

激光与光电子学进展

900 nm 波段关键激光材料研究进展

陈应刚^{1,2}, 董贺贺¹, 林治全³, 焦艳^{1,2}, 郭梦婷¹, 王亚飞¹, 王孟¹, 张磊¹,
王世凯^{1***}, 于春雷^{1,3**}, 胡丽丽^{1,3*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光单元技术实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院大学杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024

摘要 Nd³⁺ 900 nm 激光可用于泵浦掺 Yb³⁺ 激光材料和大气探测, 其倍频产生的深蓝激光在面向水下通信、原子冷却、生物医学、激光存储、激光显示及激光加工等领域具有重大意义, 但实现 Nd³⁺ 900 nm 激光必须要解决 Nd³⁺ 1060 nm 跃迁竞争的问题。本文介绍了各类掺 Nd³⁺ 激光材料 900 nm 激光的研究发展历程, 并简单总结了抑制 1060 nm 激光的方法。结合本课题组研究工作, 指出进一步提高 Nd³⁺ 900 nm 激光输出功率, 关键是保证较低浓度猝灭几率并提高材料自身 900 nm 荧光分支比。通过向 Nd³⁺ 石英玻璃中掺入非氧阴离子基团调节 Nd³⁺ 微观配位环境, 大大提高了 Nd³⁺ 900 nm 荧光分支比, 将该玻璃拉制成芯包比为 20/125 μm 光纤, 初步主振荡功率放大实验结果显示, 该光纤对 1060 nm 放大的自发辐射具有很好的抑制效果, 为实现 Nd³⁺ 900 nm 高功率激光输出提供了新的技术方案。

关键词 材料; Nd³⁺ 掺杂石英玻璃; 900 nm 激光; 荧光分支比; 光纤激光; 微观配位环境

中图分类号 TN244

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1516004

Research Progress of Key Laser Materials in 900 nm Band

Chen Yinggang^{1,2}, Dong Hehe¹, Lin Zhiquan³, Jiao Yan^{1,2}, Guo Mengting¹, Wang Yafei¹,
Wang Meng¹, Zhang Lei¹, Wang Shikai^{1***}, Yu Chunlei^{1,3**}, Hu Lili^{1,3*}

¹Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, Zhejiang, China

Abstract Nd³⁺ 900 nm laser can be used for pumping Yb³⁺ laser materials and atmospheric detection. The deep blue laser produced by its frequency doubling has important applications in underwater communications, atomic cooling, biomedicine, laser storage, laser display, and laser processing. However, the realization of Nd³⁺ 900 nm laser must overcome the problem of Nd³⁺ 1060 nm transition competition. This article introduces the development history of various Nd³⁺-doped laser materials 900 nm laser, and briefly summarizes the methods to suppress 1060 nm laser. Combined with the research work of our research group, this article proposes that the key to further increasing the output power of the Nd³⁺ 900 nm laser is to ensure a lower quenching probability and increase the 900 nm fluorescence branching ratio of the material. By incorporating non-oxygen anion groups into Nd³⁺ silica glass to adjust the Nd³⁺ micro-local environment, the Nd³⁺ 900 nm fluorescence branching ratio is greatly improved. Nd³⁺-doped fiber with a core-to-clad ratio of 20/125 μm was drawn from the preform with this silica glass as the core. Preliminary master oscillation power amplification results showed that the fiber had a good inhibition effect on amplified spontaneous emission at 1060 nm. This provides a new method for realizing Nd³⁺ 900 nm high-power laser.

Key words materials; Nd³⁺ doped silica glass; 900 nm laser; fluorescence branching ratio; fiber laser; micro-local environment

收稿日期: 2022-03-17; 修回日期: 2022-04-15; 录用日期: 2022-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(61975216)、浙江省博士后科研项目(ZJ2020070)

通信作者: *hulili@siom.ac.cn; **sdyellcy@163.com; ***woshiwsk@163.com

1 引言

随着激光技术的发展,人们对 900 nm 高能激光器的需求愈加迫切。一方面,900 nm 激光可作为掺 Yb^{3+} 激光材料的泵浦源;另一方面,该波段对应大气传输窗口,可直接应用于大气探测和差分吸收雷达等领域^[1-2]。更重要的是,900 nm 激光可以倍频产生 450 nm 蓝光激光,该波段对应于水下通信窗口,对深海通信、海洋军事等领域具有重大应用意义^[3],尤其是单频蓝光激光具有高相干性,可应用于量子光学、精密光学及原子冷却与俘获^[4-5]。此外,蓝光激光在医疗诊断^[6]、激光存储^[7]、金属加工^[8]、激光显示^[9]及倍频产生深紫外激光^[10]等领域同样具有重要应用。

目前,研究者们主要通过半导体激光器、固体(晶体和陶瓷)激光器和光纤激光器实现 900 nm 激光输出。半导体激光器通过调节禁带宽度选择输出波长,可实现从紫外到红外的全谱激光输出。GaAs 半导体激光器可实现 900 nm 波段的激光输出,辛国锋等^[11]通过金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术生长了 InGaAs/GaAs 半导体激光器线阵列,实现了峰值功率为 60 W 的 900 nm 激光输出。但是,半导体激光器光束质量差,限制了它的应用范围。900 nm 固体激光器根据掺杂离子主要分为钛宝石激光器和 Nd^{3+} 掺杂固体激光器。钛宝石激光器由于具有较宽的吸收和发射带^[12-13],可实现 650~1200 nm 的可调谐输出。张连平等^[13]采用 532 nm 单频绿光激光器端面泵浦钛宝石晶体,实现了 852~934 nm 波段全固态单频可调谐激光输出,当泵浦功率为 15 W 时,获得了平均输出功率大于 2 W 的 922 nm 激光输出,光束质量因子 $M^2 < 1.04$ 。但钛宝石激光器因光学系统复杂无法实现小型化和轻量化,且调谐速度慢、维护成本高。

Nd^{3+} 能级示意图如图 1^[14]所示,其具有 900 nm (${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$)、1060 nm (${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$)、1330 nm (${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$)及 1800 nm (${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$)四个跃迁带^[15-18]。其中,四能

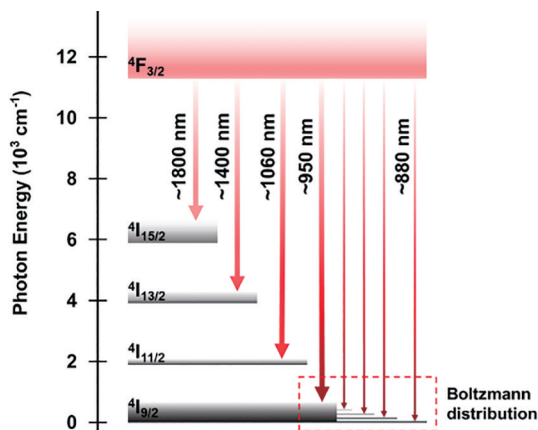


图 1 Nd^{3+} 能级图^[14]

Fig. 1 Energy level diagram of Nd^{3+} ^[14]

级跃迁 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ 最强,通常其发射截面(1060 nm)比其余几个跃迁高近一个数量级,因此 Nd^{3+} 掺杂激光材料通常应用于 1060 nm 激光器。 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ 为三能级跃迁,在 Nd^{3+} 掺杂激光材料中实现 900 nm 激光输出,必须解决 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ 四能级跃迁竞争的问题,这使得实现 Nd^{3+} 900 nm 激光输出具有极大挑战性。目前人们主要采用滤波选模、液氮冷却和波导设计等方法来抑制 1060 nm 激光。除上述提高 900 nm 输出的激光器件设计方法外,为解决三能级跃迁(900 nm)和四能级跃迁(1060 nm)竞争问题,还应通过改变激光材料中 Nd^{3+} 的配位环境提高 900 nm 荧光分支比,使 900 nm 荧光强度接近甚至高于 1060 nm 荧光强度。

本文介绍了用于 900 nm 激光输出的 Nd^{3+} 掺杂激光材料研究进展,主要分为 Nd^{3+} 掺杂固体激光材料和 Nd^{3+} 掺杂光纤激光材料,同时简要说明了相应抑制 1060 nm 激光的技术手段,最后介绍本课题组在 900 nm 激光材料方面的最新研究进展。

2 掺 Nd^{3+} 固体激光材料 900 nm 激光研究进展

Nd^{3+} 掺杂晶体是最早实现 Nd^{3+} 900 nm 激光输出的材料。1978 年, Birnbaum 等^[19]以 514.5 nm 氩离子激光器端面泵浦 $\text{Nd}:\text{CaY}_2\text{Mg}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 晶体获得了 941 nm 激光输出。经过多年的发展,目前用于 Nd^{3+} 900 nm 激光的晶体材料已经形成以石榴石系和钒酸盐系晶体为主的材料体系,功率水平高达 100 W 量级。

图 2^[20]为实现 Nd^{3+} 900 nm 固体激光输出的常用策略。在固体激光器中,人们主要采取两种手段抑制 1064 nm 跃迁:1)采用低温冷却降低基态能级吸收,使基态粒子尽可能处于最低 Stark 分裂能级,形成准四能级激光系统,从而降低激光阈值,实现高效的泵浦和粒子数反转^[18, 21-23],同时低温运转弱化了热效应进而改善光束质量;2)引入二向色膜或腔内棱镜等来抑制四能级跃迁的寄生振荡。通常,在 Nd^{3+} 900 nm 固体激光器中将两种手段连用,以获得更高功率和光束质量的 900 nm 激光。

