

基于 Dy-Tb:LuLiF₄ 晶体的全固态黄光连续及脉冲激光特性研究

刘婧仪, 王荣, 李旭, 郑佳盼, 徐洪浩, 韩文娟, 张玉霞*, 刘均海

青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071

摘要 570 nm 附近黄光处于人眼敏感波段, 在医疗、生活及科研等领域有重要需求, 该波段激光的研究关系到国民经济和前沿科学领域的发展。报道了一种蓝光激光二极管端面抽运 Dy-Tb:LuLiF₄ 晶体的黄光激光器。选用单个蓝光激光二极管和两个蓝光激光二极管合束两种方式作为抽运源分别进行实验, 通过温度调节系统解决晶体的产热问题, 从而实现抽运光波长为 573.9 nm 的黄光激光输出。在吸收抽运功率为 3.0 W 的条件下, 输出黄光激光的功率为 297 mW, 斜效率为 12.3%。采用多层黑磷材料为调 Q 光开关, 实现了黄光脉冲激光输出。在吸收抽运功率为 2.8 W 时, 黄光脉冲激光的平均输出功率为 54 mW, 相应的脉冲宽度为 766.8 ns, 相应的脉冲能量为 2.1 μJ。

关键词 激光器; 黄光激光; 被动调 Q 技术; Dy-Tb:LuLiF₄

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230566

1 引言

作为可见光的一部分, 黄光因处于人眼敏感波段而在医疗、生活及科研等领域有重要需求。黄光波长与黑色素、血红蛋白及色斑等物质的特征吸收峰相吻合, 同时, 黄光激光在天文学、光谱学等领域也有重要应用, 因此, 高功率、高质量黄光的获取关系到国民经济和前沿科学领域的发展^[1-4]。实现黄光激光输出的方法包括激光二极管激励、非线性频率转换以及直接抽运合适的激光增益介质。非线性频率转换方法通过 Nd³⁺ 或 Yb³⁺ 离子产生 1 μm 附近的近红外激光, 再通过倍频、自倍频或和频等非线性频率转换方法实现黄光激光的输出。该方法以成熟的近红外波段晶体为基质, 基于激光原理及非线性光学效应实现黄光输出, 频率转换过程较复杂^[5-8]。此外, 采用半导体激光二极管也可以实现黄光输出, 目前相关研究已经可以实现红光、绿光和蓝光激光输出, 而且技术相对比较成熟。但绿光和红光中间的黄光波段尚处于实验研究阶段^[9]。借助于蓝光激光二极管的发展, 通过直接抽运稀土离子掺杂的激光增益介质也可以实现可见波段激光输出, 但受限于抽运技术及激光晶体材料, 通过该方法直接获得黄光激光输出还处于萌芽阶段^[10]。从能级图谱上看, 大多数稀土离子材料都存在可见波段的能级跃迁。随着对镝(Dy³⁺)离子的研究, 人们发现该离子的⁴F_{9/2}→⁶H_{13/2}跃迁恰好处于黄光波段。此外, Dy³⁺离

子还存在⁶H_{15/2}→⁴I_{15/2}蓝光波段吸收, 这表明 Dy³⁺离子掺杂的激光增益介质在直接抽运蓝光半导体激光器获得黄光激光输出方面存在潜在应用, 从而成为全固态黄光激光器的研究热点^[11]。

根据四能级速率方程理论, 较短的激光下能级寿命有利于降低激光阈值, 而 Dy³⁺离子黄光激光下能级⁶H_{13/2}的寿命较长(~10 ms), 易导致粒子阻塞, 影响黄光激光的产生^[12]。考虑到能量传递现象, 该问题可以通过共掺其他离子解决。由能级图谱可知, Tb³⁺离子的⁷F₄能级与 Dy³⁺离子的⁶H_{13/2}能级具有较小的能级差, 从⁴F_{9/2}能级跃迁到⁶H_{13/2}能级的粒子可与 Tb³⁺离子的⁷F₄能级进行能量传递, 将粒子转移到⁷F₄能级上, 因此, Dy³⁺离子与 Tb³⁺离子共掺晶体更有利于黄光激光的产生^[13]。由于特殊的能级结构, Dy³⁺离子在可见波段的跃迁均需自旋反转, 因此其在 450 nm 附近的基态吸收截面较小(约为 10⁻²¹ cm², 约为 Pr³⁺离子蓝光波段吸收截面的百分之一^[11])。虽然 450 nm 波长对应于蓝光激光二极管波长且近年来蓝光半导体发展得也比较迅速, 但其较小的吸收增加了对蓝光抽运系统的要求, 使得直接抽运产生黄光激光的研究进展缓慢。

近年来, 研究人员生长了一系列具有重要应用前景的 Dy³⁺离子掺杂激光晶体, 其中很多种晶体是由我国各高校及科研院所生长的, 比如: Zhou 等^[14]生长了 Dy:YCa₄O(BO₃)₃ 和 Dy-Tb:YCa₄O(BO₃)₃ 晶体, 并表征了晶体的基本光学性质, 他们认为该类晶体是一种

收稿日期: 2023-02-24; 修回日期: 2023-03-07; 录用日期: 2023-03-25; 网络首发日期: 2023-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(52002193)、山东省自然科学基金(ZR2020QF091)

