

914 nm 基态高斯塔克能级共振抽运的 高效率 Nd:YVO₄ 激光器

丁 欣^{1,2} 张海永^{1,2} 盛 泉^{1,2*} 李 斌^{1,2} 尚 策^{1,2} 范 琛^{1,2}
禹宣伊³ 温午麒^{1,2} 姚建铨^{1,2}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072

²天津大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072; ³南开大学物理科学学院, 天津 300071

摘要 利用全固态 Nd:YVO₄ 激光器的 914 nm 输出作为抽运源, 对 Nd:YVO₄ 晶体进行基态高斯塔克能级共振抽运, 获得了高效率的 1064 nm 激光输出。为解决基态高斯塔克能级共振抽运吸收差、光-光转换效率低的问题, 详细分析了掺杂浓度、温度以及长度等晶体参数对抽运光吸收和激光转换效率的影响。在此基础上, 使用长度为 20 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体获得了相对入射抽运光 56.9% 的高光-光转换效率。914 nm 基态高斯塔克能级共振抽运 Nd:YVO₄ 激光器的光-光转换效率达到了可与传统抽运相比拟的实用化水平。

关键词 激光器; 共振抽运; Nd:YVO₄ 激光器; 基态高斯塔克能级

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0702008

High Efficiency Nd:YVO₄ Laser In-Band Pumped from High Stark Level of Ground State at 914 nm

Ding Xin^{1,2} Zhang Haiyong^{1,2} Sheng Quan^{1,2} Li Bin^{1,2} Shang Ce^{1,2}
Fan Chen^{1,2} Yu Xuanyi³ Wen Wuqi^{1,2} Yao Jianquan^{1,2}

¹Laser and Opto-Electronics Technology Research Institute, College of Precision Instrument and
Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science, Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072, China

³School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract A high efficiency 1064 nm Nd:YVO₄ laser which is in-band pumped from high Stark level of ground state to upper laser level by another Nd:YVO₄ laser operating at 914 nm is demonstrated. To overcome the drawback of low optical-optical conversion efficiency induced by poor pump absorption, the influences of doping concentration, temperature and length of laser gain medium on pump absorption and laser conversion efficiency are investigated in detail. On this basis, a high optical-optical efficiency of 56.9% is achieved by using Nd:YVO₄ crystal with length of 20 mm as gain medium. The optical-optical conversion efficiency of the Nd:YVO₄ laser in-band pumped from high Stark level of ground state at 914 nm reaches a practical level comparable to that of traditional pumping.

Key words lasers; in-band pumping; Nd:YVO₄ laser; high Stark level of ground state

OCIS codes 140.3530; 140.3580; 140.5560

收稿日期: 2013-01-06; 收到修改稿日期: 2013-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(60978021, 61178028)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0610)

作者简介: 丁 欣(1972-), 男, 教授, 主要从事全固态激光器和非线性光学频率变换技术方面的研究。

E-mail: dingxin@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: shengquan@tju.edu.cn

1 引 言

全固态激光器中的热效应是阻碍其实现高功率、高效率、高光束质量稳定运转的主要障碍,设法减少进入工作介质的无用热是缓解热效应的最根本途径^[1]。全固态激光器中热量产生的主要原因在于抽运光子和激光光子之间的能量差,又称为量子缺陷。自20世纪90年代末以来,分别使用885 nm和880/888 nm的抽运光替代传统的808 nm抽运光对Nd:YAG和Nd:YVO₄晶体进行共振抽运的方式得到了深入研究和广泛应用^[2-8]。共振抽运将Nd³⁺从基态⁴I_{9/2}直接抽运至激光上能级⁴F_{3/2},消除传统四能级系统中由激发态能级⁴F_{5/2}至激光上能级⁴F_{3/2}的弛豫过程,能够有效地降低量子缺陷率,同时提高量子效率,从而减少热量的产生。近年来,为了进一步降低量子缺陷率,研究人员开始尝试将基态高斯塔克能级上的粒子抽运至激光上能级,又称为热助推抽运。2008年,Goldring等^[9]率先报道了946 nm抽运的Nd:YAG激光器,指出晶体对抽运光的吸收系数和吸收线宽是温度的增函数,因此对晶体采用了加温工作以图克服其吸收系数过小的缺点。随后,Sangla等^[10]在2009年报道的938 nm抽运的Nd:YAG激光器中也得到了类似的结论。同时,数值模拟的结果表明使用较高掺杂浓度的晶体(掺杂原子数分数为2%)替代低掺杂浓度晶体(掺杂原子数分数为0.7%)能够大幅提高激光输出功率。

