

分类号

编号

烟 台 大 学

毕 业 论 文

基于钕离子掺杂的钒酸盐混晶 激光器特性研究

Reserch of Neodymium Doped Mixed Vanadata Crystal Laser

申请学位：理学学士

院 系：物理与电子信息学院

专 业：应用物理学

姓 名：王北辰

学 号：201857501325

指导老师：兰瑞君（副教授）

2022 年 6 月 3 日

烟台大学

基于钹离子掺杂的钒酸盐混晶 激光器特性研究

姓 名： 王北辰

导 师： 兰瑞君

2022 年 6 月 3 日

烟台大学

烟台大学学位论文原创性声明和使用授权说明

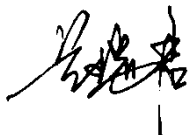
原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师的指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名：王北辰 日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

本人完全了解烟台大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版；学校可以采用影印、缩印、扫描等复制手段保存、汇编论文。（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名：王北辰 导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

激光二极管抽运的固体激光器凭借输出谱线窄、光束质量好、输出功率高、性能稳定、低成本等优势，成为近几十年激光器研究的主流。在固体激光器中运用被动调 Q 技术，可以实现低成本的中小型激光器短脉冲输出。其在军事、医学、测绘、成像领域都有着极大的需求和广阔的前景。

掺钕钒酸盐晶体是常用的新型中小功率激光器介质，有着宽的光谱宽度和大的跃迁截面。当钒酸盐基质材料中离子种类增加，因半径差异会导致晶格缺陷。钒酸盐混晶中掺杂的 Nd^{3+} 离子因此具有更宽的光谱宽度和较长的上能级寿命，因此掺钕钒酸盐混晶作为一种新兴固体激光介质有很高的研究价值，并适合在调 Q 激光领域进行研究。

本论文采用光纤耦合的激光二极管作为泵浦源，首次实现了 $\text{Nd}:\text{LuYLaVO}_4$ 激光器的连续 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光输出。 Nd^{3+} 掺杂量 1.0 at. %，采用透过率 50 % 的输出镜，在 8.07 W 泵浦功率下输出功率达到 0.768 W，斜效率和光-光转换率分别为 12.2 % 和 9.52 %。

在连续激光实验装置的基础上，首次采用无掺杂 GaAs 作为饱和吸收体，对 $\text{Nd}:\text{LuYLaVO}_4$ 激光器进行了调 Q 操作并实现了纳秒量级短脉冲输出。在泵浦功率 8.07 W 下得到了最短脉冲宽度为 2.75 ns，平均输出功率为 0.421 W，对应的最大单脉冲能量为 22.4 μJ ，峰值功率为 8.15 kW。其光-光转换效率为 5.21 %，斜效率为 7.86 %。

关键词：钒酸盐混晶，被动调 Q，全固态激光器，短脉冲

ABSTRACT

Laser diode pumped solid-state lasers have become the mainstream of laser research in recent decades due to their narrow output spectrum, good beam quality, high output power, stable performance and low cost. The use of passive Q-switching in solid-state lasers allows for low-cost short pulse output for small and medium-sized lasers. It has a great demand and a broad future in military, medical, mapping and imaging fields.

Neodymium-doped vanadate crystals are commonly used as a new medium for small to medium power lasers, with wide spectral widths and large transition cross sections. When the ion species in the vanadate matrix material increases, lattice defects can result due to radius differences. The Nd^{3+} doped in mixed vanadate therefore have a wider spectral width and longer upper level lifetime, making Nd-doped mixed vanadate valuable as an emerging solid-state laser medium and suitable for research in the field of Q-switched lasers.

In this thesis, the first continuous $1.06\text{ }\mu\text{m}$ laser output from a $\text{Nd}:\text{LuYLaVO}_4$ laser was achieved using a fibre-coupled laser diode as the pump power. The doping amount 1.0 at.% and the output power of 0.768 W at 8.07 W pump power were achieved using an output mirror with a transmittance of 50 %, with a slope efficiency and optical-to-optical conversion efficiency of 12.2 % and 9.52 %, respectively.

The PQS $\text{Nd}:\text{LuYLaVO}_4$ laser using undoped GaAs as the saturable absorber was demonstrated for the first time to the best of my knowledge, achieving short pulse output in the nanosecond range. The shortest pulse width of 2.75 ns was obtained with an average output power of 0.421 W at a pump power of 8.07 W, corresponding to the maximum single pulse energy of 22.4 μJ and peak power of 8.15 kW. The corresponding optical-to-optical conversion efficiency was 5.21 % and the slope efficiency was 7.86 %.

Key words: Mixed vanadate crystal, Passive Q-switch, All-solid-state laser, Short pulse

目录

1	引言	1
1.1	全固态激光器	1
1.2	固体增益介质	3
1.2.1	Nd:YVO ₄ 晶体	4
1.2.2	Nd:GdVO ₄ 晶体	4
1.2.3	Nd:LuVO ₄ 晶体	5
1.3	掺钕钒酸盐混晶	5
1.4	调 Q 技术	6
1.5	本文研究内容	8
2	连续输出钒酸盐混晶激光器	9
2.1	固体激光器连续输出理论分析	9
2.1.1	Nd ³⁺ 离子四能级结构	9
2.1.2	Nd ³⁺ 离子谱线加宽	9
2.1.3	多模振荡速率方程	10
2.2	Nd:LuYLaVO ₄ 激光器连续输出实验	12
2.2.1	实验设计	12
2.2.2	Nd:LuYLaVO ₄ 激光器连续输出特性	14

2.3	本章小结	15
3	钒酸盐激光器被动调 Q 实验研究	16
3.1	被动调 Q 实现的原理	16
3.2	GaAs 被动调 Q 理论	16
3.3	Nd:LuYLaVO ₄ 被动调 Q 实验研究	17
3.4	本章小结	21
4	结论与展望	22
4.1	主要结论	22
4.2	有待进一步研究的内容	22
	参考文献	24
	附录 A. 主要符号表	29

1 引言

1.1 全固态激光器

固体激光器（Solid-State Laser）的工作物质是以晶体、玻璃、陶瓷为主的固体材料。在激光器的整个历史进程中，固体激光器始终在高速发展。自从 1960 年 T.H.Maiman^[1]成功研制红宝石（ $\text{Cr}:\text{Al}_2\text{O}_3$ ）固体激光器，学者们相继开发出数百种固体激光器，数千条激光谱线接踵被实现。固体激光器不仅在输出特性上表现出输出能量大，峰值功率高的优势，而且结构紧凑，具有成熟的集成技术，易于于光纤耦合，具有较高的可靠性和较长的寿命。在通信技术、工业生产、生物激光技术、国防武器等方面，作为激光器研究和研发的主流。

固体激光器在发展的早期用惰性气体闪光灯作为泵浦源，热效应严重，能量转换效率低且难以实现高功率输出。激光二极管抽运的固体激光器（Diode-Pumped Solid-State Laser, DPSSL）的出现改变了这一局面，使用激光二极管（Laser Diode, LD）代替闪光灯提供与增益介质吸收峰波长相吻合的泵浦激光来抽运增益介质所需的能量，能够有效缩减热效应并提高转换率。

LD 泵浦与传统闪光灯泵浦相比：（1）效率高。可通过改变增益介质的基质成分和结构或工作温度使得 LD 的激光输出谱线与固体工作物质吸收峰精准吻合，从而减少非必要频率光产生的热效应，LD 的工业转换效率可达 30%以上，远高于闪光灯泵浦激光器的 1%。这两点优势使得 DPSSL 的总体效率可比灯泵激光器提高一个数量级。（2）具有较好的稳定性。工作时 DPSSL 的光-光转换率较高，所以激光介质温度比较稳定。又由于 DPSSL 可集成化程度较高，能有效消除振动冲击。（3）结构紧凑、体积小、重量轻（4）寿命较长，灯泵寿命大约为 1000 个小时，而 LD 可达几万小时。（5）有利于新型激光材料的应用。如 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 、 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 、 $\text{Tm}:\text{YAG}$ 等只能在 LD 泵浦下才能具备优势。（6）新型固体激光器的研制工作得到推进。得益于 DPSSL 的发展，产生了大量具有新型腔结构激光器，如微片激光器。端面泵浦系统、光纤激光器等也相继发展起来。^[2-5]