通信作者: *yuxiazhang@qdu.edu.cn

有潜力的可调谐黄色激光晶体;中国科学院上海光学精密机械研究所的研究人员^[15-16]生长了 Dy:PbF₂ 和 Dy:CeF₃ 等系列氟化物晶体并系统地表征了晶体的光学性质,结果显示,这类晶体也可以作为全固态黄光激光器的增益介质。目前可实现黄光激光输出的 Dy³⁺ 离子掺杂晶体十分有限。1996年, Malinowski 等^[17]报道了 Dy:LiNbO₃ 晶体的激光输出,但激光输出波长在深红色 750 nm 附近。2000年, Seo 等^[18]以氙灯为抽运源抽运 Dy:KY(WO₄)₂ 和 Dy:KGd(WO₄)₂ 晶体,获得了黄光脉冲激光输出,但该实验是在低温液氮环境下进行的,至今还未见该晶体在室温下实现黄光激光输出的报道。到目前为止,仅有 Dy³⁺:ZBLAN 光纤在室温下实现了较高功率黄光输出^[19]。2014年, Bolognesi 等^[20]报道了 Dy-Tb:LiLuF₄ 共掺激光晶体材料在蓝光激光二极管抽运下实现了 55 mW 574 nm 黄光激光输出。2019年,李长磊等^[21]基于共掺 Dy-Tb:YAG 晶体实现了 582.1 nm 黄光激光输出,这也是我国在全固态黄光激光输出上的尝试,但他们只在实验中测得了激光输出波长并未实现黄光激光的稳定输出。2022年,本课题组对 Dy-Tb:LiLuF₄ 共掺激光晶体进行优化,实现了 220 mW 激光输出^[10]。

目前,基于蓝光半导体抽运的黄光调 Q 脉冲激光实验的相关报道很少。黑磷作为一种新型二维层状材料,无论是单层还是体块态均呈现直接带隙结构,理论上具有良好的非线性光学特性。黑磷的能带隙约为 0.3~2 eV^[22],该能带隙恰好介于石墨烯的能带隙(0 eV)与过渡金属硫化物的能带隙(1~2 eV)之间,这一带隙结构恰好弥补了二维纳米材料在电磁频谱中的空白。由带隙结构可知黑磷的本征吸收位于可见波段,具有作为可见波段调 Q 光开关的潜质。黑磷作为可见波段调 Q 光开关已经实现了红光调 Q 脉冲激光输出,但该材料在黄光波段的应用还未见报道^[23]。基于此,笔者将 Dy-Tb:LiLuF₄ 晶体作为研究对象,通过

优化抽运源提高黄光激光的输出功率,实现了连续黄光激光输出。之后,采用黑磷薄膜作为调 Q 光开关材料,获得了 573.9 nm 调 Q 脉冲激光输出。本研究可能有助于全固态黄光激光器件的发展。

2 实验装置及结果讨论

2.1 连续黄光实验

图 1(a) 所示为连续黄光实验装置示意图。实验所用抽运源是由单管蓝光激光二极管制作的蓝光光源(宁波远明激光技术有限公司提供),其最大输出功率为 3.5 W。抽运源波长随着输出功率的增加会发生红移,波长从低功率时的 447.7 nm 漂移到 450.5 nm,导致 Dy-Tb:LiLuF₄ 晶体在低抽运功率时吸收较低,在高抽运功率时吸收较高,最大吸收率约为 65%。实验中使用焦距为 75 mm 的聚焦透镜 F 对抽运光进行聚焦,聚焦后焦点恰好在晶体上。实验所用晶体是采用提拉法生长的 4% Dy³⁺ 和 1% Tb³⁺ 共掺的 LiLuF₄ 晶体,其生长参数与文献^[20]中的参数一致,实验中所用晶体尺寸为 3 mm×3 mm×19 mm (*a*×*c*×*a*),其中 3 mm×3 mm 端面进行激光级抛光但未镀膜。实验过程中使用一层薄薄的铝箔将晶体包裹住并镶嵌在自制的铜块内,铜块通过水管与恒温水冷系统相连,实验过程中控制水温为 10 °C。该操作可以降低激光产生过程中的热量对实验结果的影响。实验所用谐振腔由两个曲率半径均为 50 mm 的平凹镜组成,其中输入镜 M1 平面上镀有对抽运光高透过的膜系,凹面上镀有对抽运光增加透过且对黄光高反射的膜系。输出镜 M2 也是平凹镜,镀有在 574 nm 处透过率为 1.3% 的膜系。在实验过程中对激光谐振腔进行优化,最佳长度约为 50 mm。激光的输出功率由功率计测量。在测量输出功率时,在功率计前增加一个黄光滤波片,以防止抽运光对测试结果产生干扰,后续实验数据均已考虑滤波片的损耗。黄光激光光谱由光谱仪记录。