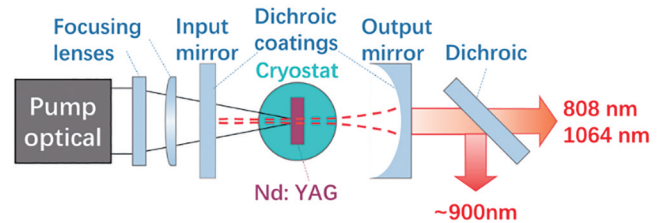


图 2 Nd^{3+} 900 nm 固体激光器的常用策略^[20]

Fig. 2 Common strategies for Nd^{3+} 900 nm solid state lasers^[20]

2.1 掺 Nd^{3+} 钕铝石榴石晶体 ($\text{Nd}:\text{YAG}$)

$\text{Nd}:\text{YAG}$ 晶体具有优异的光学性能、热学性能、机械性能、化学稳定性和较高的稀土离子溶解度,是最早应用于激光增益介质的材料之一, Nd^{3+} 900 nm

激光也因此首先在 Nd:YAG 中进行尝试。1987 年, Fan 等^[21]建立了 Nd:YAG 准三能级连续激光器的理论模型,对 Nd³⁺ 900 nm 激光器的研究具有里程碑意义。同年, Risk 等^[22]利用激光二极管(LD)阵列端面

泵浦 Nd:YAG,首次实现室温下 Nd³⁺ 946 nm 三能级激光输出,并通过腔内倍频获得 473 nm 蓝光激光输出,所用激光装置示意图及激光输出结果如图 3 所示。

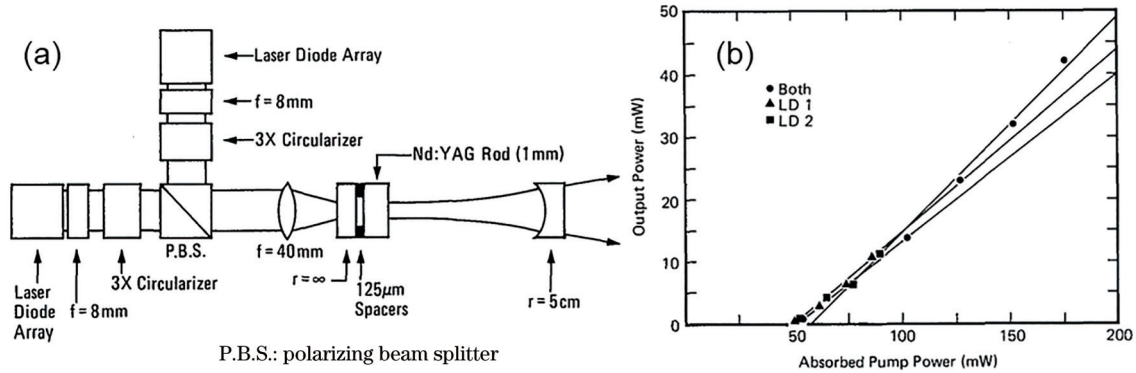


图 3 基于 LD 阵列泵浦 Nd:YAG 900 nm 激光的倍频蓝光激光。(a)装置图;(b)输入-输出功率曲线^[22]

Fig. 3 Frequency doubling blue laser of Nd : YAG 900 nm laser pumped by laser diode array. (a) Experimental setup; (b) curves of output power and pump power^[22]

2003年,Czeranowsky等^[24]利用 10 W 级 LD 端面泵浦 Nd:YAG 晶体,以镀有 808/1064 nm 高透、946 nm 高反选择性透过膜的反射镜及 Nd:YAG 晶体组成谐振腔,并将 Nd:YAG 晶体粘在铜板水冷装置上以抑制基态吸收。最终该装置在腔内加入布儒斯特板的情况下实现了功率为 4.6 W 的 946 nm 线偏光连续输出。将该线偏光通过 BiBO 晶体进行倍频后得到输出功率

2.6 W 的 473 nm 蓝光激光,标志着 LD 泵浦连续波固体蓝光激光器进入瓦级阶段。

2015年,Cho等^[25]研究了 Nd:YAG 的吸收光谱和荧光光谱在 90~290 K 范围内随温度的变化关系(图 4)。并在 120 K 温度下,采用 808 nm LD 泵浦 Nd:YAG 晶体。当泵浦功率为 34.5 W 时,获得了输出功率为 24.4 W 的 946 nm 激光,斜率效率达到 75%。

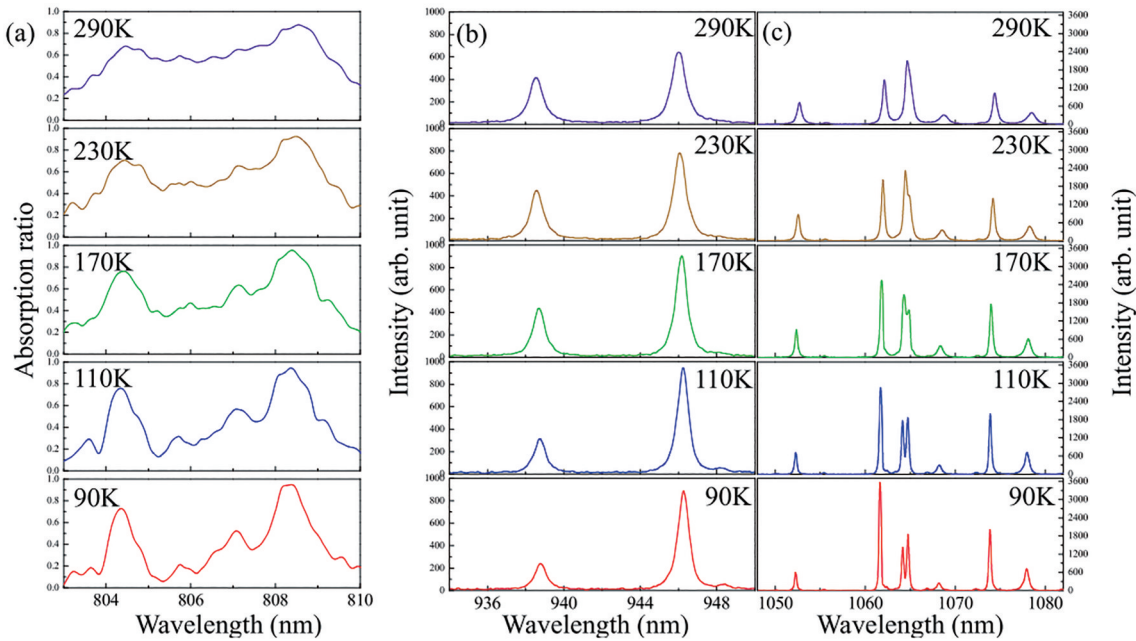


图 4 Nd:YAG 晶体的光谱特性。(a)吸收光谱;(b) $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 跃迁荧光光谱;(c) $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 跃迁荧光光谱^[25]

Fig. 4 Spectral characteristic of the Nd:YAG crystal. (a) Absorption spectra; (b) $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ transition fluorescence spectra; (c) $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ transition fluorescence spectra^[25]

2017年,Sun等^[26]将 WSe₂ 片沉积在掺杂 MgO 的 LiNbO₃(LBO)晶体上获得可饱和吸收体-电光调制器,对 Nd:YAG 900 nm 激光器进行双调 Q 激光输出操作。以

水冷系统控制 Nd:YAG 谐振腔温度为 285 K,在 808 nm LD 泵浦下获得了脉冲能量为 2.63 mJ、脉冲宽度为 10.78 ns、重复频率为 500 Hz 的 946 nm 脉冲激光输出。

2020年,Shayeganrad等^[20]以低温恒温器控制系统温度为 80 K,在真空环境下采用 868 nm LD对Nd:YAG晶体进行同带泵浦。当最大泵浦吸收功率达到 152 W时,获得了平均功率为 113 W连续激光输出,斜率效率高达 80%。至此,基于Nd:YAG 900 nm激光达到了 100 W量级。

除上述钇铝石榴石晶体以外,其他石榴石晶体如Nd:YGG^[27]、Nd:GSAG^[28]、Nd:CNGG^[29]也可实现Nd³⁺ 900 nm激光输出,相应功率水平和光束质量随着激光技术和材料制备技术的发展将得到进一步提升。

2.2 掺Nd³⁺钒酸盐晶体

Nd³⁺掺杂钒酸盐系列晶体材料具有比石榴石系列晶体更大的 900 nm及 1060 nm吸收发射截面,这使得其在相应波段具有更好的增益性能^[30-31]。同时钒酸盐系列