相比于半导体激光器（二极管激光器），DPSSL 的优势有如下几点：（1）DPSSL 相较于 LD，能得到更小半高宽的输出谱线。（2）光束质量好。LD 产生的光束准直能力差，发散角过大，通常在 $10^\circ \sim 50^\circ$ 范围内；而 DPSSL 一般能在 TEM_{00} 模起振，其质量因子 M^2 在衍射极限 1 附近，光束质量佳。（3）输出功率高。DPSSL 的 CW 输出功率可达 kW 量级；通过调 Q 和锁模技术，DPSSL 峰值功率可达上百 kW 甚至 GW 量级。（4）大范围的输出波长是可行的。DPSSL 可以在波长范围内完成中红外（5000 nm）到可见光波段到紫外（270 nm）的激光输出^[6]。

LD 的发展推动着 DPSSL 的发展。1962 年，第一台 GaAs 半导体激光器开始运行。1963 年，R.Newman^[7]用 GaAs 半导体激光器在 808 nm 附近对 Nd:CaWO₄ 晶体进行抽运，得出了 1.06 μm 的荧光，并以此来预测 LD 将在未来是固体激光器不可或缺的一部分。1964 年，MIT Lincoln Lab 的 Keyes 和 Quist^[8]首次从实验室环境实现 DPSSL 并产生准 CW 激光输出。1968 年，McDonaldDouglas 宇航公司的 Ross 等人^[9]制造了第一台 LD 泵浦的 Nd:YAG 激光器，但要使 LD 的泵浦光波长与激光介质吸收峰重合需要激光器在 170 K 环境下工作。虽然学者们已经认识到激光二极管对固体激光器发展的重要性。但前期的 LD 有单色性差、光束质量差、功率不高、室温下难以正常使用以及造价高等致命缺陷，因此，DPSSL 的研究在初期的发展中，并未形成里程碑式的发展。直至 20 世纪 80 年代后期，利用新的半导体生长技术，LD 的阈值电流降低；CW 的功率得到了显著的提升；用作泵浦的波长范围持续扩大；显著延长了工作寿命；明显地降低了实验成本和商业化价格，一个个的突破不停地推动着 LD 的发展。进入 20 世纪 90 年代后，LD 的功率突破和光纤耦合技术发展使 DPSSL 成为当下固体激光器最常见的架构^[10-14]，并实现了商品化。

DPSSL 的泵浦方式有侧面（横式）和端面（纵式）两种。侧泵浦能够有效减少激光工作物质中的热效应，提升激光效率，但是基膜损耗较大，且主要多横模震荡。端面泵浦能够有效产生基横模振荡，但是这导致了激光晶体非常大的热效应，无法忽视热透镜效应的影响。光纤耦合技术的发展和运用使得光纤耦合输出半导体系统（Fiber-coupled Diode-laser-array）诞生，在端面抽运激光器上实现高功率、高效益的发展^[6]。

1.2 固体增益介质

固体增益介质是在晶体基质中掺杂激活离子（如 Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Cr^{3+} 等）而成的。增益介质中激活离子的能级结构决定起振激光的特征波长，而基质材料为特征波长提供起振和谱线加宽所需的晶体场。不同激活离子在不同晶体场中，能够表现出独特的能级结构，实现输出激光不同的波长和能量，即光谱特性。

四方(锆英石(ZrSiO_4)型)正钒酸盐晶体 REVO_4 （其中 $\text{RE}=\text{Gd}^{3+}$ ， Y^{3+} ， Lu^{3+} 等）是用于掺杂稀土激活离子的非常合适的基质，可以用直拉法（Czochralski）生长^[15]。最初在 20 世纪 60 年代被发现，在 90 年代逐步得到广泛得应用。这种基质是单轴晶体的(光轴平行于晶体 c 轴)，提供线偏振激光输出^[16,17]，使掺杂离子具有较高的跃迁截面^[18]和良好的热机械和热光学性能（高导热，低热膨胀，正 dn/dT 系数和弱热透镜效应）^[19,20]。单轴钒酸盐晶体具有自然的双折射作用，各向异性明显，能减小因光能转换率低而产生的偏振损耗，在 π 偏振方向能得到最佳光子跃迁，激光表现为偏振光输出（Polarization Light）。

由于稀土离子 Nd^{3+} 的半径与基质离子相近，因此在对晶格结构没有很大影响的前提下， Y^{3+} 、 Gd^{3+} 、 Lu^{3+} 可以被此离子取代，形成常见的三种钒酸盐激光介质，并保持比较大的热导率。 Nd^{3+} 的能级如图 1 所示，800 nm 附近有很强的吸收峰，适合 LD 直接抽运，有工业化推广潜力。输出波长有 0.9 μm 、1.06 μm 、1.3 μm 三个波段。其中 1.06 μm 波段没有重吸收，能够较易地产生激光输出，本文选用此波段进行实验。

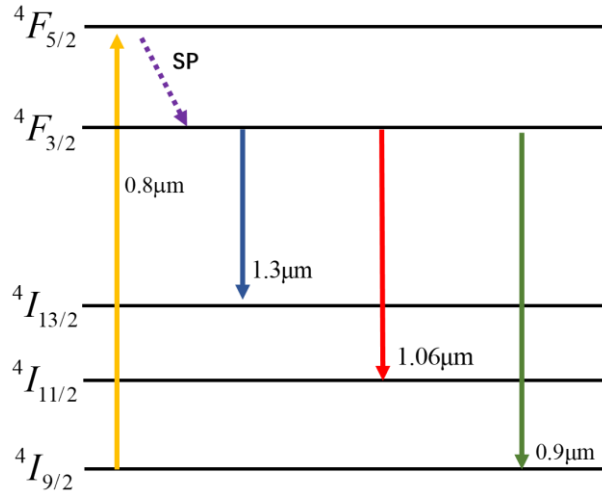


图 1 Nd^{3+} 离子能级图

下面介绍几种常见的掺 Nd^{3+} 钒酸盐晶体;

1.2.1 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体

$\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 适用于中低功率激光器。由于其在 808 nm 泵浦波长下的高吸收系数、偏振光发射和高增益, 已被证明是线偏振输出光束的微芯片绿光激光器的最佳选择^[21,22]。

$\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体是强双折射的, 且具有大的吸收截面 ($57 \times 10^{-20} \text{ cm}^2 @ 808\text{ nm}$ (π 偏振方向)^[23]) 和大的发射截面 ($135 \times 10^{-20} \text{ cm}^2 @ 1064\text{ nm}$ (π 偏振方向)^[23])。

1.2.2 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体

$\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 不仅在 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 的波长范围内, 而且在倍频绿色和红色激光波长中都具有优异的激光性能。 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体最早于 1992 年通过提拉法由俄罗斯的 Zagumennyi 等人^[24]生长制备并成功实现了 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的基频输出。 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体荧光寿命为 $100\text{ }\mu\text{s}$ ($\text{Nd}: 1.56\text{ at.}\%$), ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 的受激发射截面为 $7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 的受激发射截面为 $1.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ^[25]。

1.2.3 Nd:LuVO₄ 晶体

Nd:LuVO₄ 晶体相对于 Nd:YVO₄ 晶体谱线更宽, Nd³⁺ 离子在高能级分布更少, 有益于实现集居数反转^[26]。2002 年, C.Maunier 等人^[27]实现了 Nd:LuVO₄ 晶体的生长, 并对其光学和激光特性进行了研究。其荧光寿命为 82 μs, ⁴F_{3/2} → ⁴I_{11/2} 的受激发射截面为 14.6×10⁻¹⁹ cm², ⁴F_{3/2} → ⁴I_{13/2} 的受激发射截面为 4.3×10⁻¹⁹ cm²。

1.3 掺钕钒酸盐混晶

掺钕钒酸盐单晶是调 Q 激光器的优质材料。然而传统的钒酸盐激光介质(如 Nd:YVO₄、Nd:GdVO₄)有着大的受激发射截面, 调 Q 实验中高的峰值功率和大的重复频率经常难以兼得。

理论上, 基质中引入无序结构可以使激活离子的光谱非均匀展宽。典型的非均匀展宽光谱材料有 Nd:glass, 但由于玻璃的结构无序且可直接制备成各种形状的高掺杂浓度激光玻璃, 得到了较好的脉冲序列和稳定的输出功率, 但由于其热导率较低(在 1 Wm⁻¹K⁻¹ 附近), 使输出功率仅为 40 mW^[28]。