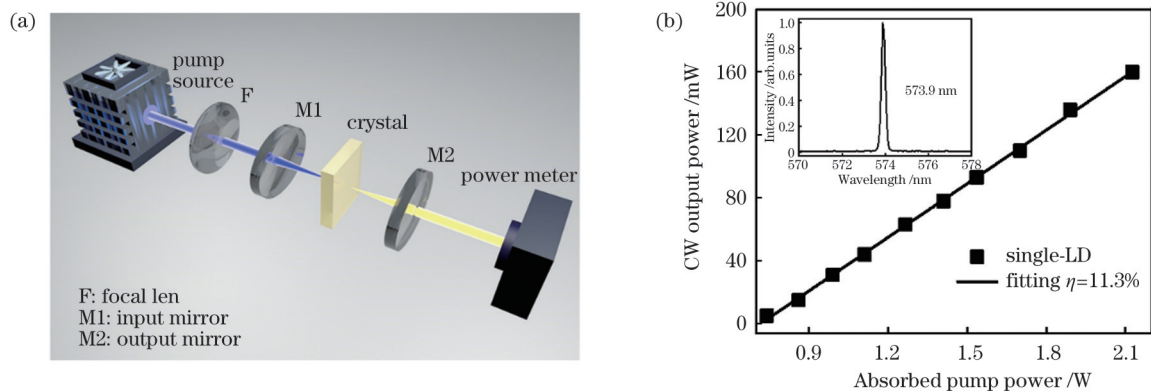


图 1 单管激光二极管抽运 Dy-Tb:LiLuF₄ 晶体实现黄光激光输出。(a) 实验装置示意图;(b) 连续光输出功率与吸收抽运功率的关系,内插图为激光光谱图

Fig. 1 Yellow laser output by pumping Dy-Tb:LiLuF₄ crystal with single laser diode. (a) Schematic of experimental setup; (b) continuous wave (CW) output power versus absorbed pump power with the corresponding laser spectrum in inset

当吸收抽运功率增大到 0.74 W 时,开始有黄光连续激光输出,连续光输出功率随着吸收抽运功率的变化如图 1(b)所示。通过增大吸收抽运功率和优化激光腔,单管蓝光激光二极管抽运 Dy-Tb:LiLuF₄ 晶体最终在吸收抽运功率为 2.12 W 时获得了 160 mW 的连续黄光激光输出,输出黄光功率随吸收抽运功率增大基本呈线性增长趋势,线性拟合后斜效率(η)约为 11.3%。光谱仪记录到此时的激光输出波长为 573.9 nm,该波长对应于黄光波长,激光光谱展示在图 1(b)插图中。

为了进一步提高黄光输出功率,在实验中采用两个蓝光激光二极管作为抽运源,并通过偏振合束器将两个蓝光激光二极管合束,合束可以明显增大抽运源的输出功率。实验装置图如图 2(a)所示。合束后的抽运光经聚焦镜后入射到晶体上,其他实验条件不变。通过优化合束光重叠面积和晶体位置,最终在吸收抽运功率为 3.0 W 时获得了 297 mW 的连续黄光输

出,斜效率约为 12.3%,实验结果展示在图 2(b)中。通过抽运光偏振合束技术可以有效提高晶体吸收抽运功率,但由于该晶体是偏振吸收,同时各蓝光激光二极管的激光参数不完全一致,所以未能达到成倍提高的效果。目前实现黄光激光输出的方法主要包括激光二极管激射、非线性频率转换以及直接抽运合适的激光增益介质,其中非线性频率转换法实现黄光输出已有较多报道,其输出功率已实现瓦级高功率激光输出,通过自倍频方法已经实现数瓦级黄光输出。该方法在腔型设计、实验操作及晶体选择等方面要求较为苛刻^[8]。蓝光激光二极管直接抽运 Dy-Tb:LiLuF₄ 晶体的方法具有设计简单、操作方便的优点,本次实验将全固态 Dy-Tb:LiLuF₄ 晶体黄光激光输出提高至接近 300 mW 量级。后续通过优化抽运源和聚焦系统,有望进一步提高黄光输出功率,该方法有望为高功率全固态黄光激光器的实现提供参考。

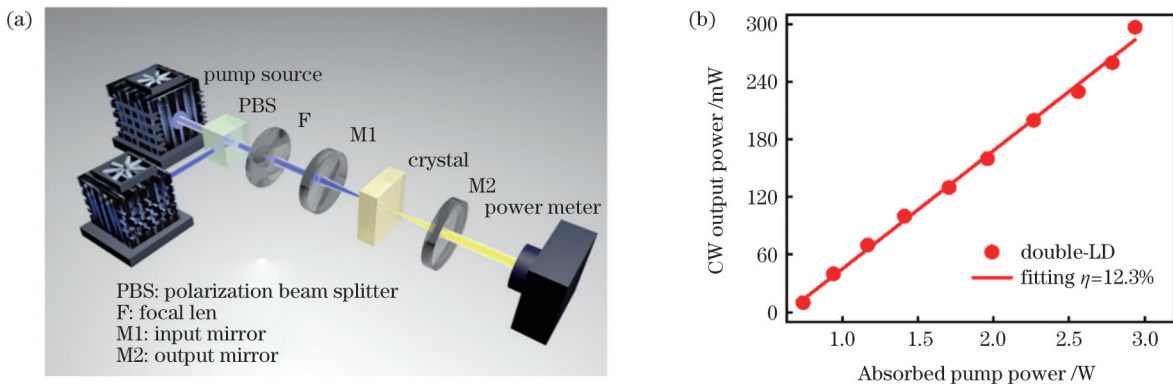


图 2 偏振合束激光二极管抽运 Dy-Tb:LiLuF₄ 晶体实现黄光激光输出。(a) 实验装置示意图;(b) 连续光输出功率与吸收抽运功率的关系

Fig. 2 Yellow laser output by pumping Dy-Tb:LiLuF₄ crystal with double laser diodes with polarization beam coupling. (a) Schematic of experimental setup; (b) CW output power versus absorbed pump power