2009年Sangla等^[11]首次报道了914 nm共振抽运的Nd:YVO₄激光器($Z_5 \rightarrow ^4F_{3/2}$),在吸收抽运功率为14.6 W时获得了11.5 W的1064 nm激光输出,相对吸收抽运光的转换效率高达78.7%,同时也显示出了极低的热负载。然而,由于晶体对于914 nm抽运光的吸收系数比880 nm抽运光还要低一个数量级,导致其41%的光-光转换效率仍难以令

人满意,因此,改善晶体对抽运光的吸收成为914 nm共振抽运Nd:YVO₄激光器中的首要问题。通常来讲,较高的掺杂浓度、较高的温度以及较长的晶体长度都对抽运光吸收有提升作用,但是每种方法都有其缺点。Délén等^[12]曾在理论上指出,在掺杂原子数分数为1.5%的Nd:YVO₄晶体中,俄歇上转换对激光效率的影响要远比掺杂原子数分数为0.1%的晶体中严重。因此,实验研究914 nm共振抽运下晶体参数对于抽运光吸收和激光效率的影响,研究保证抽运吸收、提高光-光转换效率的有效方法是很有必要的。本文利用端面抽运Nd:YVO₄激光器输出的914 nm激光输出作为抽运源,详细研究了晶体掺杂浓度、温度和长度对抽运吸收、激光功率以及转换效率的影响;在此基础上利用长度为20 mm的Nd:YVO₄晶体作为激光增益介质,获得了相对入射抽运光为56.9%的高光-光转换效率,达到了与传统抽运相比拟的可实用化水平。

2 实验装置

图1所示为实验装置示意图。914 nm抽运源为自行搭建的Nd:YVO₄激光器,其抽运源为808 nm光纤耦合输出的激光二极管(LD)阵列,光纤芯径为400 μm,数值孔径为0.22,经1:1耦合器聚焦后抽运Nd:YVO₄晶体,晶体沿a轴切割,掺杂原子数分数为0.15%,尺寸3 mm×3 mm×5 mm。晶体入射端面镀对808 nm增透、对914 nm高反膜系,出射端面镀对914 nm增透膜;晶体由铜片包裹后置于铜质夹具中,利用循环水冷却至10 ℃。914 nm激光输出镜曲率半径为150 mm,对914 nm激光透射率为5%,谐振腔长为17 mm。入射808 nm抽运光功率为26 W时,得到的914 nm激光最高输出功率为7.6 W,光谱线宽为1 nm,光束质量因子M²=1.4。

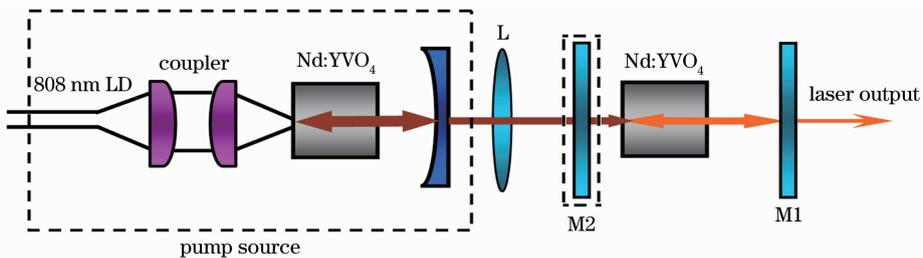


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

为研究晶体掺杂浓度和长度对抽运吸收和激光效率的影响,实验中分别使用了以下4块晶体作为1064 nm激光的增益介质:掺杂原子数分数为

0.5%,尺寸为3 mm×3 mm×5 mm;1.0%,3 mm×3 mm×4 mm;1.0%,3 mm×3 mm×10 mm;3.0%,3 mm×3 mm×4 mm。4块晶体镀膜相同,均为入射