近年来, 人们把优质无序结构基质的实现希望放在了钒酸盐晶体上, 钒酸盐混晶应运而生。1996 年, V.Ostroumov^[29]首次实现了钒酸盐混晶 Nd:LaGdVO₄ 并证实了混晶光谱宽度较单晶更大的假设。与有序钒酸盐晶体 Nd:REVO₄ 相比, Nd:LuYVO₄、Nd:YGdVO₄ 和 Nd:YGdVO₄ 等混合晶体具有拓宽激活离子 Nd³⁺ 的光谱宽度和延长荧光寿命的优点, 这对于提高被动调 Q 激光器的脉冲能量输出具有重要意义。钒酸盐混晶激光器的被动调 Q 操作近年来得到了广泛报道^[30,31]。实验证明, 光谱展宽和储能能力的增大是由基体材料^[32]中离子半径的差异决定的。

受到这个想法的启发,可以在钽酸盐混合晶体中混合稀土离子 La^{3+} ,由于 La^{3+} 离子的半径较大,可以期望获取更大的储能容量的理想激光介质。2017年,烟台大学的Lan Ruijun等人^[33]首次实现了 MoTe_2 作为饱和吸收体的 $\text{Yb}:\text{LuYLaVO}_4$ 固体激光器脉冲输出,得到了5.6 W 峰值功率的脉冲输出,后续又报道了 $\text{Yb}:\text{LuYLaVO}_4/\text{ReS}_2$ 调Q激光器^[34]实现11.9 W 峰值功率脉冲输出。最近,具有 Lu^{3+} , Y^{3+} , La^{3+} 三种阳离子的钽酸盐晶体 $\text{Nd}:\text{LuYLaVO}_4$ 被成功生长出来,它具有优良的光学品质和良好的功率缩放能力。在本文中,使用钽酸盐混晶 $\text{Nd}:\text{LuYLaVO}_4$ 作为激光介质进行激光器特性研究和被动调Q实验,有望获得高功率窄脉宽的调Q脉冲。

1.4 调Q技术

为了得到窄脉冲、高峰值功率的激光输出,从而应用在如激光雷达技术、高速摄影技术、高分辨率光谱学研究、激光精密测距等方面,学者们研究和发展了调Q技术^[35]。

调Q的概念最早于1961年被提出^[36],原理是按照可控制的模式周期性变化谐振腔的损耗因子,形成脉冲图像呈周期性的强激光输出:使谐振腔最初Q值很低(损耗大),因此阈值高,无法形成震荡从而产生激光;在适当时候使Q值剧增(损耗小),因此,阈值低,阈值反转粒子的数量远小于此时剧增的反转集居数,受激辐射增强而形成振荡,输出脉冲呈周期性的强激光^[35]。

最初调Q激光器的输出峰值功率为600 W,脉冲宽度在100 ns量级,于1962年被F.J.McClung等人^[37]采用电光调制得出。自此数十年间调Q技术迅速发展,声光调Q、可饱和吸收调Q等方法陆续出现,输出的功率得到了提升并且压缩了激光脉冲宽度。

主动调Q中,由人为操控的外部驱动源来控制谐振腔损耗的变化,从而使Q值发生相应周期性的变化。因此,Q开关开启的周期时间是可以人工操作控制的。声光、电光和转镜处于主动调Q激光器的范畴^[35]。

被动调 Q 是谐振腔内通过自动的调 Q 过程,在谐振腔内加入一个特殊的光学材料,即可饱和吸收体材料(Saturable Absorber, SA)。SA 的透过率曲线和入射光强呈正相关关系,其斜率呈负相关关系,当入射光强度超过某一定范围时,透过率上升斜率趋近于零,SA 进入“饱和”,也称“漂白”。SA 刚被插入谐振腔时透过率很低,低透过率导致谐振腔有很大的损耗以至于激光无法振荡。反转集居数的积累使得自发辐射不断增加,光强增大,SA 逐渐被漂白,漂白发生时损耗剧减,激光起振,产生强大的巨脉冲激光输出。

被动调 Q 的优势有:(1)低成本易实现,仅需饱和吸收材料;(2)结构简单,仅在谐振腔内插入饱和吸收体即可完成调 Q 架构;(3)小型化和微型化趋势好;(4)中小功率激光器适配度高。被动调 Q 的劣势有:(1)脉冲重复频率无法直接控制;(2)稳定性不佳,时序扰动严重。

以下简述了几种被动调 Q 的 SA 材料。有机染料与色心晶体是调 Q 激光器发展早期的饱和吸收体,这两类 SA 稳定性差,寿命短易老化,效率低,现阶段研究和发展已经很少。

半导体材料 GaAs,作为一种代表性的半导体饱和吸收体,能够在多种光谱波段进行调 Q 操作。由于其热稳定性和大的光学非线性,已被广泛应用于 $1\mu\text{m}$ 波长的被动调 Q 和锁模 Nd^{3+} 或 Yb^{3+} 掺杂固体激光器。在 $1\mu\text{m}$ 波长范围内, $1.06\mu\text{m}$ 波长的光子能量远低于 1.42eV 的带隙,吸收的主要原因是 EL2 缺陷,它在带隙下方约 0.82eV 处形成深施主能级。此外,在强激光照射下, GaAs 的非线性吸收也以双光子吸收(TPA)为主^[38]。近年来,由于 GaAs 的热稳定性和较大的光学非线性,已经被广泛用于 Nd^{3+} 掺杂固态激光器的 Q 调制操作。本文选择无掺杂的 GaAs 作为饱和吸收体进行调 Q 实验。

近年来新型二维材料随着生产工艺的进步和量子力学的应用发展迅速,学者们研制出包括石墨烯(Graphene)、拓扑绝缘体(Topological insulator, TI)、过渡金属硫化物(Transition metal dichalcogenides, TMDs)、黑磷(Black phosphorus, BP)在内的多种具有优异力热光电效应的新型二维材料。这种材料往往具有较大的损耗,更适合运用于长增益光纤的光纤激光器中来弥补损耗。在固体激光器中应用相对较少^[39]。

1.5 本文研究内容

本论文主要针对掺钕钒酸盐混晶 Nd:LuYLaVO_4 作为激光介质的全固体激光器的连续、脉冲输出性能进行了研究。共分为四章，具体内容为：

第一章概述了全固体激光器的发展历史和性能，阐述了钒酸盐混晶作为激光介质的理论优势和研究现状。

第二章对固体激光器激光脉冲的产生及输入输出特性进行了简单的理论分析，并实现了高效的 Nd:LuYLaVO_4 全固体激光器的 $1.06\mu\text{m}$ 连续激光输出。

第三章在谐振腔中插入可饱和吸收体 GaAs 作为调 Q 材料，实现了 Nd:LuYLaVO_4 全固体激光器的被动调 Q 短脉冲激光输出。

第四章全文总结及进一步研究构想。

2 连续输出钕酸盐混晶激光器

2.1 固体激光器连续输出理论分析

2.1.1 Nd^{3+} 离子四能级结构

当 Nd^{3+} 离子在 $1.06\mu\text{m}$ 波段工作时，为四能级系统，如图 2 所示。

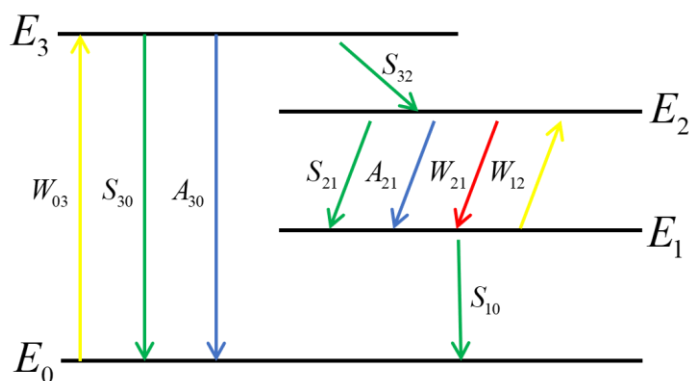


图 2 Nd^{3+} 四能级结构图

四个参与产生 $1.06\mu\text{m}$ 激光输出的能级分别是：基态能级 E_0 、抽运高能级 E_3 、激光上能级 E_2 （亚稳态能级）、激光下能级 E_1 。粒子主要通过受激吸收 W_{03} 从基态跃迁到高能级，再经过无辐射跃迁 S_{32} 积累在上能级，实现集居数反转。和三能级系统相比，由于 E_1 不再作为基态能级，处于 E_1 能级的粒子数经无辐射跃迁 S_{10} 转移到基态，因而热稳态下粒子数目较少，使得处于 E_1 和 E_2 上的粒子数之差较大，更容易实现集居数反转。

