、光束质量好等优点,实验都选用 SESAM 作为锁模元件。输出的激光波长在 1057~1084 nm 之间,大部分在 1064 nm 附近。Wei 等^[20] 利用 Nd,Y: SrF₂ 晶体获得了 1057 nm 的飞秒锁模激光输出。Wang 等^[28] 利用 Nd:LGS 晶体获得了 1084 nm 的飞秒锁模激光输出。Cong 等^[14] 利用 Nd:CYA 晶体获得了 1080.2 nm 的锁模激光输出,该波长可用于抽运氦原子^[16]。

在基于 Nd³⁺ 掺杂无序晶体的 1 μm 单波长皮秒被动锁模激光器中,当吸收抽运功率小于等于 13 W 时,获得的平均输出功率大部分在瓦量级以下,少数在瓦量级以上。Cong 等^[14] 采用图 3(a) 所示的实验装置,利用 808 nm 二极管激光器抽运 Nd:CYA 晶体,其中 M1 为输入镜,M2 为高反镜,SESAM 为可饱和吸收体,L1 为 M1 和 M2 之间的距离,L2 为 M2 和 SESAM 之间的距离。当吸收抽运功率为 13 W 时,平均输出功率为 2.25 W,这是目前利用 Nd³⁺ 掺杂无序晶体激光器实现 1 μm 皮秒单波长锁模脉冲运转的实验获得的最

高平均输出功率。图 3(b)为 Nd:CYA 激光器的输入输出特性曲线,其中 QML 表示调 Q 锁模,CW 表示连续。由图可以看到,利用 Nd:CYA 激光器获得的斜率效率(相对于吸收抽运功率)为 23.2%^[14]。到目前为止,利用 Nd³⁺ 掺杂无序晶体激光器实现 1 μm 皮秒单波长锁模脉冲运转的实验获得的最高光-光转换效率(相对于吸收抽运功率)为 27%^[38]。

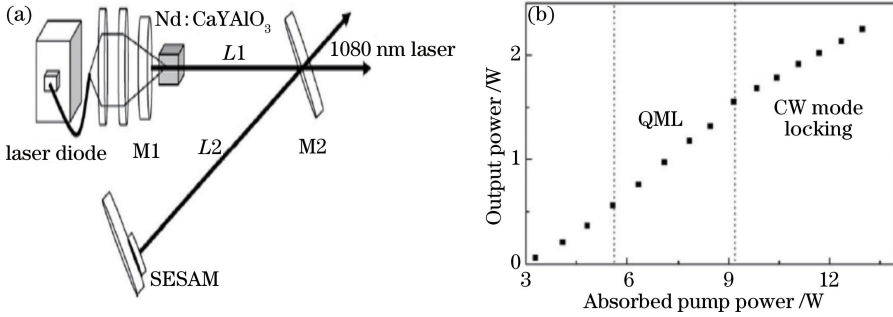


图 3 (a) Nd:CYA 被动锁模激光器的实验装置; (b) 输出功率与吸收抽运功率的关系^[14]

Fig. 3 (a) Experimental setup of Nd:CYA passively mode-locked laser; (b) relationship between output power and absorbed pump power^[14]

