

文章编号: 0258-7025(2009)07-1679-07

# 全固态激光直接抽运技术的发展和研究现状

何坤娜<sup>1,2</sup> 魏志义<sup>1</sup> 张治国<sup>1</sup> 高春清<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100190; <sup>2</sup> 北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要** 如何有效地减少抽运过程和激光发射过程中激光介质内产生的热量,是全固态高功率激光研究过程中所面临的主要难题之一。与传统波长的抽运方式相比,采用长波长的直接抽运技术不但可使激光介质中产生的热量减少 30%~50%,而且还可显著改善激光的输出特性。以最常用的 Nd<sup>3+</sup> 激光器的研究作为切入点,简述了直接抽运技术的研究发展,介绍了直接抽运技术相对于传统抽运技术的优缺点以及目前的研究现状,最后对未来的发展前景作了初步分析和展望。

**关键词** 全固态激光技术;直接抽运;四能级激光运转;准三能级激光运转

中图分类号 TN245 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1679

## Overview on Laser Diode Pumped Solid-State Laser with Direct Pumping Scheme

He Kunna<sup>1,2</sup> Wei Zhiyi<sup>1</sup> Zhang Zhiguo<sup>1</sup> Gao Chunqing<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)  
(<sup>2</sup>School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** It is one of the most important questions to reduce the thermal effect and accumulation in the laser medium effectively, by pumping and lasing in the research of laser diode pump solid-state laser (DPSSL) at high power laser level. Compared with the conventional pumping scheme, direct pumping scheme at longer wavelength will not only reduce the heat by 30%~50%, but also improve the laser performances significantly. The development and status of direct pumping DPSSL based on the research of the Nd<sup>3+</sup> doping laser are reviewed, the characteristics of the new pumping scheme and the progresses on Nd doping lasers are introduced. Finally, the new development in the future is prospected.

**Key words** all-solid-state laser technique; direct pumping scheme; four-level laser operation; quasi-three-level laser operation

## 1 引 言

高功率全固态激光器的研究是近十多年来激光科学技术最重要的发展方向之一,已在工业加工、医疗、科研及国防等领域取得重要应用。但是,在高功率抽运情况下,激光介质中严重的热效应不但会使激光光束质量和输出功率下降,甚至会使激光介质发生破坏和断裂,随着抽运功率和输出功率的不断

提高,这一问题也相应变得越来越严重。因此,在高功率激光器研究中,人们所面临的一个主要难题就是如何减少抽运过程和激光发射过程中激光介质内产生的热积累和热效应问题<sup>[1~3]</sup>。虽然导致激光介质中产生热的原因很多,但一个主要的原因是所谓的量子亏损(斯托克斯频移)发热,即抽运带与激光上能级之间的光子能差以热的方式散逸到基质晶格

收稿日期: 2009-03-31; 收到修改稿日期: 2009-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(60608003, 60878015)和国家 973 计划(2007CB815104)资助课题。

作者简介: 何坤娜(1976—),女,讲师,博士研究生,主要从事新型激光器件与技术等方面的研究。

E-mail: hekunna@aphy. iphy. ac. cn

导师简介: 魏志义(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事超短超强脉冲激光技术、激光频率变换及新型全固态激光器等方面的研究。E-mail: zywei@aphy. iphy. ac. cn(通信联系人)

中造成的发热。通过采用一端或两端未掺杂的基质材料组成的复合棒、设计热不灵敏腔等措施,在一定程度上可以控制热效应的影响,但是并不能从根本上降低激光介质中产生的热量。降低激光介质中产生热量的一种有效方法是降低激光发射量子亏损率,与传统的抽运方式相比,采用直接抽运方式可以较好地做到这一点。

本文针对全固态激光器中的热问题,综述介绍了直接抽运技术的研究进展,并结合我们最近的研究工作概述了该技术的研究现状及相对传统抽运技术的优缺点,最后对进一步的发展作了初步展望。