晶体材料具有良好的化学稳定性及导热性能,也是受到广泛研究的激光材料之一。研究人员利用该类晶体在Nd³⁺ 900 nm激光研制上同样取得了一系列研究进展。

2009年,Zheng等^[30]以功率为 38 W的 808 nm LD泵浦Nd:YVO₄晶体,所得 914 nm基频光经过LBO腔内倍频后得到了功率为 13.2 W的 457 nm蓝光激光输出。同年,Gao等^[31]以Nd:GdVO₄晶体作为增益介质,采用 879 nm LD端面同带泵浦Nd:GdVO₄,以BiBO晶体进行腔内倍频,在 11.9 W泵浦功率下产生了 118 mW的 456 nm蓝光激光输出(图 5)。2014年,Gao等^[32]将Nd:LuVO₄晶体用于产生 900 nm激光,该激光器在 29.1 W的 808 nm LD泵浦下获得了波长为 916 nm、平均功率为 1.47 W、重复频率为 100 kHz的调Q激光输出。

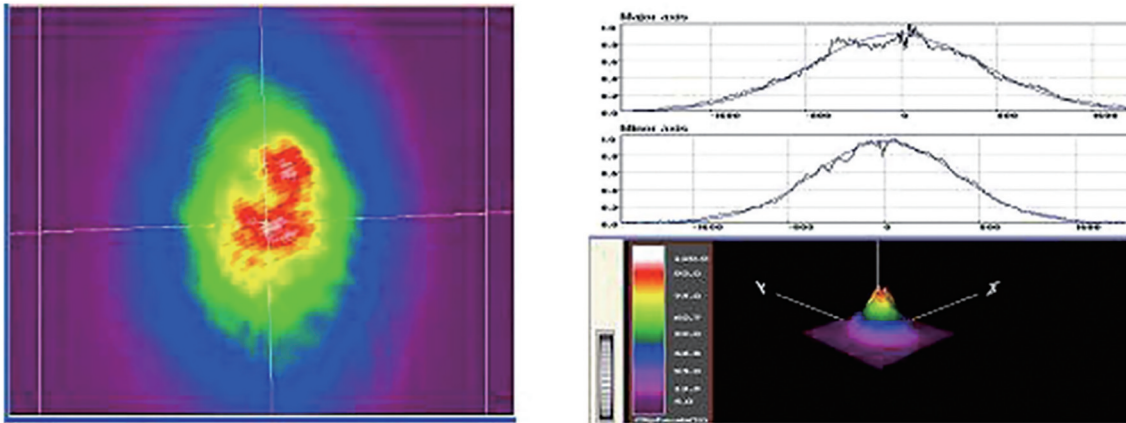


图 5 基于Nd:YVO₄ 900 nm激光倍频的 10 W级蓝光激光^[31]

Fig. 5 10 W grade blue laser produced by Nd:YVO₄ 900 nm laser frequency doubling^[31]

近年来,与V元素同族的Nb、Ta含氧酸盐晶体也被用于Nd³⁺ 900 nm激光研究。2018年,Yan等^[33]在Nd:GdYNbO₄晶体中获得了Nd³⁺ 900 nm激光输出。2020年,Yan等^[34]以Nd:GdTao₄晶体为增益介质获得了 928 nm激光输出。

Nd³⁺掺杂钒酸盐系列晶体在Nd³⁺ 900 nm激光输出方面目前还处于功率比较低的水平(<10 W),但随着该类晶体材料制备工艺的不断提升,激光功率及光束质量将随着晶体质量的提高达到更高水平,未来也将会有更多该类材料实现Nd³⁺ 900 nm激光输出,为 900 nm激光提供更多选择。

2.3 掺Nd³⁺激光陶瓷

激光陶瓷材料既具有激光晶体材料优良的性能,同时兼具制备周期短、成本低、尺寸大等优势,使其成为激光晶体材料的有力替代者。但是受限于陶瓷材料本身的特性和制备技术的发展水平,能达到光学级别的陶瓷材料微乎其微,目前仅有Nd:YAG及Y₂O₃透明陶瓷实现了Nd³⁺ 900 nm激光输出。

2005年,Strohmaier等^[35]在室温下通过 808 nm LD泵浦纳米粉体真空烧结法制备的Nd:YAG陶瓷,首次

在陶瓷材料中获得了最大功率为 1.35 W的 946 nm激光输出。2009年,Zhang等^[36]报道了LD泵浦Nd:YAG陶瓷获得的 946 nm调Q激光,平均功率达到 2.64 W,重复频率达到 50 kHz。2013年,Zhu等^[37]将基于Nd:YAG陶瓷的 900 nm连续激光功率提升至 10 W量级,斜率效率高达 65%。2016年,Chen等^[38]利用Nd:YAG陶瓷进行 900 nm激光实验,并以Cr:YAG作为可饱和吸收体进行被动调Q,获得 946 nm脉冲激光,峰值功率达到 12.4 kW、脉冲宽度达到 13 ns、重复频率达到 8.2 kHz(图 6)。2017年,Sattayaporn等^[39]在Y₂O₃基质中实现了Nd³⁺ 900 nm激光输出,他们以 808 nm LD泵浦恒温 278 K的Nd:Y₂O₃陶瓷,当泵浦吸收功率为 13 W时获得了功率为 1 W的 946 nm激光输出,斜率效率达到 12.4%。

激光陶瓷材料中固有晶界的存在是阻碍其应用的主要原因,实际应用中激光陶瓷材料晶界厚度必须控制在 1 nm以内,这对激光陶瓷材料的制备技术提出了极高要求,也是目前Nd³⁺掺杂陶瓷材料在 900 nm激光输出功率处于较低水平的主要原因。但随着激光陶瓷前驱体粉体制备技术和陶瓷烧结技术的不断发展,掺

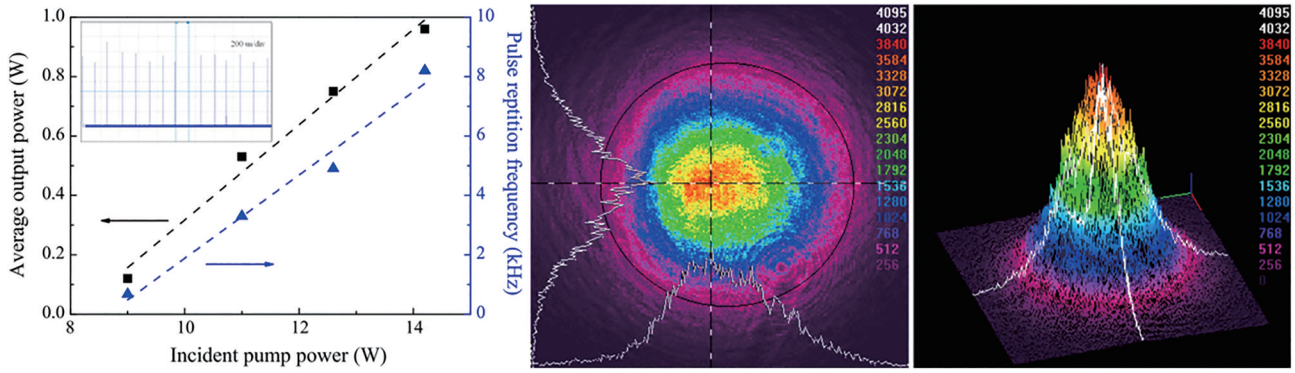


图 6 基于 Cr:YAG 可饱和吸收体的 Nd:YAG 陶瓷 900 nm 调 Q 激光^[38]

Fig. 6 Nd:YAG ceramic 900 nm Q-switched laser based on Cr:YAG saturable absorber^[38]

Nd³⁺ 激光陶瓷将会有较大发展空间。

随着泵浦光源半导体激光器的发展和晶体、陶瓷材料的不断革新,900 nm Nd³⁺ 掺杂固体激光器已经达到较高水平,将相关研究工作成果总结于表 1 中。

然而通过引入低温冷却系统和 1060 nm 选择损耗系统抑制四能级跃迁竞争,一方面效果不佳,另一方

面,这两种手段带来复杂结构和庞大体积的问题又阻碍着 900 nm 激光器的发展。为进一步提高 900 nm 激光器的功率水平,需将泵浦光束聚焦到很小范围内以提高泵浦功率密度,因此,900 nm 光纤激光器得到了极大的研究关注。

表 1 掺 Nd³⁺ 固体激光材料 900 nm 激光研究进展

Table 1 Research progress of Nd³⁺ doped solid laser materials in 900 nm laser

Year	Researcher	Material	Scheme	Research level
1978	Birbaum	Nd:CaY ₂ Mg ₂ Ge ₃ O ₁₂	514.5 nm Ar ⁺ laser end pump	941 nm
1987	Risk	Nd:YAG	808 LD pump, room temperature; LiIO ₃	42 mW@946 nm, 16%, TEM ₀₀ mode; 100 μW@473 nm
2017	Sun	Nd:YAG	Double Q-switched, water cooled is 12 °C	946 nm, 2.63 mJ, 10.78 ns, 500 Hz, M _x ² = 3.85, M _y ² = 3.86.
2020	Shayeganrad	Nd:YAG	868 nm LD pump, closed-cycle acoustic Stirling cryostat is 80 K	113 W@946 nm, efficiency is 80%
2011	Fix	Nd:YGG	806 nm LD pump, MOPA	935 nm, 30 mJ, 100 Hz, M ² = 1.4
2011	Lv	Nd:CNGG	806 nm LD pump, thermal electronic cooled is 15 °C, BiBO	490 mW@468 nm, M _x ² = 1.27, M _y ² = 1.41
2009	Zheng	Nd:YVO ₄	806.4 nm LD, thermoelectric cooled is 23 °C, LBO	13.2 W@457 nm, efficiency is 34.7%, M _x ² = 2.13, M _y ² = 2.53
2014	Gao	Nd:LuVO ₄	808 nm LD end-pumped, acousto-optical Q-switched	1.47 W@916 nm, 100 kHz, 144 mW@458 nm, 20 kHz
2020	Yan	Nd:GdTaO ₄	879 nm LD pump	928 nm, 13.5 mJ, 100 Hz, M _x ² = 1.4, M _y ² = 1.8
2005	Strohmaier	Nd:YAG ceramic	808 nm LD pump	1.35 W@946 nm
2016	Chen	Nd:YAG ceramic	Cr:YAG passively Q-switched	0.96 W@946 nm; 12.4 kW, 13 ns, 8.2 kHz
2017	Sattayaporn	Nd:Y ₂ O ₃ ceramic	808 nm LD, water-cooled is 5 °C	1 W@946 nm, efficiency is 12.4%