端面镀对 914 nm 增透、对 1064 nm 高反膜系；出射端面镀对 914、1064 nm 增透膜。焦距为 50 mm 的透镜 L 将 914 nm 抽运光聚焦到 Nd:YVO₄ 晶体内，抽运光斑约为 180 μm。由于透镜 L 未镀膜，入射晶体 914 nm 的最大抽运功率为 6.9 W。1064 nm 激光输出镜 M2 为平镜，对 1064 nm 激光透射率为 5%，为保证对抽运吸收测量的准确性，M2 还镀有对 914 nm 增透膜，1064 nm 激光谐振腔长 15 mm。Nd:YVO₄ 晶体由铜片包裹，置于铜质夹具中，通过改变循环水温控制晶体温度。914 nm 抽运光沿晶体 c 轴方向偏振(π 偏振)。

3 实验结果与讨论

实验中首先测量了各晶体在无激光振荡时对 914 nm 抽运光的吸收随温度的变化，如图 2 所示。掺杂原子数分数分别为 0.5%、1.0% 和 3.0% 的晶体在 20 °C 时对 π 偏振 914 nm 抽运光吸收系数分别为 0.26、0.46、1.80 cm⁻¹；加热晶体至 50 °C，吸收系数分别升高至 0.29、0.53、1.96 cm⁻¹。相对提高掺杂浓度而言，提高晶体温度对抽运吸收起到的改善作用很小。

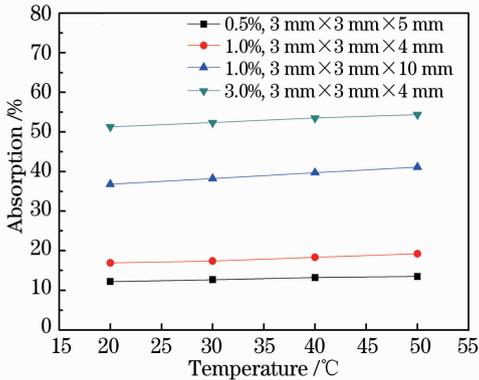


图 2 各晶体对 914 nm 抽运光的吸收百分比随温度的变化(无激光状态)

Fig. 2 Absorption of 914 nm pumping laser in each crystal versus temperature (without lasing)

图 3 所示为各晶体在不同温度下的 1064nm 激光输出功率相对吸收的 914 nm 抽运光功率的变化关系。在温度为 20 °C 时，掺杂原子数分数为 1.0%，10 mm 长的晶体吸收 2.55 W 抽运光，输出激光功率为 2.07 W，光-光转换效率为 81.2%，斜率效率 η_s 达到 82.0%，接近 85.9% 的量子效率。相同掺杂浓度、长度为 4 mm 的晶体获得了 82.2% 的相近斜率效率，区别在于其较短的长度致使吸收抽运功率仅为 1.22 W，输出激光功率为 0.98 W，为了使图示更

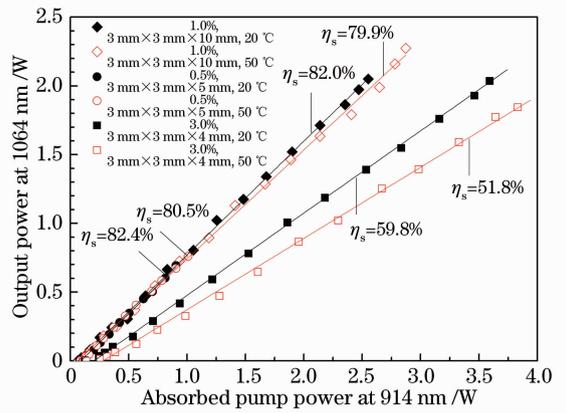


图 3 不同温度下 1064 nm 激光输出功率相对吸收的 914 nm 抽运功率的变化

Fig. 3 Output power of 1064 nm laser under different temperatures versus absorbed 914 nm pump power