在基于 Nd³⁺ 掺杂无序晶体获得飞秒量级单波长脉冲的过程中,通常需要在谐振腔内引入色散补偿元件,这在一定程度上增加了谐振腔损耗,降低了激光器输出功率。目前,基于 Nd³⁺ 掺杂无序晶体实现飞秒锁模运转可获得的平均输出功率均小于 500 mW。2009 年,Xie 等^[34]利用 Nd:CLNGG 晶体获得的锁模平均输出功率为 486 mW。2014 年,Wei 等^[20]利用 796 nm 钛宝石激光器抽运 Nd,Y:SrF₂ 晶体,获得了脉宽为 332 fs 的锁模脉冲。图 4(a)为被动锁模 Nd,Y:SrF₂ 激光器的实验装置,其中 L 为透镜,M1 为输入镜,M2 和 M4 均为高反镜,M3 为 GTI 镜,M5 为可饱和吸收体,OC 为透射率为 1.6% 的输出镜。采用单 GTI 镜补偿腔内色散,输出镜的透射率为 1.6%。当抽运功率为 1 W 时,获得了 395 mW 的平均输出功率,相应的光-光转换效率和斜率效率分别为 39.5% 和 69%,这是目前利用 Nd³⁺ 掺杂无序晶体激光器实现 1 μm 飞秒单波长锁模脉冲运转的实验获得的最高光-光转换效率和斜率效率^[20]。图 4(b)为 Nd,Y:SrF₂ 锁模激光器的输入输出特性曲线,其中 η₁ 和 η₂ 均为斜率效率。实验结果表明,Nd,Y:SrF₂ 晶体是一种可支持高效飞秒锁模激光运行的增益介质,不仅具有较宽的吸收谱、荧光谱和较好的热特性,还具有中等发射截面和较长的上能级寿命(吸收截面为 3.98 × 10⁻²⁰ cm²,发射截面为 4.36 × 10⁻²⁰ cm²,上能级寿命为 360 μs)。因此,Nd,Y:SrF₂ 晶体是可通过啁啾脉冲放大(CPA)技术获得超短超强脉冲的激光增益介质^[20-22]。

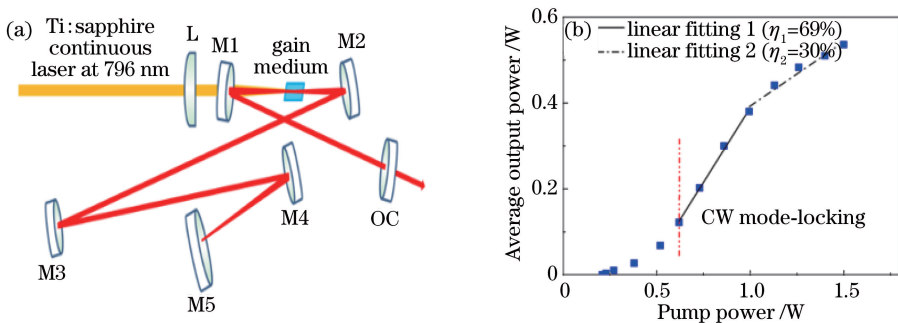


图 4 (a) Nd,Y:SrF₂ 被动锁模激光器的实验装置; (b) 输出功率与抽运功率的关系^[20]

Fig. 4 (a) Experimental setup of passively mode-locked Nd,Y:SrF₂ laser; (b) relationship between output power and pump power^[20]

目前,在基于 Nd³⁺ 掺杂无序晶体的 1 μm 被动锁模激光器中,获得的脉冲宽度在 0.097 ~ 17.3 ps 之间。2013 年,Wang 等^[28]采用 X 型棱镜对色散进行补偿,实验装置如图 5 所示,其中 f 代表焦距,M1 为输入镜,M2 和 M3 均为高反镜,SESAM 为可饱和吸收体,SF6 为棱镜材料,M4 为输出镜。利用钛宝石激光器抽运 Nd:LGS 晶体,实现了飞秒量级被动连续锁模激光运转,脉冲重复频率为 102.4 MHz。当输出波长为

1084 nm时,锁模脉冲脉宽为 278 fs,当抽运功率为 2.76 W 时,获得的平均输出功率为 21 mW;当输出波长为 1067.5 nm 时,锁模脉冲脉宽为 335 fs,当抽运功率为 2.76 W 时,获得的平均输出功率为 47 mW。

2014 年,Qin 等^[21]采用图 6 所示的棱镜对进行色散补偿,其中 LD 为二极管抽运源, F_1 和 F_2 均为透镜, M_1 为输入镜, M_2 和 M_3 均为高反镜, SF_{10} 代表棱镜材料,OC 为输出镜。利用二极管激光器抽运 Nd,Y:CaF₂ 晶体,实现了飞秒量级 Nd,Y:CaF₂ 激光器的被动连续锁模运转。当抽运功率为 3.3 W 时,获得的平均输出功率为 89 mW。