## 2 直接抽运技术及其发展过程

直接抽运的概念可以通过全固态激光器中最重要的、也最常见的 Nd:YAG 激光器的工作过程来加以解释和说明,该激光器中激活离子  $\text{Nd}^{3+}$  的抽运跃迁如图 1 所示<sup>[4]</sup>。在采用激光二极管(LD)抽运的全固态激光器中,通常采用的抽运方式是将  $\text{Nd}^{3+}$  激发到抽运上能级  $^4F_{5/2}$ ,所用的抽运波长在 808 nm 附近。直接抽运技术是通过选择合适的抽运波长将  $\text{Nd}^{3+}$  直接抽运到激光上能级(跃迁能级)的一种抽运方式<sup>[5]</sup>,该抽运方式又被细分为两种:基态直接抽运和基态热助推抽运。所谓基态直接抽运就是将基态上最低斯塔克能级( $Z_1$ )上的粒子直接抽运到激光上能级  $^4F_{3/2}$ ,而不先抽运到能级  $^4F_{5/2}$ ,再无辐射跃迁到能级  $^4F_{3/2}$ ;基态热助推抽运是把基态上热激励的斯塔克能级( $Z_2$  或  $Z_3$  等)上的粒子直接抽运到激光上能级  $^4F_{3/2}$ 。对于 Nd:YAG 激光晶体,采用基态直接抽运和基态热助推抽运方式进行抽运时,通常采用的抽运波长分别为 869 nm 和 885 nm。与

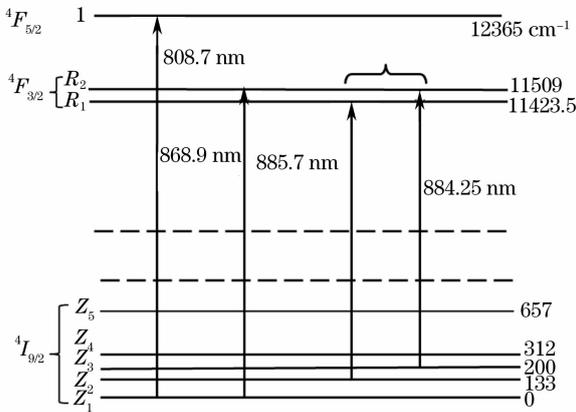


图 1 Nd:YAG 晶体中激活离子  $\text{Nd}^{3+}$  的抽运跃迁能级图

Fig. 1 Transition energy level diagram of  $\text{Nd}^{3+}$  in the Nd:YAG crystal

传统抽运方式相比,采用直接抽运方式时,激光介质中产生的热量可减少 30%~50%,这样量级的热量减少对高功率激光器的研制有非常重要的意义。同时,随着高效大功率 LD 制备工艺和生产技术逐渐成熟,人们已成功制造出适用于直接抽运所需波长的高功率抽运源。因此,直接抽运技术已成为实用的方案而引起了人们的广泛关注。

实际上,在激光研究的早期,人们已通过实验证实了直接抽运方式下  $\text{Nd}^{3+}$  激光器的有效运转。1962 年,R. Newman<sup>[6]</sup>提出了激光二极管抽运全固态激光器的构想并利用 GaAs 激光二极管发出的 870 nm 附近的辐射将 Nd:CaWO<sub>4</sub> 中  $\text{Nd}^{3+}$  直接抽运到激光上能级,实现了 1.06  $\mu\text{m}$  的荧光输出。1968 年,M. Ross<sup>[7]</sup>首次实现了激光二极管抽运全固态 Nd:YAG 激光器的运转,采用 867 nm 的抽运波长将  $\text{Nd}^{3+}$  离子直接激发到激光上能级。但当时采用的抽运波长并不是从优化激光输出特性的角度作出的选择,而是由可用的激光二极管抽运波长决定的。因为当时激光二极管的性能还很差,作为固体激光器的抽运源还很不成熟,加上当时主要利用掺杂原子数分数为 1%左右的 Nd:YAG 晶体进行实验,该晶体虽然在 790~820 nm 之间有很宽的吸收带,但在 870 nm 附近的吸收带宽很窄(约 1 nm),并且吸收系数非常低( $4\text{ cm}^{-1}$ )<sup>[8]</sup>,所以实验结果并不理想,获得的脉冲能量和平均输出功率都比较低。随着半导体激光技术的发展,808 nm 波长附近的激光二极管首先取得快速突破,功率也不断提高。此外,由于  $\text{Nd}^{3+}$  离子在 808 nm 附近具有很高的吸收系数(约  $14\text{ cm}^{-1}$ )<sup>[9]</sup>,因此,工作在该波长的激光二极管自然就成了全固态激光首选的抽运光源,采用该波长的抽运方式也就成了目前的主流抽运方式,即传统的抽运方式。