3 掺 Nd³⁺ 激光光纤 900 nm 激光研究进展

相较于固体激光器,900 nm 光纤激光器利用同一

泵浦光源可获得更高的泵浦功率密度。同时光纤的柔韧性、大比表面积、长增益距离和波导可设计等优势,使其具有更好的热管理能力,并可通过光纤端面折射率分布调节、引入弯曲损耗、波导设计、芯包比调整和

优化光纤长度等方式抑制 1060 nm 跃迁竞争,避免了散热系统和空间光学器件带来的结构复杂和体积庞大问题。

1986 年,南安普敦大学 Alcock 等^[40-41]首次在 Nd³⁺ 掺杂的单模石英光纤中实现 Nd³⁺ 900 nm 激光输出,他们以功率为 53 mW 的 590 nm 染料激光器泵浦长度为 1 m 的掺 Nd³⁺ 石英光纤(NDF),获得了 900~945 nm 范围内的可调谐激光输出,他们指出可通过优化光纤长度来减小三能级跃迁自吸收作用。至今,针对掺 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光器,研究者们主要聚焦于 Nd³⁺ 掺杂石英光纤的结构和光纤激光技术。以下将对国内外在掺 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光器方面取得的进展进行概述。

3.1 国外研究进展

英国南安普敦大学是最早开展掺 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光器研究的单位,除以上 Alcock 所在课题组开展的研究以外,光电研究中心 Nilsson 课题组在 2004 年前后也对掺 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光器开展了较为系统的研究工作。他们利用改进的化学气相沉积(MCVD)技术制备了 Al-Nd 共掺 W 型石英光纤,端面折射率分布如图 7^[42]所示,该光纤表现出了对 900~1000 nm 波段激光的择优传输,不同弯曲半径引入的弯曲损耗对波长又具有不同程度选择作用。他们以包层几何形状截断的方式增强泵浦吸收,该光纤在 808 nm LD 双端面泵浦下获得了最大功率为 2.4 W 的 900 nm 连续激光输出,斜率效率为 41%,泵浦阈值为 1.68 W。此外,他们还研究了不同光纤长度对激光器调谐范围的影响。2005 年,他们对 W 型光纤端面折射率分布及弯曲损耗抑制长波的作用进行了理论研究及实验证实,并通过优化后的光

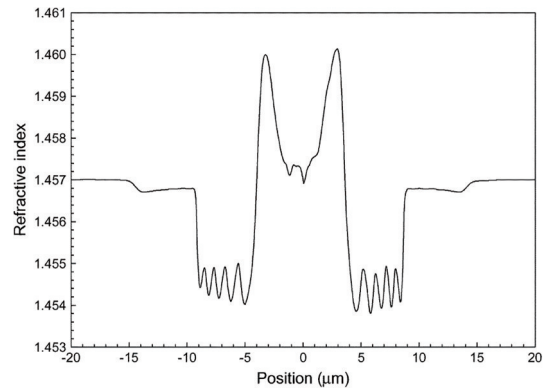


图 7 W 型包层光纤剖面折射率分布^[42]

Fig. 7 Measured refractive index profile for W-type fiber^[42]

纤激光器获得了功率为 705 mW 的 900 nm 连续激光^[43]。2006 年,该课题组又制备了大纤芯面积 Al-Nd 共掺空芯石英光纤,其空芯结构表现出很好的长波抑制效果,通过包层泵浦获得了 927 nm 近衍射极限的调 Q 激光输出,且该激光器可实现 919~935 nm 可调谐输出^[44]。

近十年来,法国诺曼底大学 Laroche 课题组在掺 Nd³⁺ 900 nm 及其倍频光纤激光器方面开展了一系列重要工作^[45-46];2009 年,他们研究了 Al-Nd 共掺 W 型石英光纤中 Nd³⁺ 团簇对 930 nm 激光的影响;2010 年,他们以 Nd³⁺ 掺杂 W 型双包层光(芯包比为 5/125 μm)作为增益介质设计了如图 8^[46]所示的光路系统,平均功率为 75 mW 的信号光通过两级放大获得了平均功率为 2.08 W 的 900 nm 脉冲激光,该激光经过恒温于 1~2 °C 的周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体倍频后获得了平均功率为 308 mW 的 464 nm 脉冲蓝光激光输出,脉冲宽度为 90 ps、重复频率为 41 MHz。

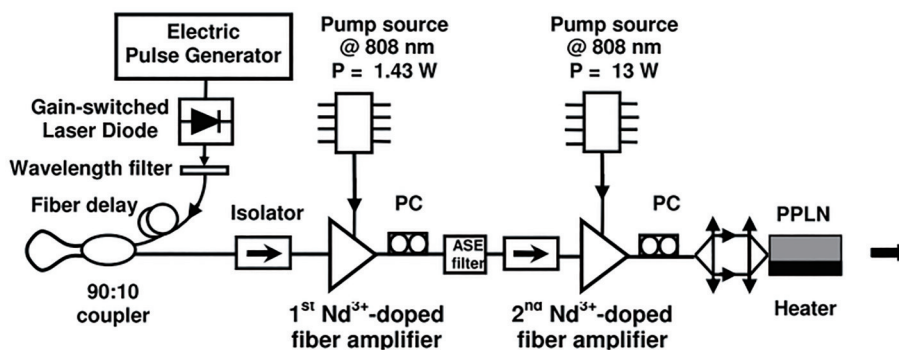


图 8 基于 W 型 Nd 石英光纤的皮秒脉冲蓝光激光^[46]

Fig. 8 Picosecond pulsed blue light laser based on W type Nd-doped silica fiber^[46]

2013 年,Laroche 等^[47]通过模拟 Nd³⁺ 掺杂石英光纤中 900 nm 及四能级跃迁激光的竞争过程优化了光纤芯包比,最终以大模场光纤(芯包比为 20/80 μm)作为增益介质实现了 20 W 量级 900 nm 连续激光输出。2018 年,他们又以功率为 60 W 的 808 nm 光纤耦合 LD 泵浦芯包比为 20/60 μm 的 Nd³⁺ 掺杂双包层石英光纤,采用三硼

酸锂(LBO)晶体作为倍频晶体设计了如图 9^[48]所示的蝶形腔,获得了高达 7.5 W 的 452 nm 蓝光激光输出,该研究还建立了优化和分析近红外-蓝光倍频转换效率的数值模型,并指出可利用 Nd³⁺ 掺杂保偏光纤获得更高功率的蓝光激光。至今,该课题组已实现了 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光的四倍频输出^[49],在 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光及