2.1.2 Nd^{3+} 离子谱线加宽

在没有谱线加宽的理想状态下， Nd^{3+} 工作物质中粒子从 E_0 能级跃迁到 E_3 所需的吸收固有频率严格等于 ν （波长在 800nm 附近某一特定值），而泵浦光提供的光子在频率为 ν' （对应波长在 808nm 附近）。 ν' 不精确等于 ν ，在这种情况下工作物质无法吸收泵浦光能

量实现振荡，因此谱线的加宽是很有必要的。通过加宽使受激吸收谱线的线型函数 $\tilde{g}(\nu, \nu_0)$ 由 δ 状变成了有一定宽度的峰状。泵浦光频率在谱线展宽后受激吸收线型函数的半宽之内能够获得较大的光-光转换率。

固体激光工作物质的谱线加宽主要有两种方式，对所有频率谱线贡献相同的均匀加宽和对不同频率表现出选择性的非均匀加宽。均匀加宽以热效应引起的晶格振动加宽为主，固体激光物质可以视为一个个晶格排列而成，晶格振动随热效应增强而剧烈，晶格场随时间波动更快，将谱线加宽。而非均匀加宽以晶格缺陷加宽占主导^[35]，晶格场因晶格缺陷而发生变化，激活离子之间存在固有电偶极矩，变化的晶格场使离子间电偶极矩发生变化，造成斯塔克能级分裂，实现谱线加宽。尽管人们对谱线加宽的研究已经非常深入，但理论方法计算固体中的谱线加宽线性函数依然很复杂，实验方法一直是采取的途径。

2.1.3 多模振荡速率方程

本实验中激光器有多个模式共同工作，假设每个模式损耗相同（衍射损耗忽略不计、工作物质损耗和反射镜损耗相同），并取 $\tilde{g}(\nu, \nu_0)$ 最高点高度和面积构成一矩形函数 $\tilde{g}'(\nu, \nu_0)$ ，使

$$\tilde{g}'(\nu, \nu_0) = \tilde{g}(\nu_0, \nu_0) \quad (1)$$

$$1 = \delta\nu \cdot \tilde{g}(\nu_0, \nu_0) \quad (2)$$

Nd^{3+} 离子四能级多模震荡的速率方程可表示为

$$\frac{dN}{dt} = \left(n_2 - \frac{f_2}{f_1} n_1 \right) \sigma_{21} \nu N - \frac{N}{\tau_R} \quad (3)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = n_0 W_{03} - n_3 \frac{S_{32}}{\eta_1} \quad (4)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = - \left(n_2 - \frac{f_2}{f_1} n_1 \right) \sigma_{21} \nu N - n_2 \frac{A_{21}}{\eta_2} + n_3 S_{32} \quad (5)$$

$$\frac{dn_0}{dt} = n_1 S_{10} - n_0 W_{03} \quad (6)$$

$$n_0 + n_1 + n_2 + n_3 = n \quad (7)$$

式中： $\eta_1 = S_{32} / S_{32} + A_{30}$ 为 E_3 到 E_2 无辐射跃迁量子效率、 $\eta_2 = A_{21} / A_{21} + S_{21}$ 为 E_2 到 E_1 跃迁的荧光效率、 $\eta_F = \eta_1 \eta_2$ 为总量子效率^[35]，其他符号详见附录。

激光介质经泵浦光抽运受激辐射产生的激光最初光强很弱，在谐振腔内自激振荡形成大功率稳定的激光输出。使自激振荡发生需要满足激光在谐振腔内的增益 $g(I)$ 大于损耗 α 。

$$dI(z) = [g(I) - \alpha]I(z)dz \quad (8)$$

当增益大于损耗时，激光光强的变化量 $dI(z)$ 为正，光强增加。增加的过程中损耗基本不变，可以分为三个阶段，（1）小信号阶段，增益基本不变，光强随距离呈指数增加。（2）大信号阶段，在光强增加的过程中增益逐渐降低，光强依然快速增长。（3）饱和阶段，由于增益饱和，增益下降到等于损耗， $dI(z)$ 等于零，光强达到稳态。

本文借鉴对比了前人对于 LD 端面泵浦固态激光器连续输出的研究成果^[6,40]

$$P_{out} = \frac{\pi S_0 \omega_c^2}{4} \left\{ \frac{4\sigma\tau\lambda_p P_p (1 - e^{-\alpha_p d})}{\pi\hbar c (\omega_p^2 + \omega_c^2) (2\alpha_c d + T + \delta)} - 1 \right\} T \quad (9)$$

$$P_{th} = \frac{\pi\hbar c (\omega_p^2 + \omega_c^2) (2\alpha_c d + T + \delta)}{4\sigma\tau\lambda_p (1 - e^{-\alpha_p d})} \quad (10)$$

$$\eta = P_{out} / (P_{p0} - P_{th}) = \frac{\omega_c^2 \lambda_p T (1 - e^{-\alpha_p d})}{\lambda_c (\omega_c^2 + \omega_p^2) (2\alpha_c d + T + \delta)} \quad (11)$$

以上分别是激光器输出功率 P_{out} ，阈值泵浦功率 P_{th} 和斜效率 η 。 $S_0 = hc / \lambda_c \sigma \tau$ 为饱和光功率密度。公式中其他符号详见附录。

P_{out} 对 d 求二阶导， $\frac{\partial^2 P_{out}}{\partial d^2} < 0$ ，由高等数学的知识可以知道当 d 取某一值时， P_{out} 有极大值，这说明可以通过控制激光晶体的长度来使激光器达到最大的输出功率。 P_{th} 和 η 对 d 求一阶导数，发现导数曲线分别呈凹、凸形状，这说明用最佳长度来确定激光晶体时，能够有望得到最低的阈值功率和最大的斜效率。

同样的分析方法运用到泵浦阈值功率和受激发射截面、荧光寿命、吸收系数等其他系数上，可以得出结论： P_{th} 对于 σ 、 τ 、 α_p 的导数小于零，因此呈反比。

2.2 Nd:LuYLaVO₄ 激光器连续输出实验

钒酸盐混晶是通过取代有序晶体中的一部分离子发展起来的，由于离子的随机分布而引起的晶体场变化将导致荧光线的不均匀展宽，从而导致较小的受激发射截面和较长的上能级寿命。钒酸盐混晶中阳离子的半径相差较大时可以进一步提高晶体的储能能力^[32,34]。

在这个想法的启发下，本文选用 Nd:LuYLaVO₄ 晶体，利用了 Lu^{3+} ， Y^{3+} 和 La^{3+} 离子之间的半径巨大差异，有望获得高脉冲激光输出。

2.2.1 实验设计

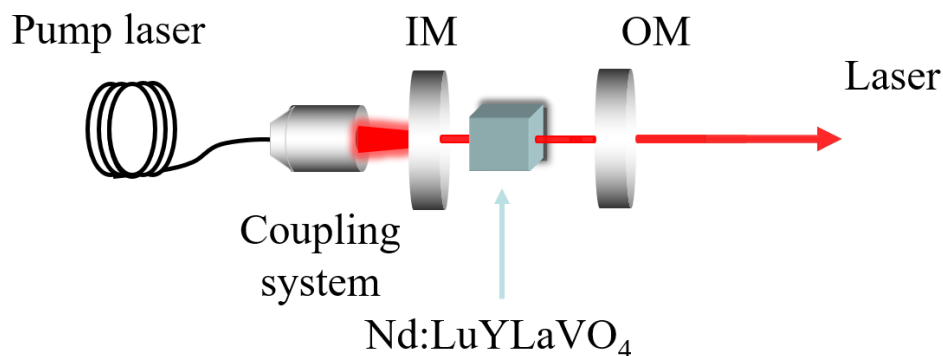


图 3 LD 泵浦的 Nd:LuYLaVO₄ 连续激光实验装置

连续激光实验装置如图所示，泵浦光源为中心波长 808 nm 的光纤耦合的大功率半导体激光器（TLTP-YTH02100-2，Telent Corp.）。腔体采用紧凑的平-凹腔结构，由于激光晶体在工作中由受热不均产生热透镜效应，相当于增大了凹面镜曲率，更有利于形成激光振荡。输入腔镜（IM）对着泵浦光的一面镀有对 1064 nm 的高反膜（HR）和对 808 nm 的增透膜（AR）。输出腔镜（OM）是曲率半径 $R=50\text{ mm}$ 的凹面镜，在 1064 nm 处的部分透过率为 50%。钕酸盐混晶的 Nd^{3+} 掺杂量为 1.0 at.%，尺寸为 $3.5 \times 3.5 \times 4\text{ mm}^3$ ，输入面和输出面都被抛光到激光质量，并且镀有对 1064 nm 的增透膜（AR）。为了消除激光晶体在实验中产生的热量影响，激光晶体整体用铝箔包裹并安装在水冷铜块中，冷却水保持在 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行循环。