2.2 调 Q 脉冲黄光实验

为实现黄光脉冲激光输出,采用黑磷薄膜材料作为调 Q 光开关。该黑磷材料采用化学气相沉积法制备,然后将其转移至基片上,基片为 1 mm 厚蓝宝石片。黑磷样品尺寸为 10 mm × 10 mm,具体制备过程由深圳六碳科技有限公司完成,样品实物图如图 3(b)内插图所示。首先以 532 nm 激光为光源测试了黑磷样品的拉曼光谱,测试结果如图 3(a)所示。从图 3(a)中可以观察到黑磷样品的拉曼光谱在 350~500 cm⁻¹ 之间出现了 3 个典型的拉曼振动峰,其中一个为 362.2 cm⁻¹ 处的平面外振动模式 A_g¹,另外两个是平面内振动模式 B_{2g} 和 A_g²,其峰位分别为 440.1 cm⁻¹ 和 467.7 cm⁻¹。根据文献报道,黑磷样品的三个特征峰会随着黑磷层数的增加而发生不同程度的红移,因此可以根据拉曼光谱特征峰的红移程度对黑磷样品的层数进行大致判断^[24-25],但因缺少对块体黑磷材料的表征,笔者未能确定出该黑磷样品的具体层数。

此外,采用紫外/可见/近红外分光光度计测试了黑磷样品及蓝宝石基片在可见波段的线性吸收性质。由图 3(b)可知蓝宝石基片在可见波段的透过率高达 96.5%。通过对比可以看出黑磷样品在可见波段有吸收,这与其带隙结构决定的本征吸收是吻合的。该样品在可见波段的透过率随着波长的增加呈增大趋势,其在 574 nm 黄光附近的透过率约为 85.5%。

为了测试黑磷样品的非线性可饱和吸收性质,采用自制双能量探头、非线性光学测试系统进行实验,实验装置示意图如图 4(a)所示。该系统以脉宽为 30 ns 的 532 nm 绿光脉冲激光器为光源,其重复频率为 10 Hz。实验过程中使用焦距为 200 mm 的聚焦镜将脉冲激光聚焦到待测样品上。在样品和聚焦镜之间放置一个分束镜,将脉冲激光光束分为测试光和参考光两部分,分别用能量探测器测量参考光和测试光的实时能量。通过改变激光器的电流改变黑磷样品上的入射能量,将参考光和测试光进行相关计算便可得到黑磷样品的透过率。

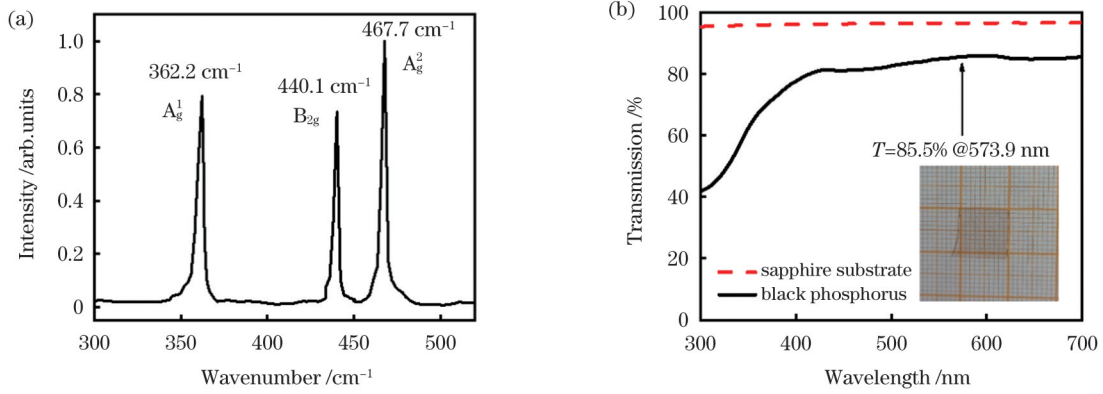


图 3 黑磷样品的性能表征。(a)黑磷样品的拉曼光谱;(b)黑磷样品及蓝宝石基片的透过光谱,插图为所用黑磷样品的实物照片
Fig. 3 Characterization of black phosphorus. (a) Raman spectrum of black phosphorus; (b) transmission spectrum of black phosphorus and sapphire substrate. Inset: the black phosphorus sample photograph