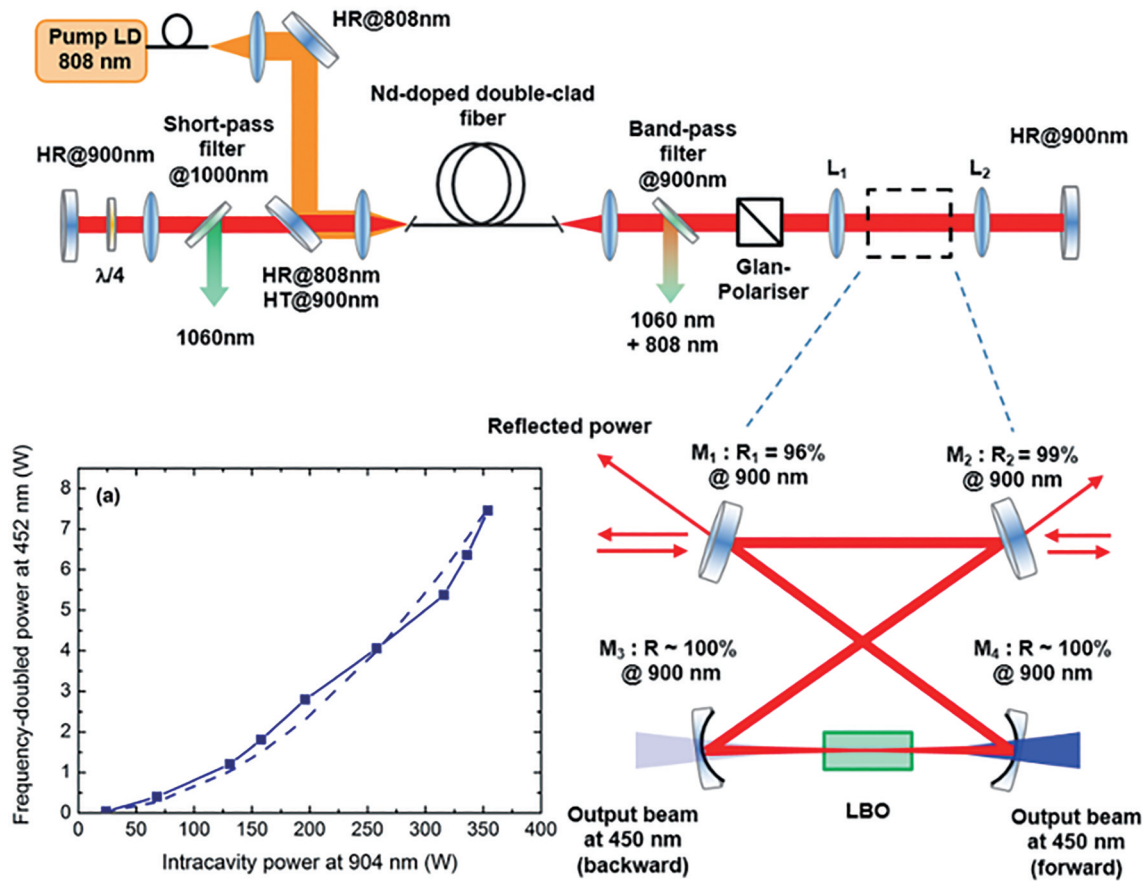


图 9 基于大模场光纤 Nd 石英光纤的近十瓦蓝光激光^[48]

Fig. 9 Close to ten watt blue laser based on large-mode-area Nd-doped silica fiber^[48]

其倍频激光研究中处于世界领先水平。

除以上两家单位以外,美国利弗莫尔实验室^[49]和英国巴斯大学^[50]分别利用如图 10 所示光子晶体光纤也获得了 Nd³⁺ 900 nm 激光。

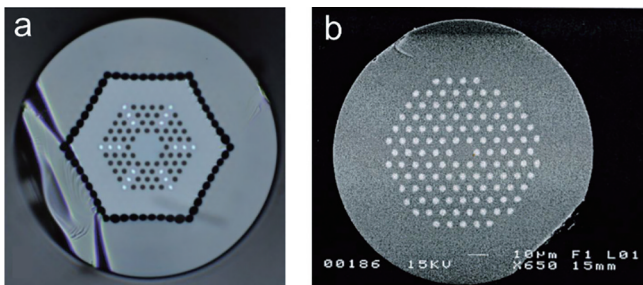


图 10 用于 Nd³⁺ 900 nm 激光的大模场光子晶体光纤。(a)外径为 225 μm^[49]; (b)外径为 125 μm^[50]

Fig. 10 Large mode field photonic crystal fibers for Nd³⁺ 900 nm laser. (a) 225 μm diameter^[49]; (b) 125 μm diameter^[50]

3.2 国内研究进展

国内关于掺 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光的研究起步相对较晚。北京大学王爱民课题组主要面向生物双光子成像应用的 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光研究^[51]。2016 年,他们利用法国鲁昂大学研发的 W 型 Nd³⁺ 掺杂 900 nm 光纤构建锁模激光光源^[52],通过预啾啾技术优化了 910 nm

脉冲,脉冲宽度为 114 fs,脉冲能量为 4.4 nJ;将该光源应用于斑马鱼体内成像获得了图 11^[53]中较为清晰的生物成像结果。2017 年,他们在空芯光子禁带光纤中实现了脉冲能量为 17.4 nJ、脉冲宽度为 220 fs 的 930 nm 脉冲激光输出,重复频率达到 46 MHz,并用该激光器作为光源对斑马鱼的血管进行体成像实验,表现出较好的集成效果及生物成像效果^[54]。2021 年,他们又建

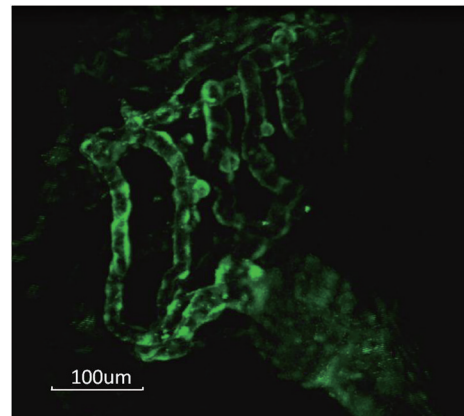


图 11 利用 Nd³⁺ 900 nm 飞秒光纤激光器获得的斑马鱼血管荧光成像^[53]

Fig. 11 Fluorescence imaging of zebrafish blood vessels by Nd³⁺ 900 nm femtosecond fiber laser^[53]

立了飞秒保偏 Nd 光纤激光器,该激光器输出中心波长位于 920 nm,脉冲最宽光谱宽度为 25.2 nm,腔外压缩时脉宽为 109 fs,该激光器在花粉双光子自荧光显微成像实验中表现出良好的成像效果^[55]。

2019 年, Wang 等^[56]在掺 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光器研究中也取得较为突出的成果(图 12)。他们以管棒法将 Nd:YAG 晶体作为纤芯前驱体,制备了包层为纯石英、纤芯为高 Al、Y 含量的 Nd³⁺ 玻璃复合光纤,芯包比为 10/125 μm,该光纤在 915 nm 处的增益系数高达 0.4 dB/cm,利用 3.5 cm 长的短复合光纤获得了 915 nm 激光振荡,信噪比超过 50 dB。2020 年,他们基于商用保偏掺 Nd³⁺ 石英光纤,建立了用于 900 nm 激光的全光纤激光器,在 915 nm 获得了高达 1.0 dB/cm 的增益^[57]。

总之,国内在掺 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光方面的研

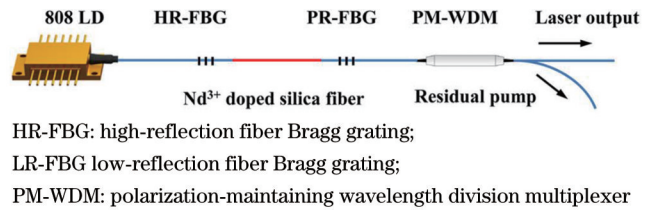


图 12 Nd³⁺ 900 nm 全光纤激光器^[56]

Fig. 12 Experimental setup of Nd³⁺ 900 nm all-fiber laser^[56]

究仍处于起步阶段,理论方面主要借鉴国际上较为成熟的模型,在高功率 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光器研制方面任重道远。

随着光纤制备技术及激光技术的不断发展,掺 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光器功率水平不断接近 900 nm Nd³⁺ 掺杂固体激光器,将国内外掺 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光器方面取得的研究进展列于表 2 中。

表 2 掺 Nd³⁺ 激光光纤 900 nm 激光研究进展
Table 2 Research progress of Nd³⁺ doped optical fiber 900 nm laser

Years	Researcher	Affiliation	Type of NDF	Scheme	Research level
1986	Alcock	University of Southampton	Monomode fiber	590 nm dye laser pump	900–945 nm tunable
2004	Nilsson	University of Southampton	9/100 μm, W-type, double-clad	808 nm LD pump at both fiber ends	2.4 W, 922–942 nm tunable, 41%
2006	Nilsson	University of Southampton	Depressed clad hollow optical fiber	LD pump, water cooling	4.6 W@927 nm, M ² =1.08
2010	Laroche	Université de Caen	5/125 μm, W-type, double-clad	MOPA, two-stage amplifier, PPLN(1–2 °C)	2.08 W@928 nm, 308 mW@464 nm
2018	Laroche	Normandie Université	20/60 μm, double-clad	Bow-tie cavity	7.5 W@452 nm, M _x ² =1.0, M _y ² =1.5
2021	Laroche	Normandie Université	20/60 μm and 30/130 μm	Amplified Q-switched oscillator	24 W@905nm, 510 mW@226 nm
2015	Pax	LLNL*	Photonic crystal fiber	808/880 nm LD pump	11.5 W, efficiency is 55%, M ² =1.35
2006	Knight	University of Bath	Photonic bandgap fiber	808 nm Ti:sapphire laser pump	250 mW, Slop efficiency is 32%
2016	Wang A	Peking University	5 μm core diameter, W-type	Pre-chirp, 808 nm LD pump at both fiber ends	220 mW@920 nm, 18%, 114 fs, 4.4 nJ
2021	Wang A	Peking University	Polarization-maintaining fiber	Nonlinear amplifying loop mirror	400 mW@920 nm, 25.2 nm 109 fs
2019	Wang Y	SCUT**	10/125 μm, Y-Al-Si @ silica fiber	All-fiber, 808 nm LD pump	915 nm, signal-to-noise ratio is 50 dB
2020	Wang Y	SCUT	Polarization-maintaining fiber	All-fiber, 808 nm LD pump	915 nm, gain is 1.0 dB/cm
2021	Fu S	University of Arizona	4.4/125 μm, phosphate fiber	All-fiber, 808 nm LD pump	13.5 mW@915 nm, efficiency is 7.9%