2.2.2 Nd:LuYLaVO₄ 激光器连续输出特性

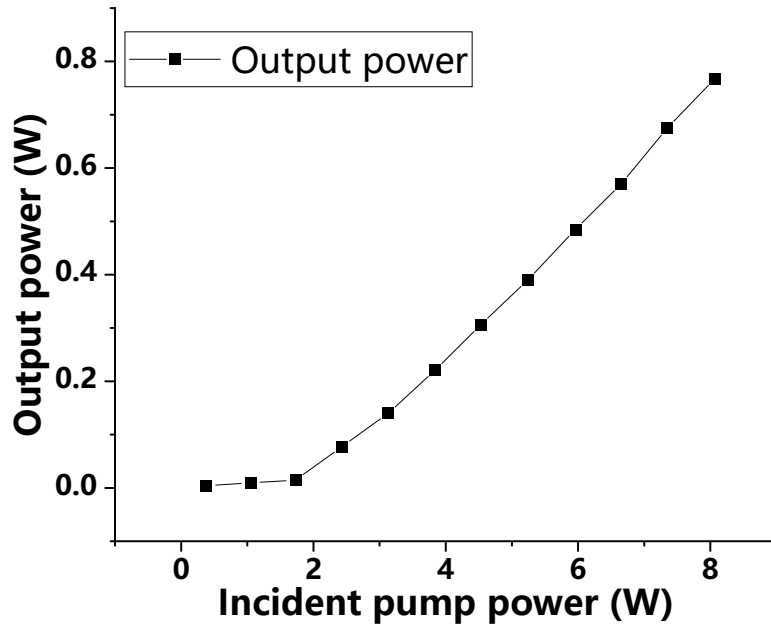


图 4 输出功率随入射泵浦功率的变化图像

图 4 给出了激光器输出功率和泵浦功率的关系。连续激光输出的阈值泵浦功率为 0.38 W。将抽运功率缓慢上升，输出功率对泵浦光功率呈正相关关系，在 8.07 W 的吸收泵浦功率下得到了 0.768 W 的最大连续输出功率，对应的光-光转换效率为 9.52 %。斜率效率为 12.2 %。通过图像可以看出输出功率曲线并未随着泵浦功率的增加而出现饱和，说明继续增加泵浦功率有望得到更大功率的激光输出。

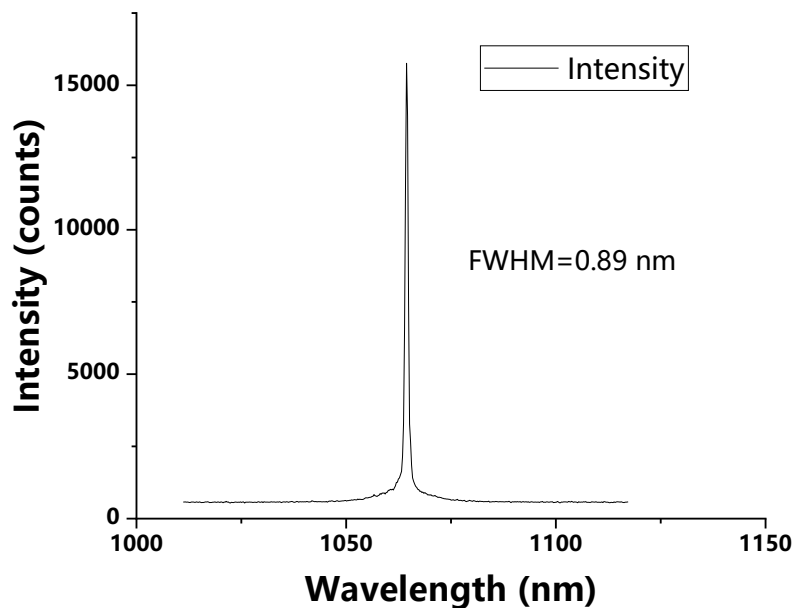


图 5 光谱仪测得激光连续输出谱线图

利用光谱仪(Ocean)测量了 Nd:LuYLaVO₄ 激光器的连续激光模式下的脉冲输出谱线, 如图 5 所示。测得中心波长为 1064.4 nm, 谱线半高宽为 0.89 nm。

2.3 本章小结

本章首先对 LD 泵浦的钕掺杂钒酸盐混晶 Nd:LuYLaVO₄ 固体激光器从能级结构、谱线加宽、速率方程、增益与输出功率方面进行了简单的理论分析, 并讨论了不同激光系数对输出功率的影响。

继而进行了连续激光实验, 采用平-凹腔结构, 在 50 %透过率输出镜, 8.07 W 泵浦光抽运下得到了功率为 0.768 W 的 1064.4 nm 激光输出。谱线半高宽为 0.89 nm, 斜效率为 12.2 %, 光-光转换率为 9.52 %。

3 钒酸盐激光器被动调 Q 实验研究

3.1 被动调 Q 实现的原理

为了得到高的峰值功率和窄的单脉冲，将具有饱和吸收特性的材料放置在谐振腔内，可以利用该饱和吸收特性来控制谐振腔的损耗。饱和吸收体中心频率处的吸收系数为

$$\beta = \frac{\beta^0}{1 + I/I_s} \quad (12)$$

公式 12 中， β^0 为中心频率处小信号吸收系数、 I 为进入饱和吸收体的光强、 I_s 为中心频率处饱和光强。

饱和吸收体的吸收系数变化使腔内损耗呈周期性变化，根据激光起振理论，可以形象得将损耗变化看作开关门，损耗大时门处于关闭状态，激光不能起振，反转离子数积累，当损耗小时门被打开，激光起振，产生比连续输出激光更强更窄地脉冲激光。

3.2 GaAs 被动调 Q 理论

在 $1\ \mu\text{m}$ 波长范围内， $1.06\ \mu\text{m}$ 波长的光子的能量远远低于 $1.42\ \text{eV}$ 的 GaAs 禁带宽度，并可以推断可饱和吸收主要是由于非掺杂晶体缺陷产生的 EL2 能级^[41]。当激光光强不大时，光电离 EL2 能级导致的单光子吸收（SPA）在饱和吸收中占主导地位，如果两倍单光子能量大于通过 GaAs 的禁带所需的能量，双光子吸收（TPA）就有可能发生。对于 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长来说，单光子能量处于 $1.42\ \text{eV}$ 以下，而双光子能量大于 $1.42\ \text{eV}$ ，因此双光子吸收将会出现在 GaAs 的被动调 Q 操作中。TPA 的强度和腔内功率密度呈正相关，当功率密度高到一定程度，TPA 占主导地位。此时众多的电子和空穴在价带和导带中自由移动，他们也能吸收光子跃迁到更高的导带（能级）上，此即自由载流子吸收（FCA）。TPA 和 FCA 是高功率下调 Q 操作中的主要过程^[42,43]。

半导体可饱和吸收材料 GaAs 在早些年就已经在被动调 Q 钒酸盐固体激光器上实现广泛的应用。2004 年山东大学的 Pan Lei 等人^[44]在氙气灯泵下实现了 Nd:GdVO₄/GaAs 被动