## 3 直接抽运技术对激光输出特性的影响

掺  $\text{Nd}^{3+}$  的激光晶体中的  $\text{Nd}^{3+}$  跃迁时,常见谱线主要有 3 条。以 Nd:YAG 为例,波长分别为 1064 nm,1342 nm 和 946 nm。其中,前两种波长是激光器实现四能级运转时输出的激光波长,后一种波长是激光器实现准三能级运转时输出的激光波长。

$\text{Nd}^{3+}$  激光器实现四能级运转时,沉积在晶体中的热占晶体吸收抽运光的比率  $\eta_{h-4}$  可表示为<sup>[10]</sup>

$$\eta_{h-4} = 1 - \eta_p \eta_{\text{qd}}^{(l)} - (1 - \eta_p) \eta_p \eta_{\text{qd}}^{(l)} \eta_{\text{qe}}, \quad (1)$$

其中  $\eta_p$  为抽运效率,  $\eta_l$  为激光发射效率,  $\eta_{\text{qd}}^{(l)}$  为激

光发射量子亏损(斯托克斯频移)率,  $\eta_{\text{qd}}^{(l)} = \frac{\lambda_p}{\lambda_l}$ ,  $\lambda_p$  和  $\lambda_l$  分别是抽运光波长和振荡激光波长,  $\eta_{\text{qd}}^{(f)}$  为荧光发射的量子亏损(斯托克斯频移)率,  $\eta_{\text{qe}}$  为量子发射效率。由于准三能级运转相对于四能级运转存在重吸收损耗问题,因此,激光器实现准三能级运转时,沉积在晶体中的热占晶体吸收抽运光的比率  $\eta_{h-3}$  与  $\eta_{h-4}$  不同,通过对(1)式修正可得到  $\eta_{h-3}$  [4]

$$\eta_{h-3} = 1 - \eta_p \eta_{\text{qd}}^{(l)} (1 - \gamma f^{(l)}) - (1 - \eta_l) \eta_p \eta_{\text{qd}}^{(f)} \eta_{\text{qe}} [1 - \gamma f^{(f)}], \quad (2)$$

其中,  $[1 - \gamma f^{(f)}]$  为考虑重吸收后引入的修正项,  $\gamma$  为修正因子。  $f^{(l)}$  为激光重吸收损耗所占的比率,  $f^{(f)}$  为荧光重吸收损耗所占的比例。对四能级激光运转而言,在理想条件下(假定激光发射效率  $\eta_l$  和激光抽运效率  $\eta_p$  均为 1),  $\eta_{h-4}$  可近似表示为

$$\eta_{h-4} \approx 1 - \eta_{\text{qd}}^{(l)}, \quad (3)$$

与传统的常规抽运方式相比,采用基态直接抽运方式实现 Nd:YAG 激光器四能级激光运转(输出 1.06  $\mu\text{m}$  波长的激光)时,激光发射的量子亏损率  $\eta_{\text{qd}}^{(l)}$  由 0.76 增加到 0.82,而由(3)式可知,热沉积率可以减少 29% 左右,这一点已通过实验得到证实 [11,12];对准三能级激光运转而言,由于输出激光的波长变短,  $\eta_{\text{qd}}^{(l)}$  由 0.85 增加到 0.92,因此,采用直接抽运方式时,  $\eta_{h-3}$  会有更大程度的改善,估计可减少 50% 左右。

在改善热沉积比率的同时,一些描述激光器性能的重要物理量也会有明显改变 [4]

$$P_{\text{th}}^{(\text{ab})} \propto \frac{1}{\eta_{\text{qd}}^{(l)} \eta_{\text{qe}}} T + L - L_r^{\text{th}},$$

$$\eta_{\text{sl}}^{(\text{ab})} \propto \eta_{\text{qd}}^{(l)} \times \frac{T}{T + L + L_r}, \quad (4)$$

式中  $\eta_{\text{sl}}^{(\text{ab})}$  为相对于吸收抽运功率的斜率效率,  $P_{\text{th}}^{(\text{ab})}$  为相对于吸收抽运功率的激光阈值,  $T$  为输出镜的透过率,  $L$  为腔内往返损耗,  $L_r$  为重吸收损耗值,  $L_r^{\text{th}}$  为阈值时的重吸收损耗值,对于四能级系统,由于不存在重吸收损耗问题,因此  $L_r = 0$ 。