(note: *LLNL means Lawrence Livermore National Laboratory, **SCUT means South China University of Technology)

如前所述,无论是国内还是国际上,目前掺 Nd³⁺ 900 nm 光纤激光器研究主要基于 Nd³⁺ 掺杂石英光纤开展,而其他组分玻璃光纤仅磷酸盐玻璃光纤有所报道,但其输出功率仍处于较低水平(mW 量级)^[58]。

Nd³⁺ 掺杂石英光纤适用于获得 900 nm 激光,这主要是因为其本身优良的热机械性能有利于实用化,同时具有比在其他基质中更高的 900 nm 荧光分支比。此前的研究主要是从激光技术及冷却系统方面着手,对

Nd^{3+} 的四能级跃迁激光进行抑制,但随着掺 Nd^{3+} 900 nm 光纤激光器的发展,对 900 nm 高功率激光的要求不断提升,上述方式已难以进一步提升激光器的功率水平。欲从根本上解决四能级跃迁竞争问题,应在保持较高 Nd^{3+} 掺杂浓度的同时提高 900 nm 荧光分支比。

早在 1997 年,Dragic 等^[1,59]就对比了几种商用 Al、P、Ge 共掺 Nd^{3+} 石英玻璃的荧光光谱,并指出共掺剂的加入可提高 Nd^{3+} 的掺杂浓度,但会导致 Stark 能级劈裂程度降低,使 Nd^{3+} 的 900 nm 发光波长蓝移,且带来基态吸收问题,不利于粒子数反转实现 900 nm 激光输出。然而该研究并未给出几种光纤的确切组成,也未提出既能提高 Nd^{3+} 掺杂浓度又保证较强 Stark 分裂的办法。在此后近 20 年的研究中,研究者们多将目光集中于 Nd^{3+} 900 nm 激光的激光技术,而对材料本身性质却鲜有研究。但这一状况在日前有所转变,2019 年,Wang 等^[60]对锗磷酸盐中 Nd^{3+} 的发光特性及微观结构进行了研究,并指出 Ge 含量提高有利于 Nd^{3+} 900 nm 发光,但 900 nm 荧光分支比仍低于 50%。

4 本课题组掺 Nd^{3+} 石英玻璃与光纤 900 nm 激光研究进展

通常, Nd^{3+} 掺杂石英玻璃具有比其他 Nd^{3+} 掺杂激光材料更高的 900 nm 荧光分支比,是一种很好的 Nd^{3+} 900 nm 激光材料。但 Nd^{3+} 石英玻璃中存在严重的浓度猝灭,一般通过共掺入 Al、P 等元素提高 Nd^{3+} 的溶解度。如前所述,向 Nd^{3+} 石英玻璃中引入共掺剂时,会提高 Nd^{3+} 离子周围配位环境的对称性,降低 Nd^{3+} 能级劈裂程度,增强基态吸收,不利于基态能级排空,从而难以实现 Nd^{3+} 900 nm 三能级跃迁激光。因此在 Nd^{3+} 掺杂石英玻璃中提高 900 nm 荧光与抑制浓

度猝灭之间存在矛盾性,需优化 Al、P 共掺剂的比例和 Nd^{3+} 的浓度,在保证 Nd^{3+} 浓度猝灭效应较小的情况下,尽可能提高 Nd^{3+} 的掺杂浓度和 900 nm 荧光分支比。另一方面,要从本质上解决这一矛盾,需要引入新成分来革新性地改变 Nd^{3+} 的配位环境,在 Nd^{3+} 较高掺杂浓度下,既能保证较低 Nd^{3+} 浓度猝灭水平又能大大提高 Nd^{3+} 900 nm 荧光分支比,这是 Nd^{3+} 900 nm 光纤激光进一步发展的关键。

为深入理解 Nd^{3+} 900 nm 发光机制,获取组分优化的 Nd^{3+} 掺杂石英玻璃,本课题组利用创新发展的溶胶凝胶法结合纳米粉体烧结技术制备 S^{2-} 、 I^- 、 Br^- 等非氧阴离子基团共掺的 Al-Nd 石英玻璃,利用该方法,我们已经对多种稀土掺杂石英玻璃及光纤做了较深入的研究,可实现高精度高均匀性组分调控^[61-65]。目前我们已经通过该方法制备了高光学质量的 I-Al-Nd 共掺石英玻璃及光纤,图 13^[66]为 Al-Nd 共掺和 I-Al-Nd 共掺石英玻璃的荧光光谱及荧光衰减谱。显然,引入 I^- 可在保持石英玻璃较长的荧光寿命的同时,显著提高 900 nm 荧光相对强度,这种荧光行为的变化可归因于非氧阴离子进入石英玻璃网络结构后与 Nd^{3+} 离子直接配位,导致 Nd^{3+} 离子电子云发生重排。因此,引入 I^- 是一种保持 Nd^{3+} 低浓度猝灭水平同时提高 900 nm 荧光的有效手段,对研制高 900 nm 荧光分支比的 Nd^{3+} 掺杂玻璃材料以实现 Nd^{3+} 900 nm 高功率激光具有重要意义。相似地,向 Al-Nd 共掺石英玻璃中引入 S^{2-} 、 Br^- 等非氧阴离子基团,也会大大改变 Nd^{3+} 周围的配位环境,在 Nd^{3+} 较高掺杂浓度下,既能保证较低的 Nd^{3+} 浓度猝灭水平又大大提高了 Nd^{3+} 900 nm 荧光强度比,J-O 理论计算荧光分支比达到 0.4 以上。关于非氧阴离子对 Nd^{3+} 纳米尺度微观结构及光谱性能的影响机理,我们将在后续研究中介绍。

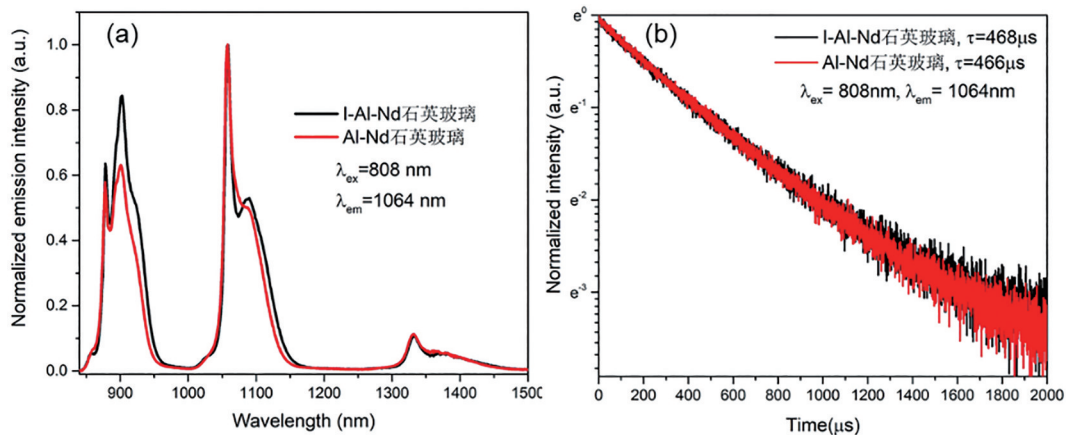


图 13 Al-Nd 共掺和 I-Al-Nd 共掺石英玻璃。(a)归一化荧光光谱;(b)荧光衰减谱^[66]

Fig. 13 Al-Nd co-doped and I-Al-Nd co-doped silica glass. (a) Normalized fluorescence spectrum; (b) fluorescence decay spectrum^[66]

将该石英玻璃控制成芯包比为 20/125 μm 的石英光纤,光纤结构如图 14(b)中的插图所示。采用图 14(a)中的主振荡功率放大(MOPA)结构进行初步激光放

大实验。以 808 nm LD 作为泵浦源,0.72 W 的 915 nm 光纤激光作为种子源,光纤长度为 1 m。图 14(b)为该光纤放大器的输入-输出曲线,当泵浦功率达到 28.7 W

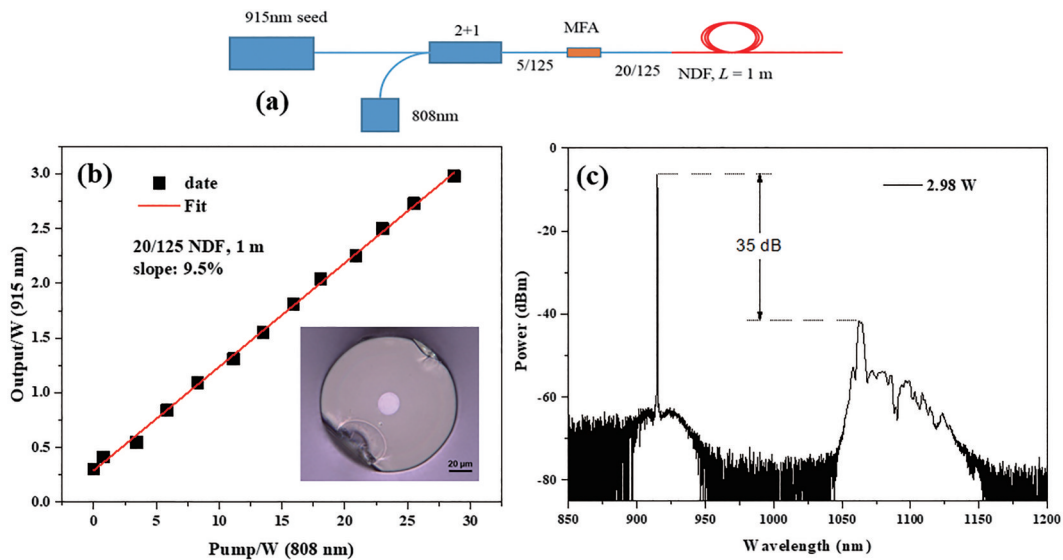


图 14 I-Al-Nd 共掺石英光纤 MOPA 放大器。(a)光路图;(b)输入-输出曲线;(c)激光光谱图(插图:I-Al-Nd 共掺石英光纤端面)
Fig. 14 MOPA amplifier based on I-Al-Nd co-doped silica fiber. (a) Optical path diagram; (b) input-output curve; (c) laser spectrum (inset: micrograph of the I-Al-Nd co-doped silica fiber cross section)