调 Q 激光器，当泵浦能量为 9.45 J 时，得到了输出能量为 47.6 mJ 的 64 ns 脉冲。2009 年 J.An 等人^[45]将 GaAs 耦合到输出镜上实现了 Nd:LuVO₄ 晶体的被动调 Q，在 12.7 W 泵浦功率下得到了峰值功率为 1.91 kW 的 3.8 ns 激光输出。2013 年 Li Shixia 等人^[46]用 GaAs 对 Nd:YVO₄ 复合晶体进行被动调 Q 操作，在 5.31 W 泵浦下获得输出功率达 846 W 的 14.5 ns 脉冲。受益于固体激光技术研究的成熟，近几年钒酸盐混晶的研究进展迅速，不同的饱和吸收体被应用在钒酸盐混晶固体激光器的调 Q 实验上，并取得了良好的成果。本文将 GaAs 饱和吸收体用于 Nd:LuYLaVO₄ 混晶，有望获取高功率窄脉宽的调 Q 脉冲激光器。

3.3 Nd:LuYLaVO₄ 被动调 Q 实验研究

Nd:LuYLaVO₄ 混晶是晶体生长中按照特定比例把 Nd:LuVO₄、Nd:YVO₄ 和 Nd:LaVO₄ 三种钒酸盐晶体组合得到的新结构晶体。Lu³⁺、Y³⁺、La³⁺ 三种不同半径大小的离子之间互相取代使得掺杂离子 Nd³⁺ 周围的晶格场无规则变化，形成晶格缺陷非均匀加宽，导致 Nd³⁺ 离子的能级产生斯塔克分裂、吸收和发射谱线非均匀加宽。激光介质获得了更小的发射截面、更长的荧光寿命和更强的储能能力。

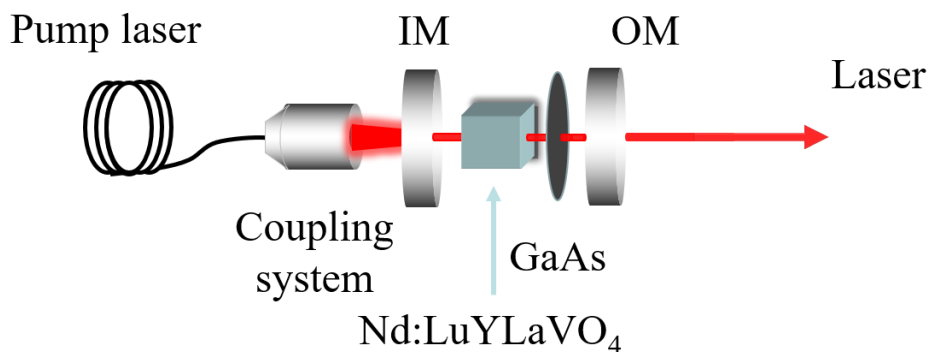


图 6 LD 泵浦的 Nd:LuYLaVO₄/GaAs 调 Q 激光器装置

本实验在连续激光操作的腔结构基础上，插入了 GaAs 饱和吸收体，用透明玻璃片固定，放置于激光介质和输出镜 OM 之间，如图 6 所示。

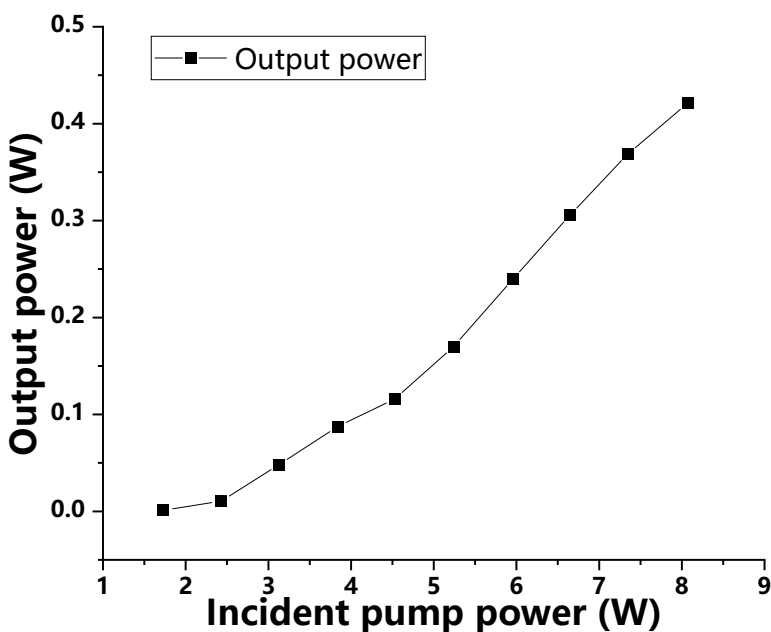


图 7 平均输出功率随入射泵浦功率的变化图像

平均输出功率和入射泵浦功率的变化关系如图所示。泵浦阈值为 3.83 W，在 8.07 W 的泵浦下获得最大的平均输出功率为 0.421 W，输出功率的增加未出现明显饱和现象，继续增大泵浦有望获取更大输出功率的调 Q 激光，光-光转换效率为 5.21%，斜效率为 7.86%。

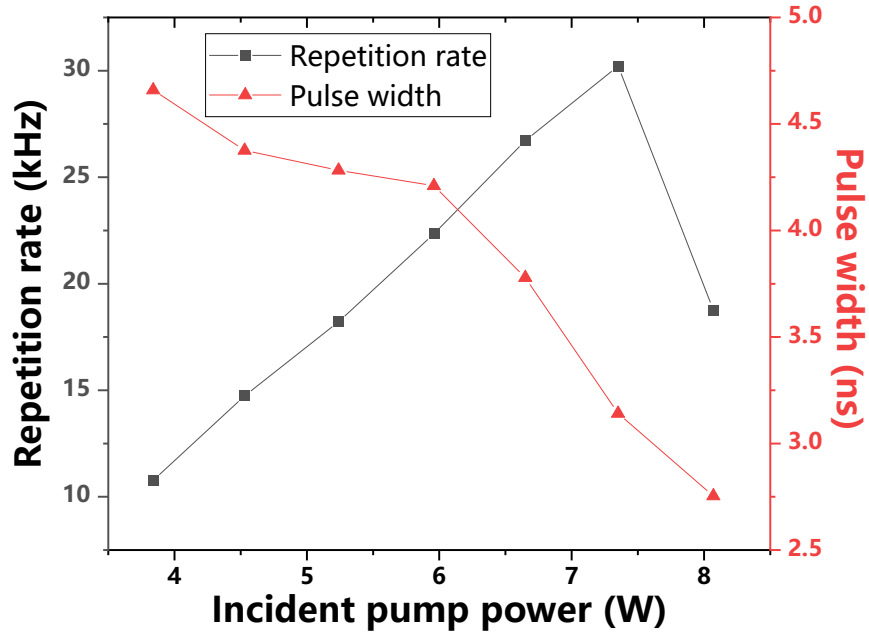


图 8 重复频率随入射泵浦功率变化图像（黑色方块）；脉冲宽度随入射泵浦功率变化图像（红色三角）

重复频率和脉冲宽度的变化如图 8 所示。可以直观地看出重复频率起初随泵浦的增加而变大，当到了一个特定值时突然剧减。这是因为当抽运能量增大到实现 GaAs 双光子吸收的阈值时，产生双光子吸收，损耗增加，增加了集居数反转所需的时间，降低了重复频率。在 7.35 W 抽运功率下得到了最大重复频率 30.2 kHz。随着泵浦功率的增加有效地缩短了脉冲宽度，在 8.07 W 泵浦功率下得到了 2.75 ns 的最短脉宽输出。