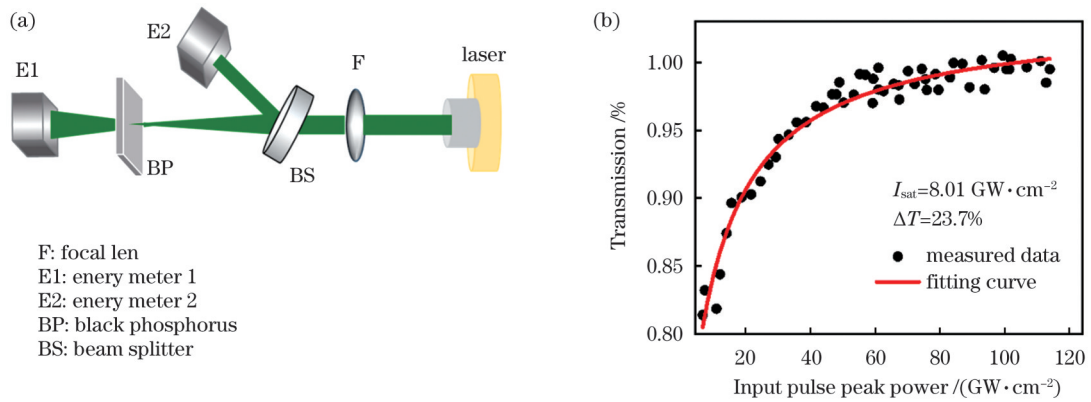


图 4 黑磷样品非线性可饱和吸收性质的测量和表征。(a)实验装置图;(b)样品透过率随入射光功率的变化
Fig. 4 Measurement and characterization of nonlinear saturable absorption properties of black phosphorus. (a) Schematic of experimental setup; (b) transmissivity of black phosphorus versus input pulse peak power

通过相关计算发现:随着黑磷样品上入射能量的增加,样品的透过率呈增大趋势;当入射光能量增大到一定程度后,样品的透过率不再变化。具体的变化曲线如图 4(b)所示。根据透过率和入射光强的公式对上述实验数据进行了拟合,拟合公式为

$$T = A \exp\left(\frac{-\Delta T}{1 + I/I_s}\right), \quad (1)$$

式中: T 是样品的透过率; A 是归一化常数; ΔT 是样品的调制深度; I_s 是饱和功率密度。经过拟合,得到 532 nm 波长下的调制深度 ΔT 为 23.7%,饱和功率密度 I_s 为 8.01 GW/cm²。

在两个蓝光激光二极管抽运实现连续黄光激光输出的基础上,将黑磷作为调 Q 光开关置入谐振腔内并使其紧贴激光晶体放置。实验过程中不断增大抽运功率,在吸收抽运功率为 1.95 W 时获得了黄色脉冲激光输出,平均输出功率随吸收抽运功率的变化如图 5(a)所示。从图 5(a)中可以看出,随着吸收抽运功率增大,脉冲的平均输出功率呈增大趋势,当吸收抽运功率为 2.8 W 时,平均输出功率最大,为 54 mW。实验过程中使用数字示波器和硅探测器实

时监测不同吸收抽运功率下输出脉冲的重复频率和脉冲宽度的变化,脉冲重复频率及脉冲宽度随吸收抽运功率的变化如图 5(b)所示。实验过程中,重复频率随着吸收抽运功率的增大而增大,而脉冲宽度则呈现相反的变化趋势,即随着吸收抽运功率增加呈现为整体减小的趋势,这也是被动调 Q 脉冲激光中重复频率和脉冲宽度的典型表现。本次实验中重复频率的变化范围为 9.4~26.2 kHz,当吸收抽运功率为 2.8 W 时,获得了最短脉冲输出,脉冲宽度为 766.8 ns,相应的峰值功率为 2.7 W,单脉冲能量为 2.1 μJ。

典型的调 Q 脉冲串和单脉冲波形图展示在图 5(c)、(d)中,从图中可以看出脉冲串间隔均匀且幅度变化不大,根据图中数据可以计算出相应的振幅涨落约为 5%,时间抖动为 17%。这说明调 Q 脉冲相对稳定,其单脉冲波形分布对称,是典型的高斯型脉冲波形。表 1 汇总了黑磷在不同波段调 Q 的实验结果。本实验将黑磷在脉冲激光中的应用扩展到了黄光波长,同时也可以看出黑磷作为调 Q 器件在脉冲宽度和脉冲能量等方面还有较大优化空间。