清楚，并未在图中给出。使用掺杂原子数分数为 0.5% 晶体时，斜率效率和光-光转换效率分别为 82.4% 和 81.3%。使用掺杂原子数分数为 3.0% 的晶体时，在 3.55 W 的吸收抽运功率下获得了 2.03 W 的激光输出。尽管其吸收抽运功率明显高于掺杂原子数分数为 1.0%、10 mm 长的晶体，但激光输出功率并未提高，其 57.2% 的光-光转换效率和 59.8% 的斜率效率也均明显低于其他晶体。这是由于高掺杂浓度晶体中较短的上能级寿命所致。高掺杂浓度导致了更严重的交叉弛豫，同时，在相同的抽运功率下更高的抽运吸收也使得俄歇上转换更为严重^[12-13]，这些过程都消耗了反转粒子数。掺杂原子数分数为 3.0% 的 Nd:YVO₄ 晶体上能级寿命仅约为 50 μs^[14]，严重影响了激光增益。因此，高掺杂浓度并非提高 914 nm 共振抽运 Nd:YVO₄ 激光器抽运吸收、获得高光-光转换效率的好方法。

将掺杂原子数分数为 1.0%、长度为 10 mm 的晶体由 20 °C 加热至 50 °C，在 6.9 W 注入抽运功率下，吸收抽运功率从 2.55 W 增至 2.87 W，激光输出功率从 2.07 W 增至 2.27 W。晶体加温工作改善了抽运吸收，从而提高了总的光-光转换效率。使用掺杂原子数分数为 0.5% 和 1.0% 的晶体时均观察到了这一趋势，如图 4 所示。然而，加温工作时，相对吸收抽运功率 79.9% 的斜率效率和 79.1% 的光-光转换效率均略低于 20 °C 时的 82.0% 和 81.2%。由图 3 可知，其他晶体加温工作时相对吸收抽运功率的效率也都发生了下降，这是由于 Nd:YVO₄ 晶体 $F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 能级跃迁的受激发射截面是温度的减函数^[15-16]。同样是由于受激发射截面的减小，温度由 20 °C 升高至 50 °C 时，掺杂原子数

分数为 1.0%、长度为 10 mm 的晶体相对吸收抽运的激光阈值从 62 mW 升至 73 mW。使用掺杂原子数分数为 3.0% 的晶体时,加温工作使得吸收抽运功率从 3.55 W 提高到 3.76 W,但是其激光输出功率并未像使用较低掺杂浓度晶体时一样得到提高,反而出现了下降。一方面,在抽运吸收已经较好的情况下,加温工作使得抽运吸收提升的比例较小;另一方面,受激发射截面和上能级寿命的同时下降严重影响了激光增益。因而,在抽运吸收达到一定程度后,不宜采用加温工作的方式;选用适当的晶体掺杂浓度,增加抽运光在晶体内通过的总程长,是增加 914 nm 基态高斯塔克能级共振抽运方式的抽运吸收、提高光-光转换效率的最佳方法。

和 50 °C 温度下激光输出功率的对比,再次验证了抽运吸收较好时不宜采用加温工作的推断。图 6 所示为 1064 nm 激光输出功率相对吸收抽运功率的变化关系。由图 6 可知,随着掺杂浓度的提高上能级寿命缩短,相对吸收抽运光的斜率效率有所下降,这与图 3 中趋势相同。

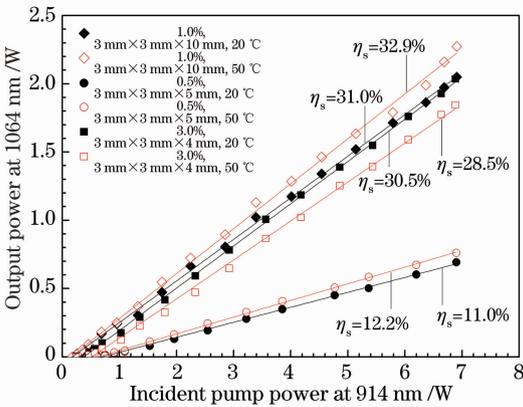


图 4 不同温度下 1064 nm 激光输出功率相对注入的 914 nm 抽运功率的变化

Fig. 4 Output power of 1064 nm laser under different temperatures versus incident 914 nm pump power