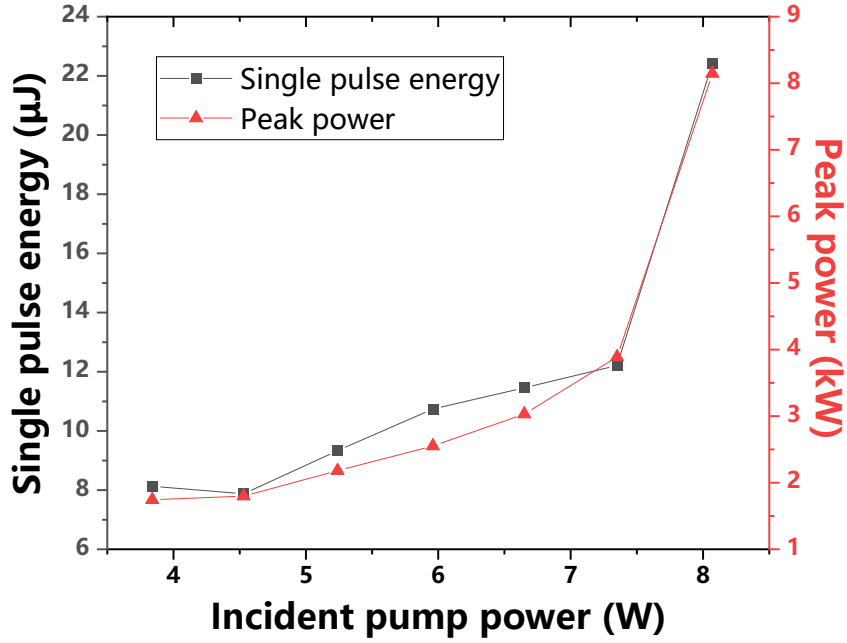


图 9 单脉冲能量随入射泵浦功率的变化图像（黑色方块）；峰值功率随入射泵浦功率的变化图像（红色三角）

单脉冲能量 E_{sp} 和峰值功率 P_m 已被算出，如图 9 所示。

$$E_{sp} = P_{out} / PRR \quad (13)$$

$$P_m = E_{sp} / \tau \quad (14)$$

单脉冲能量和峰值功率与抽运功率呈正相关变化，当入射泵浦功率为 8.07 W 时得到最大的单脉冲能量 22.4 μJ ，对应的脉冲峰值功率为 8.15 kW。

3.4 本章小结

本章首先对 GaAs 作为半导体饱和吸收材料进行调 Q 操作的机理进行了简单的阐述，接着通过实验实现了 Nd:LuYLaVO₄/GaAs 调 Q 激光器窄脉冲激光输出。

采用 Nd³⁺ 掺杂浓度为 1.0 at.%, 厚度为 4 mm 的钒酸盐混晶 Nd:LuYLaVO₄，用初始透过率为 50% 的无掺杂 GaAs 饱和吸收体和透过率为 50% 的凹面输出镜，获得了最大单脉冲能量 22.4 μJ，峰值功率 8.15 kW 的 2.75 ns 短脉宽被动调 Q 激光输出，最高重复频率 30.2kHz 在泵浦功率 7.35 W 下获得，光-光转换效率为 5.21%，斜效率为 7.86%。

4 结论与展望

4.1 主要结论

本文以激光增益介质 Nd:LuYLaVO₄ 钒酸盐混晶为研究对象, 泵浦源采用 808 nm 光纤耦合的激光二极管, 获得了高效的连续输出激光。并通过被动调 Q 操作得到了纳秒量级的短脉冲激光输出。主要工作如下:

1、简要综述了全固体激光器的发展历程和研究进展, 二极管激光作为固体激光器的泵浦源已成为主流, 钒酸盐混晶作为一种拥有无序结构的激光介质在谱线加宽方面具有优势, 是当前固体激光器研究的热点。

2、首次实现了 Nd:LuYLaVO₄ 激光器的连续激光输出, 输出峰频率为 1064.4 μm , 谱线半高宽为 0.89 nm。在 8.07 W 泵浦功率下, 得到了功率为 0.768 W 的连续激光输出。斜效率为 12.2 %, 光-光转换率为 9.52 %。

3、首次实现了被动调 Q Nd:LuYLaVO₄ / GaAs 激光器短脉冲输出, 在 8.07 W 泵浦功率下得到单脉冲能量 22.4 μJ 、峰值功率 8.15 kW 的 2.75 ns 短脉冲强激光输出。

4.2 有待进一步研究的内容

1、受制于晶体生长限制, 实验中采用的钒酸盐混晶体积较小, 且与散热装置贴合不够紧密, 在高功率泵浦下容易损坏, 这限制了泵浦功率的增加。如果制备出更大体积的钒酸盐混晶、或者采取更优化的散热结构, 有望在施加更大功率泵浦的情况下, 获得更高功率亚纳秒量级激光输出。

2、通过调 Q 激光序列波形的分析, 发现 50 %透过率输出镜对激光振荡的损耗过大, 影响了功率的提升。可尝试对不同透过率的输出镜进行程序拟合和对照试验, 找到一种对当前实验装置下更好的输出透镜, 获得更高功率的激光输出。

3、可尝试微片激光器结构，使激光器结构微型化、集成化，并降低不稳定性，使脉冲序列更稳定。

4、可以开展钒酸盐混晶调 Q 锁模激光器特性的研究。

参考文献

- [1] Maiman T H. Stimulated Optical Radiation in Ruby[J]. Nature, 1960, 187(4736): 493-494.
- [2] Krupke W F, Solarz R W, Beach R J, et al. The economics of high-duty-factor, high-average-power diode-pumped solid-state-lasers (DPSSLs)[C]: 40-41.
- [3] Orth C D. Diode-pumped solid-state-laser drivers and the competitiveness of inertial fusion energy[C].
- [4] Smrž M, Novák O, Mužík J, et al. Advances in High-Power, Ultrashort Pulse DPSSL Technologies at HiLASE[J]. Applied sciences, 2017, 7(10): 1016.
- [5] 郑权, 赵岭, 钱龙生. 大功率二极管泵浦固体激光器的应用和发展[J]. 光学精密工程, 2001: 6-9.
- [6] 廖明墩. LD 泵浦钒酸盐晶体被动调 Q 微型激光器研究[D]. 山东大学, 2009: 62.
- [7] Newman R. Excitation of the Nd^{3+} Fluorescence in CaWO_4 by Recombination Radiation in GaAs[J]. Journal of applied physics, 1963, 34(2): 437-437.
- [8] Keyes R J, Quist T M. Injection luminescent pumping of $\text{CaF}_2:\text{U}^{3+}$ with GaAs diode lasers[J]. Applied physics letters, 1964, 4(3): 50-52.
- [9] Ross M. YAG laser operation by semiconductor laser pumping (YAG laser operation by pumping with semiconducting GaAs laser diode, noting repetition rate for pulsed output)[J]. IEEE, PROCEEDINGS, 1968, 56: 196.
- [10] Chen Y F, Lee L J, Huang T M, et al. Study of high-power diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser at 1.34 μm : Influence of Auger upconversion[J]. Optics communications, 1999, 163(4-6): 198-202.
- [11] 张恒利, 何京良, 侯玮, 冯宝华, 许祖彦, 王继扬. LD 泵浦的 1.34 μm Nd:YVO₄ 晶体高效率激光器[J]. 中国激光, 1999, 06: 2-5.
- [12] Chen Y F, Lan Y P, Wang S C. High-power diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser: Thermally induced fracture versus pump-wavelength sensitivity[J]. Applied physics. B, Lasers and optics, 2000, 71(6): 827-830.
- [13] Tidwell S C, Seamans J F, Hamilton C E, et al. Efficient, 15-W output power, diode-end-pumped Nd:YAG laser[J]. Optics letters, 1991, 16(8): 584-586.
- [14] Kaneda Y, Oka M, Masuda H, et al. 7.6 W of continuous-wave radiation in a TEM₀₀ mode from a laser-diode end-pumped Nd: YAG laser[J]. Optics letters, 1992, 17(14): 1003-1005.
- [15] 于浩海. 新型系列钒酸盐晶体生长及其脉冲能量增强效应研究[D]. 山东大学, 2008.