时,可获得 2.98 W 的 915 nm 激光输出,斜率效率为 9.5%,剩余泵浦光影响了激光效率。需要指出的是,初步实验中吸收泵浦的效率并不高,若只考虑吸收的泵浦功率,吸收-输出效率将达到 25.2%。图 14(c)为输出功率为 2.98 W 时放大器的激光光谱图,915 nm 激光强度比 1064 nm 放大的自发辐射(ASE)高 35 dB,说明光纤对 1064 nm ASE 具有较好的抑制作用。下一步,我们将在光纤芯包比、纤芯形状、数值孔径等方面对光纤结构进行优化,相应结果将在后续报道中呈现。

5 结束语

实现 Nd^{3+} 900 nm 三能级跃迁激光是一项既具有重要性又具有挑战性的工作。它的重要性来源于激光技术发展对 900 nm 激光的重大需求,它的挑战性来源于它自身的三能级跃迁性质及四能级跃迁的竞争问题。为克服这些问题,研究者们采取了低温运转降低基态吸收和滤波选模抑制四能级寄生振荡的方式,在 Nd^{3+} 掺杂固体激光材料及光纤激光材料中均取得卓越的成就。然而这些方法均以牺牲一定的上能级粒子数、扩大激光器体积和复杂性为代价,不利于 Nd^{3+} 900 nm 高功率高效率激光的应用和发展。欲从根本上解决基态吸收及四能级跃迁竞争问题,应从材料本身特性出发,通过材料改性在保证高 Nd^{3+} 掺杂低浓度猝灭的同时提高 900 nm 荧光分支比。

Nd^{3+} 掺杂石英玻璃本身具有较高的 900 nm 荧光分支比,浓度猝灭问题是阻碍其应用的主要原因。通过引入共掺剂可有效改善 Nd^{3+} 在石英玻璃中的浓度猝灭,但常规共掺剂如 Al、P 等的引入会提高 Nd^{3+} 周围微观对称性,使其 Stark 能级劈裂降低,发光蓝移,基态吸收增强,不利于 900 nm 三能级跃迁激光输出。特

别地,当在 Al-Nd 共掺石英玻璃中引入非氧阴离子时,900 nm 荧光相对强度得到提升,同时 Nd^{3+} 浓度猝灭处于较低水平,以该玻璃拉制的芯包比为 20/125 μm 的光纤在初步 MOPA 实验中表现出对 1064 nm ASE 较好的抑制效果,这为 Nd^{3+} 900 nm 激光材料的研制提供了新的发展方向。下一步我们将围绕非氧阴离子共掺杂对 Nd^{3+} 石英玻璃光谱性能的调节机理及相应光纤激光器进行研究,以期获得高功率高效率的 Nd^{3+} 900 nm 光纤激光器。

参 考 文 献

- [1] Dragic P D, Little L M, Papen G C. Fiber amplification in the 940-nm water vapor absorption band using the $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$ transition in Nd[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(11): 1478-1480.
- [2] Cook A L, Hendricks H D. Diode-laser-pumped tunable 896—939.5-nm neodymium-doped fiber laser with 43-mW output power[J]. Applied Optics, 1998, 37(15): 3276-3281.
- [3] Schirripa S G, Cozzella L, Leccese F. Underwater optical wireless communications: overview[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2261.
- [4] Li F Q, Zhao B, Wei J, et al. Continuously tunable single-frequency 455 nm blue laser for high-state excitation transition of cesium[J]. Optics Letters, 2019, 44(15): 3785-3788.
- [5] 彭瑜, 赵阳, 李焯, 等. 3 种方法实现 461 nm 外腔倍频激光器的锁定[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 345-350.
Peng Y, Zhao Y, Li Y, et al. Three methods to lock the second harmonic generation for 461 nm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(2): 345-350.
- [6] Schwartz J L, Bonnet N A, Patterson G H. Photobleaching and photoactivation: following protein dynamics in living cells[J]. Nature Cell Biology, 2003, 5(9): 7-14.

- [7] 沈全洪, 徐端颀, 齐国生, 等. 高密度蓝光存储及其扩展技术[J]. 光学技术, 2005, 31(6): 921-924, 927.
Shen Q H, Xu D Y, Qi G S, et al. Blue-laser optical recording and its extended technology[J]. Optical Technique, 2005, 31(6): 921-924, 927.
- [8] 顾波. 高功率蓝光半导体激光器为金属加工打开了新的大门[J]. 金属加工(热加工), 2021(3): 1-6.
Gu B. High power blue-light semiconductor laser has opened a new door for metal processing[J]. MW Metal Forming, 2021(3): 1-6.
- [9] 高伟男, 许祖彦, 毕勇, 等. 激光显示技术发展的现状和趋势[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 85-91.
Gao W N, Xu Z Y, Bi Y, et al. Present development and tendency of laser display technology[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 85-91.
- [10] Le Corre K, Gilles H, Girard S, et al. Large core, low-NA Neodymium-doped fiber for high power CW and pulsed laser operation near 900 nm[C]//Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C), September 29-October 3, 2019, Austria Center, Vienna. Washington, D.C.: OSA, 2019: JTU3A.20.
- [11] 辛国锋, 冯荣珠, 陈国鹰, 等. 900 nm 高功率半导体激光器线阵列[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(3): 43-44.
Xin G F, Feng R Z, Chen G Y, et al. 900 nm high output power semiconductor laser linear array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(3): 43-44.
- [12] Gong Q R, Zhao C C, Yang Y L, et al. Theoretical study on residual infrared absorption of Ti: sapphire laser crystals[J]. Photonics Research, 2021, 9(6): 909-915.
- [13] 张连平, 殷国玲, 李凤琴, 等. 900 nm 波段的全固态高功率单频可调谐钛宝石激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1201002.
Zhang L P, Yin G L, Li F Q, et al. All-solid-state tunable Ti: sapphire laser with high-power and single-frequency at 900 nm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1201002.
- [14] Johnson L F, Thomas R A. Maser oscillations at 0.9 and 1.35 microns in $\text{CaWO}_4: \text{Nd}^{3+}$ [J]. Physical Review, 1963, 131(5): 2038-2040.
- [15] Dawson J W, Drobshoff A, Liao Z M, et al. High-power 938-nm cladding pumped fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4974: 75-82.
- [16] 胡丽丽, 姜中宏. 磷酸盐激光玻璃研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2005, 24(5): 125-129, 135.
Hu L L, Jiang Z H. Research progress of phosphate laser glass[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2005, 24(5): 125-129, 135.
- [17] Lin B, Xiao K, Zhang Q L, et al. Dual-wavelength Nd: YAG laser operation at 1319 and 1338 nm by direct pumping at 885 nm[J]. Applied Optics, 2016, 55(8): 1844-1848.
- [18] Tian Q Y, Xu B, Zhang Y S, et al. 1.83- μm high-power and high-energy light source based on 885-nm in-band diode-pumped Nd: YAG bulk laser operating on ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ transition[J]. Optics Express, 2019, 27(9): 12565-12571.
- [19] Birnbaum M, Tucker A W, Fincher C L. CW room-temperature laser operation of Nd: CAMGAR at 0.941 and 1.059 μm [J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(5): 2984-2985.
- [20] Shayeganrad G, Cante S, Mosquera J P, et al. Highly efficient 110-W closed-cycle cryogenically cooled Nd: YAG laser operating at 946 nm[J]. Optics Letters, 2020, 45(19): 5368-5371.
- [21] Fan T, Byer R. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd: YAG laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(5): 605-612.
- [22] Risk W P, Lenth W. Room-temperature, continuous-wave, 946-nm Nd: YAG laser pumped by laser-diode arrays and intracavity frequency doubling to 473 nm[J]. Optics Letters, 1987, 12(12): 993-995.
- [23] Wallace R W, Harris S E. Oscillation and doubling of the 0.946- μ line in Nd^{3+} : YAG[J]. Applied Physics Letters, 1969, 15(4): 111-112.
- [24] Czeranowsky C, Heumann E, Huber G. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd: YAG-BiBO laser with 2.8-W output power at 473 nm[J]. Optics Letters, 2003, 28(6): 432-434.
- [25] Cho C Y, Lee C Y, Chang C C, et al. 24-W cryogenically cooled Nd: YAG monolithic 946-nm laser with a slope efficiency $>70\%$ [J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10126-10131.
- [26] Sun Y X, Bai Y, Li D, et al. 946 nm Nd: YAG double Q-switched laser based on monolayer WSe_2 saturable absorber[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21037-21048.
- [27] Fix A, Ehret G, Löhning J, et al. Water vapor differential absorption lidar measurements using a diode-pumped all-solid-state laser at 935 nm[J]. Applied Physics B, 2011, 102(4): 905-915.
- [28] Li Y L, Jiang H L, Ni T Y, et al. Diode-pumped CW frequency-doubled Nd: GSAG-LBO blue laser at 471 nm [J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(4): 259-262.
- [29] Lv Y F, Xia J, Lin J Q, et al. Diode-pumped CW frequency-doubled Nd: CNGG-BiBO blue laser at 468 nm [J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(2): 103-106.
- [30] Zheng Q, Yao Y, Li B, et al. 13.2 W laser-diode-pumped Nd: YVO₄/LBO blue laser at 457 nm[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(6): 1238-1242.
- [31] Gao J, Yu X, Li X D, et al. 456-nm deep-blue laser generation by intracavity frequency doubling of Nd: GdVO₄ under 879-nm diode pumping[J]. Laser Physics, 2009, 19(1): 111-114.
- [32] Gao J, Yan R P, Yu X, et al. High-power, high-repetition-rate actively Q-switched 916 nm laser and the frequency doubled pulsed 458 nm blue laser[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 58: 161-165.
- [33] Yan R P, Zhao C, Li X D, et al. Quasi-three-level Nd: GdY₂NbO₄ 927 nm laser under 879 nm laser diode pumping [J]. Laser Physics, 2018, 28(8): 085803.
- [34] Yan R P, Zhou Y P, Li X D, et al. $4\text{F}_3/2 \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ and $4\text{F}_3/2 \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ laser operations with a Nd: GdTaO₄ crystal [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 131: 106444.