根据以上结论,为实现高光-光转换效率,选用了三块长度为 20 mm,掺杂原子数分数分别为 1.0%、1.5% 和 2.0% 的 Nd:YVO₄ 晶体作为激光增益介质。晶体均双面镀对 914、1064 nm 增透膜,因此使用了图 1 中虚线框内的 M2 镜组成激光谐振腔。激光谐振腔为平平腔,腔长为 30 mm,激光输出镜 M1 对 1064 nm 激光透射率为 5%。三块晶体在 20 °C 时对注入的 914 nm 抽运光的吸收率分别为 66.6%、79.7% 和 89.4%。在 6.9 W 入射抽运功率下,分别获得了 3.47、3.82、3.92 W 的 1064 nm 激光输出,对应光-光转换效率分别为 50.3%、55.3% 和 56.9%,如图 5 所示。通过增加抽运光在晶体中的总程长,保证抽运吸收,提高光-光转换效率,使得热负载极低的 914 nm 基态高斯塔克能级共振抽运 Nd:YVO₄ 激光器的光-光转换效率达到了能够与 808 nm 传统抽运相比拟的可实用化的水平。图 5 中插图是掺杂原子数分数为 2.0% 的晶体在 20 °C

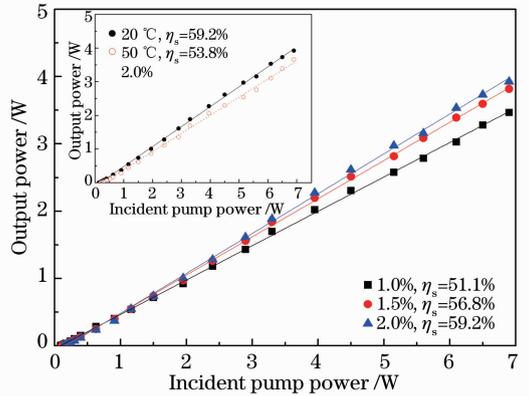


图 5 20 mm 长的晶体在不同掺杂浓度下其 1064 nm 激光输出功率相对注入 914 nm 抽运功率的变化

Fig. 5 Output power of 1064 nm laser of 20-mm-long Nd:YVO₄ crystals with different doping concentrations versus incident 914 nm pump power

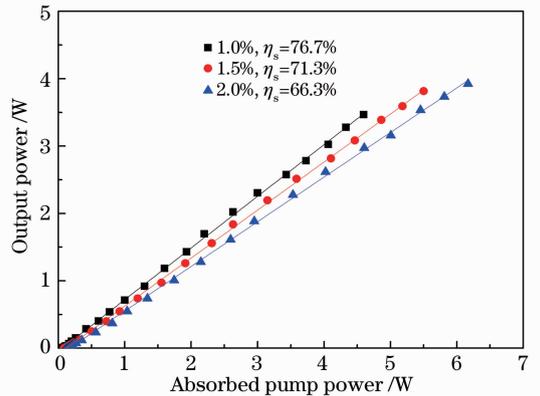


图 6 20 mm 长的晶体在不同掺杂浓度下其 1064 nm 激光输出功率相对吸收 914 nm 抽运功率的变化

Fig. 6 Output power of 1064 nm laser of 20-mm-long Nd:YVO₄ crystals with different doping concentrations versus absorbed 914 nm pump power

4 结 论

为解决 914 nm 基态高斯塔克能级共振抽运的 Nd:YVO₄ 激光器中抽运吸收较差导致的光-光转换效率较低的问题,实验研究了掺杂浓度、长度和温度等晶体参数对于抽运吸收和斜率效率的影响。结果表明,由于对激光上能级寿命和受激发射截面的负面影响,提高晶体的掺杂浓度和温度都不能在保证

抽运吸收的同时获得高光-光转换效率;而增加抽运光在晶体内通过的总程长是提高基态高斯塔克能级共振抽运激光器光-光转换效率的最佳方法。在此基础上,利用掺杂原子数分数为 2.0%,长度为 20 mm 的晶体,在 6.9 W 注入抽运功率下获得了 3.92 W 的 1064 nm 激光输出,相应光-光转换效率为 56.9%,达到了能够与传统抽运相比拟的可实用化水平。