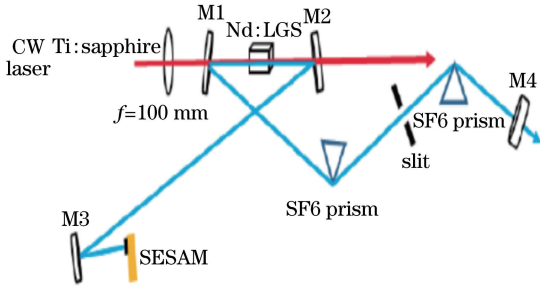


图 5 Nd:LGS 被动锁模激光器的实验装置^[28]

Fig. 5 Experimental setup of Nd:LGS passively mode-locked laser^[28]

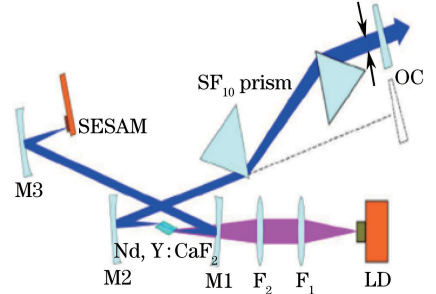


图 6 Nd,Y:CaF₂ 被动锁模激光器的实验装置^[21]

Fig. 6 Experimental setup of Nd,Y:CaF₂ passively mode-locked laser^[21]

2016 年,在高效 Nd,Y:SrF₂ 激光器^[20]的基础上,Zhu 等^[27]设计了图 7 所示的谐振腔,其中 M_1 为输入镜, M_2 和 M_3 均为高反镜,OC 为输出镜。获得了更短脉宽的被动连续锁模运转。与图 4(a)相比,该腔的改进主要在于:1)使用双 GTI 镜控制色散,通过改变激光在 GTI 镜上的反射次数来改变腔内的总色散量,从而较为精准地控制色散;2)晶体和 SESAM 的功率密度越高,越利于实现锁模,所以通过使用更小透射率(0.3%)的输出镜以提高腔内脉冲功率,从而提高晶体和 SESAM 的功率密度;3)重新调整了腔参数,调整后晶体中的振荡光光斑更小,更便于实现锁模。利用图 7 所示的实验装置,获得的锁模脉冲脉宽为 97 fs,这是目前利用 Nd³⁺ 掺杂无序晶体激光器实现 1 μ m 飞秒单波长锁模激光运转的实验获得的最窄脉宽。

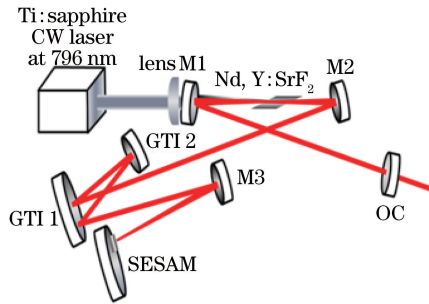


图 7 Nd,Y:SrF₂ 被动锁模激光器的实验装置^[27]

Fig. 7 Experimental setup of Nd,Y:SrF₂ passively mode-locked laser^[27]

上述几个典型的飞秒激光器均选用了 X 型腔,该类谐振腔的特点是设计灵活,易调节,可加入棱镜或 GTI 镜,能实现单路锁模脉冲输出。

2016 年,He 等^[16]采用典型的 X 型谐振腔,在未进行色散补偿的情况下,首次利用 Nd:CaGdAlO₄ 晶体,实现了 1079 nm 的锁模脉冲激光运转,锁模脉冲宽度为 3.1 ps,脉冲重复频率 157 MHz。当抽运功率为 1.94 W 时,获得的最高锁模平均输出功率为 93 mW。

2015 年,Liu 等^[30]采用 X 型谐振腔,在未进行色散补偿的情况下,首次利用二极管激光器抽运 Nd:LGS 晶体,实现了 1063 nm 的连续锁模脉冲激光运转,锁模脉冲宽度为 10.9 ps,脉冲重复频率为 173.3 MHz。当抽运功率为 1.91 W 时,获得的最高锁模平均输出功率为 28.5 mW。同年,Liu 等^[29]采用 X 型棱镜对色散补偿腔,利用二极管激光器抽运 Nd:LGS 晶体,实现了 1063 nm 的飞秒被动连续锁模脉冲激光运转,锁模脉冲脉宽为 381 fs,脉冲重复频率为 133.4 MHz。当抽运功率为 5.9 W 时,获得的最高锁模平均输出功率为 75 mW。