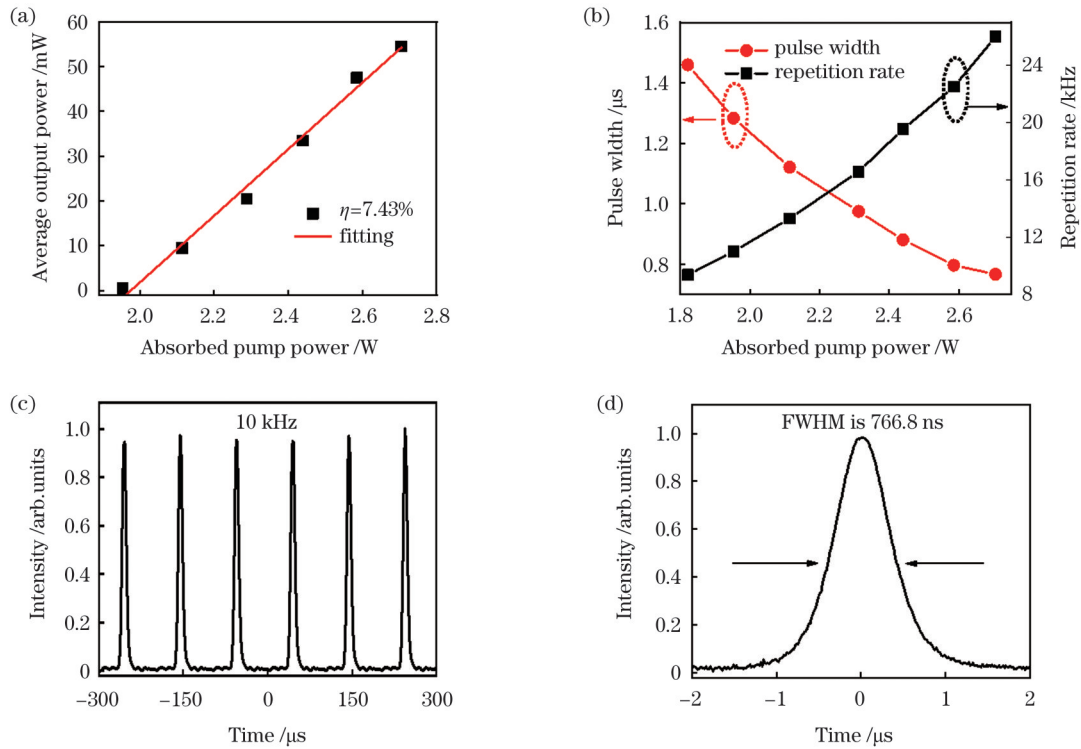


图 5 黑磷被动调 Q 黄光激光输出实验结果。(a) 平均输出功率与吸收抽运功率的关系；(b) 重复频率和脉冲宽度随吸收抽运功率的变化；(c) 10 kHz 时对应的脉冲序列；(d) 实验过程中的最窄单脉冲

Fig. 5 Experimental results of black phosphorus passively Q-switched yellow laser. (a) Average output power versus absorbed pump power; (b) repetition rate and pulse width versus absorbed pump power; (c) pulse sequence under the repetition rate of 10 kHz; (d) minimum single pulse during the experiment

表 1 黑磷作为可饱和吸收体在不同波段调 Q 的实验结果

Table 1 Experimental results of Q-switched operation in different wavelengths with black phosphorus as the saturable absorber

Crystal	Wavelength / nm	Output power / mW	Pulse duration / ns	Repetition rate / kHz	Pulsed energy / μJ	Reference
Dy-Tb:LiLuF ₄	573.9	160	766.8	26.2	2.10	This work
Pr:GdLiF ₄	639	18	189	172.0	0.10	[23]
Yb-Lu:YAG	1029	6	1730	63.9	0.09	[26]
Nd:GdVO ₄	1060	22	495	312.0	0.07	[23]
Tm:YAP	1986	850	1310	135.8	6.30	[27]
Tm-Ho:LuVO ₄	2057	860	2830	128.3	6.70	[28]
Er:Y ₂ O ₃	2720	6	4470	12.6	0.48	[26]

3 结 论

报道了基于蓝光激光二极管抽运的连续及黑磷被动调 Q 黄光脉冲激光输出。实验以单管蓝光激光二极管为抽运源实现了 160 mW 连续黄光输出；以两个蓝光激光二极管为抽运源获得 297 mW 连续黄光输出。以黑磷为可饱和吸收体实现了 573.9 nm 黄光被动调 Q 脉冲激光输出，并进一步研究了重复频率及脉冲宽度随吸收抽运功率的变化。结果显示：在吸收抽运功率为 2.8 W 时实现了 766.8 ns 的最短脉冲输出，计算得到的峰值功率和单脉冲能量分别为 2.7 W 和 2.1 μJ 。

下一步拟在该实验的基础上继续优化实验方案，通过晶体镀膜、抽运源整形等技术进一步提高晶体的

吸收功率，同时进一步探索适用于黄光脉冲的可饱和吸收器件，以进一步提升黄光调 Q 激光的输出质量，面向实际需求发展高功率、大能量、短脉宽的全固态黄光激光器。

参 考 文 献

- [1] 姜雨蒙, 谢红付, 简丹, 等. 红黄光治疗急性肿胀期玫瑰痤疮疗效观察[J]. 皮肤病诊疗学杂志, 2021, 28(3): 190-193.
Jiang Y M, Xie H F, Jian D, et al. The efficacy of red and yellow light on acute swelling of rosacea[J]. Journal of Diagnosis and Therapy on Dermato-Venereology, 2021, 28(3): 190-193.
- [2] 邓永红, 张新媛, 段俊国. 波长 577 nm 的黄色激光在眼底病治疗中的应用[J]. 中华眼科医学杂志(电子版), 2013, 3(5): 300-302.
Deng Y H, Zhang X Y, Duan J G. Application of yellow laser with 577 nm wavelengths in fundus diseases[J]. Chinese Journal of