参 考 文 献

- Zhou Shouhuan. Thermal management in the solid state laser [J]. Chinese J Quantum Electronics, 2005, 22(4): 497-509.
周寿桓. 固体激光器中的热管理[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 497-509
- Y Sato, T Taira, N Pavel, *et al.*. Laser operation with near quantum-defect slope efficiency in Nd:YVO₄ under direct pumping into the emitting level [J]. Appl Phys Lett, 2003, 82(6): 844-846.
- Wu Xingsheng, Gao Jiancun, Tang Xinchun, *et al.*. 20.6 W Nd:YVO₄ thin disk laser with laser-diode direct upper-state pumping [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1202001.
吴兴盛,高健存,唐新春,等. 20.6 W 激光二极管直接上能级抽运 Nd:YVO₄ 薄片激光器 [J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1202001.
- Ai Qingkang, Chang Liang, Chen Meng, *et al.*. Thermal analysis of Nd:YVO₄ pumped by 808 nm and 888 nm [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0402001.
艾庆康,常亮,陈檬,等. 808 nm 与 888 nm 抽运 Nd:YVO₄ 热效应分析 [J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0402001.
- Fangqin Li, Nan Zong, Zhichao Wang, *et al.*. Passively mode-locked grown-together composite YVO₄/Nd:YVO₄ crystal laser with a semiconductor saturable absorber mirror under 880 nm direct pumping [J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(4): 041405.
- He Kunna, Wei Zhiyi, Zhang Zhiguo, *et al.*. Overview on laser diode pumped solid-state laser with direct pumping scheme [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1679-1685.
何坤娜,魏志义,张治国,等. 全固态激光直接抽运技术的发展和研究现状 [J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1679-1685.
- Zheng Yaohui, Wang Yajun, Peng Kunchi. Single-end pumping, single-frequency Nd:YVO₄/LBO laser with output power of 21.5 W [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602011.
郑耀辉,王雅君,彭堃堃. 输出功率为 21.5 W 的单端抽运 Nd:YVO₄/LBO 单频激光器 [J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602011.
- V Lupei, N Pavel, T Taira. 1064 nm laser emission of highly doped Nd:yttrium aluminum under 885 nm diode laser pumping [J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(23): 4309-4312.
- S Goldring, R Lavi. Nd:YAG laser pumped at 946 nm [J]. Opt Lett, 2008, 33(7): 669-671.
- D Sangla, F Balembois, P Georges. Nd:YAG laser diode-pumped directly into the emitting level at 938 nm [J]. Opt Express, 2009, 17(12): 10091-10097.
- D Sangla, M Castaing, F Balembois, *et al.*. Highly efficient Nd:YVO₄ laser by in-band diode pumping at 914 nm [J]. Opt Lett, 2009, 34(14): 2159-2161.
- X Délen, F Balembois, O Musset, *et al.*. Characteristics of laser operation at 1064 nm in Nd:YVO₄ under diode pumping at 808 and 914 nm [J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(1): 52-57.
- Y F Chen, C C Liao, Y P Lan, *et al.*. Determination of the Auger upconversion rate in fiber-coupled diode end-pumped Nd:YAG and Nd:YVO₄ crystals [J]. Appl Phys B, 2000, 70(4): 487-490.
- R Fluck, B Braun, E Gini, *et al.*. Passively Q-switched 1.34- μ m Nd:YVO₄ microchip laser with semiconductor saturable-absorber mirrors [J]. Opt Lett, 1997, 22(13): 991-993.
- X Délen, F Balembois, P Georges. Temperature dependence of the emission cross section of Nd:YVO₄ around 1064 nm and consequences on laser operation [J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(5): 972-976.
- G Turri, H P Jenssen, F Cornacchia, *et al.*. Temperature-dependent stimulated emission cross section in Nd³⁺:YVO₄ crystals [J]. J Opt Soc Am B, 2009, 26(11): 2084-2088.