2015年,Zhu等^[22]利用Nd,Y:CaF₂晶体,采用双GTI镜进行色散补偿,获得了264fs的连续被动锁模脉冲运转,脉冲重复频率为85MHz。当吸收的抽运功率为2.5W时,获得的平均输出功率为180mW,这是目前利用Nd,Y:CaF₂激光器实现1μm飞秒被动连续锁模运转的实验获得的最高平均输出功率。图8为被动锁模Nd,Y:CaF₂激光器的实验装置图,其中M1为输入镜,M2、M3和M4均为高反镜,M5和M6均为GTI色散补偿镜,OC为输出镜。

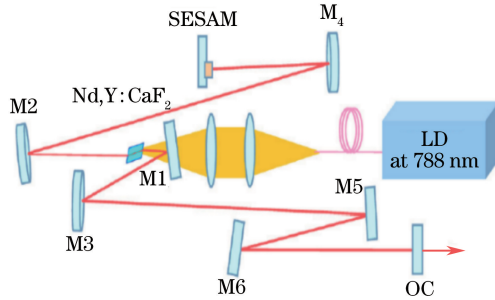


图8 被动锁模Nd,Y:CaF₂激光器的实验装置^[22]

Fig. 8 Experimental setup of Nd,Y:CaF₂ passively mode-locked laser^[22]

2.2 双或多波长输出

利用Nd³⁺掺杂无序晶体激光器实现锁模运转,输出激光波长是双波长或多波长同时输出,即实现的是双波长^[13,37]或多波长^[36]同步锁模运转。图9^[39]为Nd:CTGG晶体的荧光光谱和Nd:CTGG锁模激光器输出的激光波长,可以看到,Nd:CTGG晶体的荧光光谱具有多峰结构,这种多峰结构来源于晶体结构的无序,它们是多波长输出的原因。

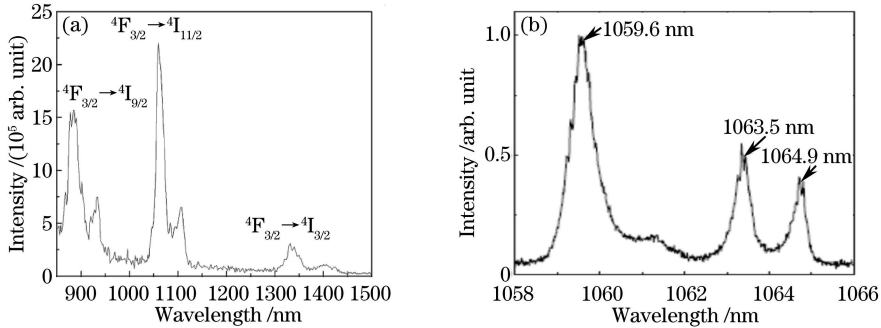


图9 (a)Nd:CTGG晶体的荧光光谱;(b)锁模运转时输出的激光波长^[39]

Fig. 9 (a) Fluorescence spectrum of Nd:CTGG crystal; (b) output laser wavelength under mode-locking operation^[39]

由表2可知,在现有双波长或多波长Nd³⁺掺杂无序晶体激光器中,即使在谐振腔内加入了色散补偿元件,仍只获得了皮秒量级锁模脉冲,未能实现飞秒量级锁模脉冲运转。2008年,Xie等^[37]采用腔长为1.7m的X型双棱镜对色散补偿腔,利用808nm波长的二极管激光器抽运Nd:CNGG无序晶体,仅获得了脉宽为5ps的基频锁模脉冲序列。

Nd³⁺掺杂无序晶体激光器在实现多波长皮秒同步锁模运转时,输出波长之间的间隔较小,如果选用合适的非线性元件,可通过差频技术产生太赫兹(THz)波。2009年,Xie等^[36]采用X型色散补偿腔,实现了皮秒量级三波长(1059.6,1063.5,1064.9nm)同步锁模脉冲输出,若利用合适的非线性晶体,有望通过差频产生0.4,1,1.4THz的波。