- [35] Strohmaier S G P, Eichler H J, Bisson J F, et al. Ceramic Nd: YAG laser at 946 nm[J]. Laser Physics Letters, 2005, 2(8): 383-386.
- [36] Zhang C, Zhang X Y, Wang Q P, et al. Diode-pumped Q-switched 946 nm Nd: YAG ceramic laser[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(7): 521-525.
- [37] Zhu H Y, Xu C W, Zhang J, et al. Highly efficient continuous-wave Nd: YAG ceramic lasers at 946 nm[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(7): 075802.
- [38] Chen D Y, Pan H, Yan R P, et al. LD pumped passively Q-switched ceramic Nd: YAG 946 nm laser with a high peak power output[J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(2): 81.
- [39] Sattayaporn S, Aka G, Loiseau P, et al. Optical spectroscopic properties, 0.946 and 1.074 μm laser performances of Nd³⁺-doped Y₂O₃ transparent ceramics [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 711: 446-454.
- [40] Alcock I P, Ferguson A I, Hanna D C, et al. Continuous-wave oscillation of a monomode neodymium-doped fibre laser at 0.9 μm on the ⁴F_{3/2} → ⁴I_{9/2} transition [J]. Optics Communications, 1986, 58(6): 405-408.
- [41] Alcock I P, Ferguson A I, Hanna D C, et al. Tunable, continuous-wave neodymium-doped monomode-fiber laser operating at 0.900—0.945 and 1.070—1.135 μm [J]. Optics Letters, 1986, 11(11): 709-711.
- [42] Soh D B S, Yoo S, Nilsson J, et al. Neodymium-doped cladding-pumped aluminosilicate fiber laser tunable in the 0.9 μm wavelength range[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(9): 1275-1282.
- [43] Yoo S, Soh D B S, Kim J, et al. Analysis of W-type waveguide for Nd-doped fiber laser operating near 940 nm [J]. Optics Communications, 2005, 247(1/2/3): 153-162.
- [44] Kim J, Dupriez P, Soh D B S, et al. Core area scaling of Nd: Al-doped silica depressed clad hollow optical fiber and Q-switched laser operation at 0.9 μm [J]. Optics Letters, 2006, 31(19): 2833-2835.
- [45] Bartolacci C, Laroche M, Robin T, et al. Effects of ions clustering in Nd³⁺/Al³⁺-codoped double-clad fiber laser operating near 930 nm[J]. Applied Physics B, 2010, 98(2/3): 317-322.
- [46] Bartolacci C, Laroche M, Gilles H, et al. Generation of picosecond blue light pulses at 464 nm by frequency doubling an Nd-doped fiber based Master Oscillator Power Amplifier[J]. Optics Express, 2010, 18(5): 5100-5105.
- [47] Laroche M, Cadier B, Gilles H, et al. 20 W continuous-wave cladding-pumped Nd-doped fiber laser at 910 nm [J]. Optics Letters, 2013, 38(16): 3065-3067.
- [48] Leconte B, Gilles H, Robin T, et al. 7.5 W blue light generation at 452 nm by internal frequency doubling of a continuous-wave Nd-doped fiber laser[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10000-10006.
- [49] Corre K L, Robin T, Barnini A, et al. Linearly-polarized pulsed Nd-doped fiber MOPA at 905 nm and frequency conversion to deep-UV at 226 nm[J]. Optics Express, 2021, 29(3): 4240-4248.
- [50] Pax P H, Khitrov V V, Drachenberg D R, et al. Scalable waveguide design for three-level operation in Neodymium doped fiber laser[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 28633-28647.
- [51] Wang A, George A K, Knight J C. Three-level neodymium fiber laser incorporating photonic bandgap fiber[J]. Optics Letters, 2006, 31(10): 1388-1390.
- [52] Qian K, Wang H J, Laroche M, et al. Mode-locked Nd-doped fiber laser at 930 nm[J]. Optics Letters, 2014, 39(2): 267-270.
- [53] Chen B Y, Jiang T X, Zong W J, et al. 910 nm femtosecond Nd-doped fiber laser for *in vivo* two-photon microscopic imaging[J]. Optics Express, 2016, 24(15): 16544-16549.
- [54] Chen B Y, Rong H, Huang X S, et al. Robust hollow-fiber-pigtailed 930 nm femtosecond Nd: fiber laser for volumetric two-photon imaging[J]. Optics Express, 2017, 25(19): 22704-22709.
- [55] Wang S Y, Li Y J, Chen Y C, et al. Femtosecond all-polarization-maintaining Nd fiber laser at 920 nm mode locked by a biased NALM[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 38199-38205.
- [56] Wang Y F, Zhang Y M, Cao J K, et al. 915 nm all-fiber laser based on novel Nd-doped high alumina and yttria glass @ silica glass hybrid fiber for the pure blue fiber laser[J]. Optics Letters, 2019, 44(9): 2153-2156.
- [57] Wang Y F, Li X Y, Wu J M, et al. Three-level all-fiber laser at 915 nm based on polarization-maintaining Nd³⁺-doped silica fiber[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(1): 011401.
- [58] Fu S J, Zhu X S, Zong J, et al. Single-frequency Nd³⁺-doped phosphate fiber laser at 915 nm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(6): 1808-1813.
- [59] Dragic P D, Papen G C. Efficient amplification using the ⁴F_{3/2} → ⁴I_{9/2} transition in Nd-doped silica fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(12): 1593-1595.
- [60] Wang Y F, Chen W W, Cao J K, et al. Boosting the branching ratio at 900 nm in Nd³⁺ doped germanophosphate glasses by crystal field strength and structural engineering for efficient blue fiber lasers[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(38): 11824-11833.
- [61] Wang S, Lou F, Yu C, et al. Influence of Al³⁺ and P⁵⁺ ion contents on the valence state of Yb³⁺ ions and the dispersion effect of Al³⁺ and P⁵⁺ ions on Yb³⁺ ions in silica glass[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2014, 2(22): 4406-4414.
- [62] Xu W B, Wang M, Zhang L, et al. Effect of P⁵⁺/Al³⁺ molar ratio on structure and spectroscopic properties of Nd³⁺/Al³⁺/P⁵⁺ co-doped silica glass[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2016, 432: 285-291.
- [63] Wang S K, Xu W B, Wang F, et al. Yb³⁺-doped silica glass rod with high optical quality and low optical attenuation prepared by modified Sol-gel technology for large mode area fiber[J]. Optical Materials Express, 2017, 7(6): 2012-2022.
- [64] Jiao Y, Guo M T, Wang R L, et al. Influence of Al/Er ratio on the optical properties and structures of Er³⁺/Al³⁺

- co-doped silica glasses[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 129(5): 053104.
- [65] Wang F, Wang M, Shao C Y, et al. Highly fluorine and ytterbium doped polarization maintaining large mode area photonic crystal fiber via the Sol-gel process[J]. Optics Express, 2021, 29(25): 41882-41893.
- [66] 王世凯, 于春雷, 胡丽丽. 一种提高 900 nm 荧光强度的 Nd³⁺ 掺杂石英玻璃及其制备方法: CN113024111A [P].2021-06-25.
- Wang S K, Yu C L, Hu L L. Nd-doped quartz glass with improved 900 nm fluorescence intensity and preparation method: CN113024111A[P].2021-06-25.