- Ophthalmologic Medicine (Electronic Edition), 2013, 3(5): 300-302.
- [3] Thompson L A, Gardner C S. Experiments on laser guide stars at Mauna Kea Observatory for adaptive imaging in astronomy[J]. Nature, 1987, 328(6127): 229-231.
- [4] Duering M, Kolev V, Luther-Davies B. Generation of tuneable 589 nm radiation as a Na guide star source using an optical parametric amplifier[J]. Optics Express, 2009, 17(2): 437-446.
- [5] 赵辉, 王浩宇, 朱思祁, 等. 578.5 nm 端面泵浦被动调 Q 拉曼黄光激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0114004.
- Zhao H, Wang H Y, Zhu S Q, et al. 578.5 nm end-pumped passively Q-switched Raman yellow laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0114004.
- [6] Duan Y M, Li Y H, Xu C W, et al. Generation of 589 nm emission via frequency doubling of a composite c-cut Nd:YVO₄ self-Raman laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(15): 831-834.
- [7] 李萌萌, 杨飞, 赵上龙, 等. 全固态腔内和频单纵模 593.5 nm 黄光激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0301003.
- Li M M, Yang F, Zhao S L, et al. All solid-state intracavity sum-frequency single-longitudinal-mode 593.5 nm yellow lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0301003.
- [8] Cai Y P, Ding J, Bai Z X, et al. Recent progress in yellow laser: principles, status and perspectives[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152: 108113.
- [9] Bohdan R, Bercha A, Trzeciakowski W, et al. Yellow AlGaInP/InGaP laser diodes achieved by pressure and temperature tuning[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(6): 063105.
- [10] Zhang Y X, Wang R, Zhou Y S, et al. Diode-pumped Dy³⁺, Tb³⁺:LuLiF₄ continuous-wave and passively Q-switched yellow lasers. [J] Optics Communications, 2022, 510: 127917.
- [11] Kränkel C, Marzahl D T, Moglia F, et al. Out of the blue: semiconductor laser pumped visible rare-earth doped lasers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(4): 548-568.
- [12] Wang H Y, Li J F, Jia G H, et al. Optical properties of Dy³⁺ ions in sodium gadolinium tungstates crystal[J]. Journal of Luminescence, 2007, 126(2): 452-458.
- [13] Beauzamy L, Moine B, Gredin P. Energy transfers between dysprosium and terbium in YF₃[J]. Journal of Luminescence, 2007, 127(2): 568-574.
- [14] Zhou H, Sun Z G, Wang F P, et al. Preparation and spectral analysis of 4.3%Dy: YCa₄O(BO₃)₃ and 5%Dy, 1.25%Tb: YCa₄O(BO₃)₃ crystals for potential use in solid state yellow lasers[J]. CrystEngComm, 2023, 13: CE00015J.
- [15] Chen G Z, Yin J G, Zhang L H, et al. Optical properties of Dy³⁺ ion in PbF₂ laser crystal[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(11): 115801.
- [16] Yang Y L, Zhang L H, Li S M, et al. Crystal growth and 570 nm emission of Dy³⁺ doped CeF₃ single crystal[J]. Journal of Luminescence, 2019, 215: 116707.
- [17] Malinowski M, Myziak P, Piramidowicz R, et al. Spectroscopic and laser properties of LiNbO₃: Dy³⁺ crystals[J]. Acta Physica Polonica A, 1996, 90(1): 181-189.
- [18] Seo A K T, Ueda K I, Bagayev S, et al. Visible laser action of Dy³⁺ ions in monoclinic KY(WO₄)₂ and KGd(WO₄)₂ crystals under Xe-flashlamp pumping[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2000, 39(3A): L208-L211.
- [19] Zou J H, Li T R, Dou Y B, et al. Direct generation of watt-level yellow Dy³⁺-doped fiber laser[J]. Photonics Research, 2021, 9(4): 446-451.
- [20] Bolognesi G, Parisi D, Calonico D, et al. Yellow laser performance of Dy³⁺ in co-doped Dy, Tb: LiLuF₄[J]. Optics Letters, 2014, 39(23): 6628-6631.
- [21] 李长磊, 姚文明, 陈建生, 等. 基于共掺杂 Dy-Tb:YAG 晶体的全固态黄光激光特性研究[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1101008.
- Li C L, Yao W M, Chen J S, et al. All-solid-state yellow-laser characteristics based on co-doped Dy-Tb: YAG crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1101008.
- [22] Tran V, Soklaski R, Liang Y F, et al. Layer-controlled band gap and anisotropic excitons in few-layer black phosphorus[J]. Physical Review B, 2014, 89(23): 235319.
- [23] Zhang R, Zhang Y X, Yu H H, et al. Broadband black phosphorus optical modulator in the spectral range from visible to mid-infrared[J]. Advanced Optical Materials, 2015, 3(12): 1787-1792.
- [24] Wu J X, Mao N N, Xie L M, et al. Identifying the crystalline orientation of black phosphorus using angle-resolved polarized Raman spectroscopy[J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2015, 54(8): 2366-2369.
- [25] Zhang S, Yang J, Xu R J, et al. Extraordinary photoluminescence and strong temperature/angle-dependent Raman responses in few-layer phosphorene[J]. ACS Nano, 2014, 8(9): 9590-9596.
- [26] Kong L C, Qin Z P, Xie G Q, et al. Black phosphorus as broadband saturable absorber for pulsed lasers from 1 μm to 2.7 μm wavelength[J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(4): 045801.
- [27] 刘邦政, 李双成, 吴政阳, 等. 基于黑磷可饱和吸收体的被动调 Q Tm: YAP 激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(1): 0114006.
- Liu B Z, Li S C, Wu Z Y, et al. Passive Q-switched Tm: YAP laser based on black phosphorus saturable absorber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(1): 0114006.
- [28] Li L J, Li T X, Zhou L, et al. Passively Q-switched diode-pumped Tm, Ho: LuVO₄ laser with a black phosphorus saturable absorber[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(9): 094205.