2.3 调谐输出

2013年,Agnesil等^[32]利用Nd:SLG晶体实现了1060~1063nm,1067~1070nm,1078~1083nm波段亚皮秒量级被动锁模脉冲的调谐运转。2014年,Agnesil等^[31]又利用Nd:BLG晶体实现了1070~1090nm波段亚皮秒量级被动锁模脉冲的调谐运转,当输出中心波长为1075nm时,锁模脉冲宽度为290fs。图10为Nd:BLG锁模激光器的实验装置图,其中L为透镜,M1为输入镜,M2和M3均为高反镜,SF10为

棱镜材料,OC 为输出镜,ML 表示锁模,HR 表示高反。图 11 为利用 Nd:BLG 激光器实现被动锁模运转时输出的激光光谱图。

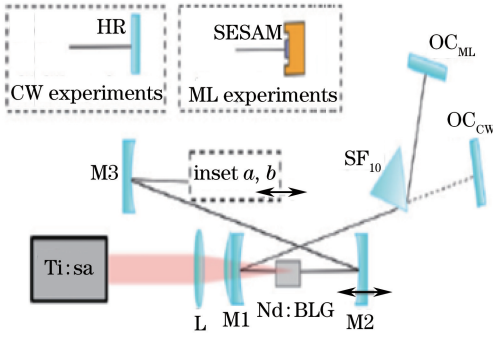


图 10 Nd:BLG 锁模激光器实验装置图^[31]
Fig. 10 Experimental setup of Nd:BLG mode-locked laser^[31]

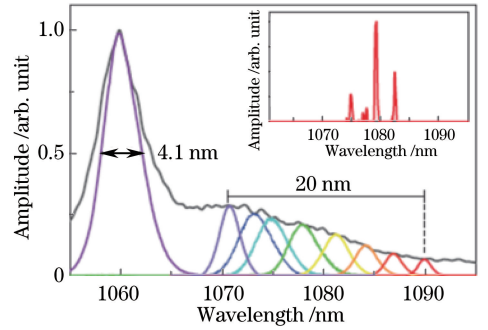


图 11 Nd:BLG 晶体的荧光谱和 Nd:BLG 激光器实现被动锁模运转时输出的激光光谱图^[31]
Fig. 11 Fluorescence spectrum of Nd:BLG crystal and Nd:BLG laser spectrum under mode-locking operation^[31]

3 被动锁模实现 1.3 μm 和 0.9 μm 激光输出

2011 年, Wang 等^[40]首次利用 Nd:LGS 晶体, 实现了运转于准三能级波长的连续激光调谐输出。图 12 是 Nd:LGS 晶体在 850~930 nm 之间的吸收谱和荧光谱^[40]。通过在谐振腔内加入厚度为 100 μm 的标准具, 实现了 899.8~906.6 nm 的连续可调谐激光输出。当输出激光波长为 904 nm、吸收抽运功率为 2.5 W 时, 激光输出功率为 403 mW, 光-光转换效率为 16.1%, 斜率效率为 29.7%。实验结果表明, 通过优化实验条件, 有望利用无序晶体实现准三能级超短脉冲的运转。

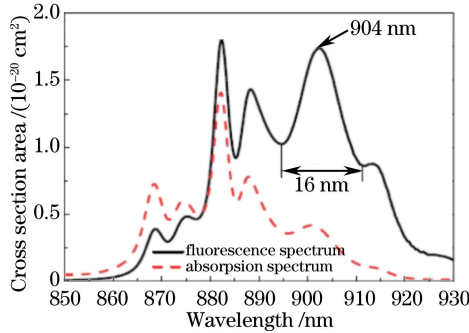


图 12 Nd:LGS 晶体的吸收谱和荧光谱^[40]
Fig. 12 Absorption and fluorescence spectra of Nd:LGS crystal^[40]

4 结 论

Nd³⁺ 掺杂无序晶体具有宽的吸收谱和荧光谱以及优良的热性质, 在产生超短脉冲激光方面以及应用 CPA 放大技术获得超强脉冲激光方面有较好的应用前景。Nd, Y: SrF₂ 晶体是目前唯一通过实验证实可产生小于 100 fs 脉冲的 Nd³⁺ 掺杂无序晶体。因此, 积极开发新的无序晶体或设法改善现有无序晶体的性能是相关研究工作的方向。另外, 基于同一种无序晶体在不同实验条件下实现 1 μm 飞秒被动锁模运转的报道较少, 因此, 基于 Nd³⁺ 掺杂无序晶体的被动锁模研究也是相关研究的方向。