- [16] Jovanović D J, Chiappini A, Zur L, et al. Synthesis, structure and spectroscopic properties of luminescent $\text{GdVO}_4\text{:Dy}^{3+}$ and DyVO_4 particles[J]. Optical materials, 2018, 76: 308-316.
- [17] Liu Junhai, Petrov V, Zhang Huaijin, et al. High-power laser performance of a-cut and c-cut Yb:LuVO_4 crystals[J]. Optics letters, 2006, 31(22): 3294-3296.
- [18] Liu Junhai, Han Wenjuan, Zhang Huaijin, et al. Comparative Study of High-Power Continuous-Wave Laser Performance of Yb-Doped Vanadate Crystals[J]. IEEE journal of quantum electronics, 2009, 45(7): 807-815.
- [19] Loiko P A, Yumashev K V, Matrosov V N, et al. Dispersion and anisotropy of thermo-optic coefficients in tetragonal GdVO_4 and YVO_4 laser host crystals: erratum[J]. Applied optics (2004), 2015, 54(15): 4820-4822.
- [20] Sato Y, Taira T. The studies of thermal conductivity in GdVO_4 , YVO_4 , and $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ measured by quasi-one-dimensional flash method[J]. Optics express, 2006, 14(22): 10528-10536.
- [21] Helmfrid S, Tatsuno K. Stable single-mode operation of intracavity-doubled diode-pumped Nd: YVO_4 lasers: theoretical study[J]. Journal of the Optical Society of America. B, Optical physics, 1994, 11(3): 436-445.
- [22] Lu Yang, Xu Qingyang, Gan Yi, et al. Field-Sequential Operation of Laser Diode Pumped Nd: YVO_4 /PPMgLN Microchip Green Laser[J]. IEEE photonics technology letters, 2010, 22(13): 990-992.
- [23] Tanner P A, Edelstein N. Infrared luminescence spectrum and crystal-field analysis of neodymium-doped yttrium vanadate[J]. Chemical physics letters, 1988, 152(2): 140-145.
- [24] Zagumennyi A I, Ostroumov V G, Shcherbakov I A, et al. The Nd: GdVO_4 crystal: a new material for diode-pumped lasers[J]. Soviet journal of quantum electronics, 1992, 22: 1071.
- [25] 赵永光. 新型掺钕钒酸盐与硅酸盐晶体光谱及全固态激光特性研究[D]. 山东大学, 2014.
- [26] Barnes N P. Physics of quasi-four-level lasers[C]: 2-9.
- [27] Maunier C, Doualan J L, Moncorgé R, et al. Growth, spectroscopic characterization, and laser performance of Nd: LuVO_4 , a new infrared laser material that is suitable for diode pumping[J]. Journal of the Optical Society of America. B, Optical physics, 2002, 19(8): 1794-1800.
- [28] 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, Lasers and optics, 2002, 74(S1): S177-S179.
- [29] Ostroumov V G, Huber G, Zagumennyi A I, et al. Spectroscopic properties and lasing of Nd: $\text{Gd}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{VO}_4$ crystals[J]. Optics communications, 1996, 124(1-2): 63-68.

- [30] Liu Junhai, Zhang Huaijin, Mateos X, et al. Low quantum defect laser oscillation of a new mixed Yb_{0.009}: Y_{0.575}Gd_{0.416}VO₄ crystal[J]. Optics express, 2008, 16(22): 17729-17734.
- [31] Zhang Huaijin, Yu Yonggui, Cheng Yan, et al. Thermal properties measurement and laser operation of a new Yb : Gd_{0.68}Lu_{0.32}VO₄ crystal[J]. Optics express, 2008, 16(15): 11481-11486.
- [32] Xu Honghao, Yu Haohai, Wang Zengping, et al. Thermal and laser characteristics of Nd doped La_{0.11}Y_{0.89}VO₄ crystal[J]. Optics express, 2012, 20(15): 16524-16531.
- [33] Lan Ruijun, Zhao Bin, Mu Penghua, et al. Passively Q-Switched Yb:Lu_{0.74}Y_{0.23}La_{0.01}VO₄ Laser Based on MoTe₂ Saturable Absorber[J]. IEEE Access, 2019, 7: 153378-153381.
- [34] Lan Ruijun, Liu Guanghua, Zhao Bin, et al. Pulse energy enhancement in a Passively Q-switched Yb:Lu_{0.74}Y_{0.23}La_{0.01}VO₄ laser with ReS₂ saturable absorber[J]. Optics communications, 2022, 504: 127484.
- [35] 周炳琨. 激光原理[M]. 国防工业出版社, 2014.
- [36] Hellwarth R W. Control of Fluorescent Pulsations[C], 1961.
- [37] Mcclung F J, Hellwarth R W. Giant Optical Pulsations from Ruby[J]. Journal of applied physics, 1962, 33(3): 828-829.
- [38] Wu Lin, Li Dechun, Zhao Shengzhi, et al. Passive Q-switching with GaAs or Bi-doped GaAs saturable absorber in Tm:LuAG laser operating at 2μm wavelength[J]. Optics express, 2015, 23(12): 15469-15476.
- [39] 公爽, 田金荣, 李克轩. 新型二维材料在固体激光器中的应用研究进展[J]. 中国光学, 2018, 11: 18-30.
- [40] 于浩海. 新型系列钒酸盐晶体生长及其脉冲能量增强效应研究[D]. 山东大学 2008.
- [41] 柳强, 巩马理, 闫平, et al. GaAs 被动调 Q 兼输出耦合 Nd : YVO₄ 激光特性研究[J]. 物理学报, 2002, 51(12): 2756.
- [42] Silverberg P, Omling P, Samuelson L. Hole photoionization cross sections of EL2 in GaAs[J]. Applied physics letters, 1988, 52(20): 1689-1691.
- [43] 兰瑞君. LD 泵浦 Nd: YAG 透明陶瓷全固态激光器研究[D]. 山东大学, 2010: 129.
- [44] Pan Lei, Hou Xueyuan, Li Yufei, et al. Passively Q-switched Nd:GdVO₄ laser with GaAs saturable absorber[J]. Optics and laser technology, 2004, 36(2): 121-124.
- [45] An J, Zhao S Z, Li Y F, et al. LD-pumped passively Q-switched Nd:LuVO₄ laser with a GaAs output coupler[J]. Laser physics letters, 2009, 6(5): 351-354.

[46] Li Shixia, Li Guiqiu, Zhao Shengzhi, et al. Passively Q-switched laser performance of a composite Nd:YVO₄/Nd:YVO₄/Nd:YVO₄ crystal with GaAs saturable absorber[J]. Optical and quantum electronics, 2013, 46(9): 1179-1186.

致谢

我的学位论文是在老师和研究生师兄的悉心指导下完成的。在此，谨以最诚挚的敬意表达我的感激之情：

感谢兰瑞君老师，兰老师治学严谨，学识渊博，平易近人。本论文的研究方向和内容都凝聚着老师在固体激光领域深厚的研究底蕴和科研热情。感谢老师在我陷入困难时耐心的讲解和修改论文时细致入微的指导。感谢老师在疫情困难时期对我论文工作的支持和鼓励，在此祝愿老师工作顺利，身体健康。

感谢刘广华师兄，师兄在理论和实验上都给予了我巨大的帮助。感谢师兄在实验设计，论文撰写与修改时给予的帮助。在师兄的指导下我不仅在专业知识水平、实验技能方面有了很大提高，而且在思想方法方面也成熟了很多。同样感谢闵欢欢师姐在我撰写论文时给予的建议和帮助。

感谢王淑梅老师，王老师和蔼可亲，务实严谨，桃李成蹊，王老师的激光原理课逻辑严谨、深入浅出，为我完成毕设提供了理论基础。

感谢我的父母、奶奶，是家庭支撑着我的漫漫求学路，无私的奉献和关爱让我有机会在书香中起飞，阳光下成长。

感谢我的女朋友张懿，一直以来的支持和鼓励，给了我前进的动力。

感谢所有给予我力量的人！

附录. 主要符号表

N	各模式光子数密度总和
n_i	工作物质中 E_i 能级上原子（分子、离子）数密度
f_i	E_i 能级简并度
S_{ij}	E_i 到 E_j 的无辐射跃迁几率
W_{ij}	E_i 到 E_j 的受激跃迁几率
A_{ij}	E_i 到 E_j 的自发辐射跃迁爱因斯坦系数
σ_{21}	中心频率处发射截面
τ_R	无源谐振腔中光子平均寿命
λ_c	起振光的波长
d	谐振腔腔长
T	输出端面对振荡光的透过率
n	增益介质的折射率
σ	增益介质的受激发射截面
τ	增益介质的荧光寿命
α_c	增益介质对起振光的吸收系数
ω_c	为 $z = 0$ 处的振荡光束的光斑半径（ $z = 0$ 位于增益介质的抽运端面处）

- ω_p 为 $z = 0$ 处的泵浦光束的光斑半径
- λ_p 抽运光波长
- P_{p0} $z = 0$ 处的泵浦功率，即入射到增益介质的泵浦功率
- α_p 增益介质对泵浦光的吸收系数
- δ 腔内包括散射损耗、衍射损耗、偏折损耗、元件损耗在内的各项损耗