Continuous and Pulsed Laser Properties of All-Solid Yellow Lasers Based on Dy-Tb:LuLiF₄ Crystal

Liu Jingyi, Wang Rong, Li Xu, Zheng Jiapan, Xu Honghao, Han Wenjuan,
Zhang Yuxia*, Liu Junhai

College of Physics, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China

Abstract

Objective Yellow lasers have applications in industrial, medical, and scientific fields. In addition, the demand for yellow lasers has gradually increased in astronomy, spectroscopy, and similar fields. Common methods for generating yellow lasers include using semiconductor lasers, nonlinear frequency conversion, and direct pump laser gain media doped with appropriate ions. These methods have yielded relatively high yellow lasers and Q-switched-pulse yellow lasers. However, the principle and process of nonlinear frequency conversion are complex. With the development of blue laser diode (LD) pumping technology, visible lasers can be obtained

by directly pumping a gain medium doped with rare-earth ions. The Dy^{3+} ion has an energy-level emission of ${}^4\text{F}_{9/2}$ to ${}^6\text{H}_{13/2}$ corresponding to the yellow emission at 574 nm, and an energy-level absorption of ${}^6\text{H}_{15/2}$ to ${}^4\text{I}_{15/2}$ corresponding to the absorption peak at 450 nm. Thus, Dy^{3+} ion-doped crystals are potential yellow laser gain materials for being directly pumped by blue LDs. Co-doping with Tb^{3+} ions has also been reported as an effective method for quenching the lower level ${}^6\text{H}_{13/2}$ of Dy^{3+} , which can lead to fast depopulation of the population in the lower laser level and reduce the pumping threshold. Therefore, a yellow laser performance with the output power of 55 mW was obtained in Dy-Tb:LuLiF₄ crystal in 2014. The results can be further optimized through the development of pumping technologies. Black phosphorus (BP), a two-dimensional (2D) material, has a direct bandgap of 0.3–2 eV. The direct bandgap theoretically indicates that BP is a potential broadband saturable absorber in the visible to mid-infrared regions. Therefore, with BP as a suitable saturable absorber, a pulsed yellow laser can be realized using Q-switching technology. Hence, in this study, with a Dy-Tb:LuLiF₄ crystal as the gain material, continuous wave (CW) and passively Q-switched yellow lasers are generated with single-emitter and double-emitter blue LDs as the pump sources, respectively.

Methods The pump sources used in the experiment were single-emitter and double-emitter blue LDs, under the same conditions [Fig. 1(a) and Fig. 2(a)]. The laser resonator consisted of two concave mirrors (M1 and M2) with a radius of curvature of 50 mm each. Two mirrors were coated to generate a yellow laser. The distance between M1 and M2 was optimized to approximately 50 mm. Finally, the pump beam was focused onto the Dy-Tb:LuLiF₄ crystal using a planoconvex lens. The laser crystal was polished and mounted onto a copper holder equipped with circulating cool water. The BP sample was fabricated via chemical vapor deposition (CVD) using sapphire as the substrate. The transmission spectra in the visible range and the Raman spectrum of the sample were measured (Fig. 3). To investigate the saturable absorption of the BP sample, a self-administered Z-scan test system was employed with a pump source at 532 nm. The variation in the normalized transmittance with incident intensity was presented and fitted using the saturable absorption equation (Fig. 4 and equation 1). To generate a Q-switched yellow laser, the BP sample was inserted into the cavity and placed at the minimum possible distance from the Dy-Tb:LuLiF₄ crystal.

Results and Discussions With the laser setup of the single-emitter blue LD, a CW laser was generated at a threshold absorbed pump power of 0.74 W. When the absorbed pump power increases to 2.12 W, the maximum output power of the yellow laser is obtained with a corresponding slope efficiency of 11.3% [Fig. 1(b)]. With the double-emitter-blue-LD setup, a maximum output power of 297 mW is generated under the absorbed pump power of 3.0 W with a corresponding slope efficiency of 12.3% [Fig. 2(b)]. To verify the Q-switching performance, variations in the pulse width and repetition rate as functions of the absorbed pump power were obtained (Fig. 5). As the pump power increases, the pulse width decreases to 766.8 ns, and the repetition rate increases from 9.4 to 26.2 kHz with the increase in the absorbed pump power. Thus, the pulse energy and peak power can be estimated. When the absorbed pump power is 3 W, the maximum pulse energy is 2.1 μJ , and the maximum peak power is 2.7 W. The temporal waveform of the pulse is also provided, which verifies the stable Q-switching behavior.

Conclusions In this paper, we report a yellow laser pumped by single- and double-tubed blue LDs. Combined with a temperature control system to deal with the heat generated by the crystal, a 573.9 nm yellow laser is generated. The maximum output power is 297 mW at an absorbed pump power of 3.0 W, and the corresponding slope efficiency is 12.3%. A multilayer BP sample is used as a saturable absorber to generate a Q-switched pulsed yellow laser. When the absorption pump power is 2.8 W, the average output power of the pulsed yellow laser is 54 mW, with the corresponding pulse width of 766.8 ns and the corresponding pulse energy of 2.1 μJ .

Key words laser; yellow laser; passive Q-switched technology; Dy-Tb:LuLiF₄