参 考 文 献

- 1 Han S, Lu W, Sheh B Y, *et al.* Generation of sub-40 fs pulses from a mode-locked dual-gain-media Nd:glass laser[J]. Applied Physics B, 2002, 74(S1): S177-S179.
- 2 Kopf D, Kartner F X, Keller U, *et al.* Diode-pumped mode-locked Nd:glass lasers with an antiresonant Fabry-Perot

- saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(10): 1169-1171.
- 3 der Au J A, Kopf D, Morier-Genoud F, *et al.* 60 fs pulses from a diode-pumped Nd:glass laser[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(5): 307-309.
- 4 Agnesi A, Pirzio F, Reali G. Low-threshold femtosecond Nd:glass laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(11): 9171-9176.
- 5 der Au J A, Loesel F H, Morier-Genoud F, *et al.* Femtosecond diode-pumped Nd:glass laser with more than 1 W of average output power[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(4): 271-273.
- 6 Ober M H, Sorokin E, Sorokina I, *et al.* Subpicosecond mode locking of a Nd³⁺-doped garnet laser[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(19): 1364-1366.
- 7 Sorokin E, Ober M H, Sorokina I, *et al.* Femtosecond solid-state lasers using Nd³⁺-doped mixed scandium garnets[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1993, 10(8): 1436-1442.
- 8 Yu Haohai, Pan Zhongben, Zhang Huaijin, *et al.* Investigation of disordered laser crystals[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2015(4): 250-255.
于浩海, 潘忠奔, 张怀金, 等. 无序激光晶体研究进展[J]. *中国科学基金*, 2015(4): 250-255.
- 9 Shi Z B, Fang X, Zhang H J, *et al.* Continuous-wave laser operation at 1.33 μm of Nd:CNGG and Nd:CLNGG crystals[J]. *Laser Physics Letters*, 2008, 5(3): 177-180.
- 10 He K N, Wei Z Y, Li D H, *et al.* Diode-pumped quasi-three-level CW Nd:CLNGG and Nd:CNGG lasers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 19292-19297.
- 11 Zhang B Y, Xu J L, Wang G J, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Nd:GYSGG laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 8(11): 787-790.
- 12 Naito K, Yokotani A, Sasaki T, *et al.* Efficient laser-diode-pumped neodymium-doped calcium-niobium-gallium-garnet laser[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(36): 7387-7390.
- 13 Xu J L, Guo S Y, He J L, *et al.* Dual-wavelength asynchronous and synchronous mode-locking operation by a Nd:CLTGG disordered crystal[J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(1): 53-58.
- 14 Cong Z H, Tang D Y, Tan W D, *et al.* Diode-end-pumped Nd:CaYAlO₄ mode locked laser[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(7): 1967-1969.
- 15 Lagatskii A A, Kuleshov N V, Shcherbitskii V G, *et al.* Lasing characteristics of a diode-pumped Nd³⁺:CaGdAlO₄ crystal[J]. *Quantum Electronics*, 1997, 27(1): 15-17.
- 16 He K N, Liu J X, Wei L, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked 1079 nm Nd:CaGdAlO₄ laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(1): 014203.
- 17 Pan Z B, Zhang H J, Yu H H, *et al.* Growth and characterization of Nd-doped disordered Ca₃Gd₂(BO₃)₄ crystal[J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(1): 197-209.
- 18 Pan Z B, Cong H J, Yu H H, *et al.* Growth, thermal properties and laser operation of Nd:Ca₃La₂(BO₃)₄: A new disordered laser crystal[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6098-6100.
- 19 Wang Qing. Novel all solid-state lasers and amplification of picosecond laser[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 23.
王 庆. 新型全固态激光器及激光放大器及皮秒激光放大的实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 23.
- 20 Wei L, Han H N, Tian W L, *et al.* Efficient femtosecond mode-locked Nd,Y:SrF₂ laser[J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(9): 092704.
- 21 Qin Z P, Xie G Q, Ma J, *et al.* Generation of 103 fs mode-locked pulses by a gain linewidth-variable Nd,Y:CaF₂ disordered crystal[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1737-1739.
- 22 Zhu J F, Zhang L J, Gao Z Y, *et al.* Diode-pumped femtosecond mode-locked Nd,Y-codoped CaF₂ laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(3): 035801.
- 23 Li C, Zhang F, Liu J, *et al.* Continuous-wave and mode-locked operation of a diode-pumped Nd,La:CaF₂ laser[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(9): 1972-1978.
- 24 Wang C Q, Zhang H J, Meng X L, *et al.* Thermal, spectroscopic properties and laser performance at 1.06 and 1.33 μm of Nd:Ca₄YO(BO₃)₃ and Nd:Ca₄GdO(BO₃)₃ crystals[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 220(1): 114-120.
- 25 Jensen T, Ostroumov V G, Meyn J P, *et al.* Spectroscopic characterization and laser performance of diode-laser-pumped Nd:GdVO₄[J]. *Applied Physics B*, 1994, 58(5): 373-379.
- 26 Hughes D W, Phillips M W, Barr J R M, *et al.* A laser-diode-pumped Nd:glass laser: Mode-locked, high power, and single frequency performance[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(4): 1010-1017.
- 27 Zhu J F, Wei L, Tian W L, *et al.* Generation of sub-100 fs pulses from mode-locked Nd,Y:SrF₂ laser with enhancing

- SPM[J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(5): 055804.
- 28 Wang Q, Wei Z Y, Liu J X, *et al.* Mode-locked Nd:LGS laser with femtosecond pulse duration[C]. 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2013: ThA3_7.
- 29 Liu J X, Wang Z H, He K N, *et al.* Passively mode-locked femtosecond laser with an Nd-doped $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ disordered crystal[J]. Optics Express, 2014, 22(22): 26933-26938.
- 30 Liu J X, Wang Z H, Tian W L, *et al.* Observation of self-frequency doubling in diode-pumped mode-locked Nd-doped $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ laser[J]. Chinese Physics Letters, 2015, 32(1): 014206.
- 31 Agnesi A, Pirzio F, Tartara L, *et al.* Tunable femtosecond laser based on the $\text{Nd}^{3+}:\text{BaLaGa}_3\text{O}_7$ disordered crystal[J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(3): 035802.
- 32 Agnesi A, Pirzio F, Tartara L, *et al.* 378 fs pulse generation with $\text{Nd}^{3+}:\text{SrLaGa}_3\text{O}_7$ (Nd:SLG) disordered crystal[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(10): 105815.
- 33 Xie G Q, Qian L J, Yuan P, *et al.* Generation of 534 fs pulses from a passively mode-locked Nd:CLNGG-CNGG disordered crystal hybrid laser[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(7): 483-486.
- 34 Xie G Q, Tang D Y, Tan W D, *et al.* Subpicosecond pulse generation from a Nd:CLNGG disordered crystal laser[J]. Optics Letters, 2009, 34(1): 103-105.
- 35 Luo H, Tang D Y, Xie G Q, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Nd:CLNGG laser[J]. Optics Communications, 2009, 282(2): 291-293.
- 36 Xie G Q, Tang D Y, Tan W D, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Nd:CTGG disordered crystal laser[J]. Applied Physics B, 2009, 95(4): 691-695.
- 37 Xie G Q, Tang D Y, Luo H, *et al.* Dual-wavelength synchronously mode-locked Nd:CNGG laser[J]. Optics Letters, 2008, 33(16): 1872-1874.
- 38 Xie G Q, Qian L J, Xu X D, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Nd: CaNb_2O_6 laser[J]. Laser Physics, 2010, 20(6): 1331-1334.
- 39 Guo S Y, Yuan D R, Cheng X F, *et al.* Growth of a new laser crystal Nd^{3+} doped calcium tantalum gallium garnet by the Czochralski method[J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310(22): 4685-4688.
- 40 Wang Q, Wei Z Y, Zhang Y D, *et al.* Tunable continuous wave laser at quasi-three-level with a disordered Nd:LGS crystal[J]. Optics Letters, 2011, 36(10): 1770-1772.