以四能级激光运转系统为例,当两束不同波长的激光 ( $\lambda_1, \lambda_2$ ) 抽运时,假定抽运光被完全吸收,而且其他实验条件完全相同,根据(4)式,相对于吸收功率的斜率效率的比值可表示为

$$\frac{\eta_{\text{sl}}^{(\text{ab})}(\lambda_1)}{\eta_{\text{sl}}^{(\text{ab})}(\lambda_2)} = \frac{\eta_{\text{qd}}(\lambda_1)}{\eta_{\text{qd}}(\lambda_2)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \quad (5)$$

相对于吸收功率的激光阈值可表示为

$$\frac{P_{\text{th}}^{(\text{ab})}(\lambda_1)}{P_{\text{th}}^{(\text{ab})}(\lambda_2)} = \frac{\eta_{\text{qe}}(\lambda_2) \eta_{\text{qd}}(\lambda_2)}{\eta_{\text{qe}}(\lambda_1) \eta_{\text{qd}}(\lambda_1)} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\eta_{\text{qe}}(\lambda_1)}{\eta_{\text{qe}}(\lambda_2)}, \quad (6)$$

以 Nd:YAG 激光器运转为例,假定量子效率为 1,由(5)式和(6)式计算可知,相对于传统抽运方式而言,采用基态直接抽运方式时,获得的相对于吸收抽运功率的斜率效率将增加 8%,而阈值降低 7%。

对于准三能级激光系统,由于存在重吸收损耗问题,因此分析起来要复杂一些,这里不再赘述。

## 4 直接抽运技术用于 Nd<sup>3+</sup> 激光器连续运转的研究概况

自从直接抽运技术再次引发人们的广泛关注以来,到目前为止有关采用直接抽运方式实现 Nd<sup>3+</sup> 激光器运转的报道已有很多,大量实验结果证实直接抽运方式可用于研制高效的 Nd<sup>3+</sup> 激光器。

### 4.1 1 $\mu\text{m}$ 激光发射

激光技术发展初期,人们在实验研究中用到的激光介质通常为掺杂浓度较低的 Nd:YAG 单晶。由于 Nd:YAG 的分凝系数较低 ( $\approx 0.18$ ),因此,采用传统提拉法生长的高质量 Nd:YAG 单晶中 Nd<sup>3+</sup> 的掺杂原子数分数通常较低,约为 1%。随着晶体生长技术的进步,人们已经能生长出高质量的高掺杂浓度的 Nd:YAG 晶体(掺杂原子数分数高达 3.5%)和 Nd:YAG 陶瓷(掺杂原子数分数高达 9%)。目前,人们不但利用钛宝石激光器和二极管激光器抽运掺杂浓度较低的 Nd:YAG 单晶 [5,8,13,14] 实现了直接抽运方式下 1  $\mu\text{m}$  激光的运转,而且还实现了高掺杂浓度的 Nd:YAG 单晶 [15,16] 和 Nd:YAG 陶瓷 [16~18] 在直接抽运方式下 1  $\mu\text{m}$  激光的有效运转。

利用低掺杂原子数分数的(约为 1%)Nd:YAG 晶体,采用二极管激光器和钛宝石激光器抽运时,人们获得的相对于吸收抽运功率的斜率效率分别达到 77% [13] 和 79% [14],而 79% 的斜率效率也是目前为止连续 Nd:YAG 激光器中所获得的最高斜率效率。2006 年, M. Frede 等 [19] 利用波长为 885 nm 的激光二极管抽运掺杂原子数分数约为 1% 的 Nd:YAG 单晶时,获得了高达 250 W 的 1064 nm 激光输出。最近(2008 年)为了进一步降低量子亏损率, S. Goldring 等 [20] 首次利用波长为 946 nm 的钛宝石激光器抽运掺杂原子数分数为 1% 的 Nd:YAG 晶体,实现了 1064 nm 波长的激光输出,获得的斜率效率约为 40%。高掺杂浓度的 Nd:YAG 晶体和 Nd:YAG 陶瓷在直接抽运方式下表现出了类似的光谱特性和激光特性 [16,17]。与传统抽运方式相比,采用 885 nm 直接抽运方式抽运高掺杂浓度的 Nd:YAG 时,获得的相对

于吸收抽运功率的阈值和斜率效率改善了9%~14%，这与前面的分析一致。但随着掺杂浓度的增加，由于谐振腔中光损耗的增加，获得的相对于吸收抽运功率的斜率效率减小，而相对于吸收抽运功率的阈值增加了。例如，利用钛宝石激光器抽运掺杂原子数分数分别为2.4%和3.5%的Nd:YAG时，获得的相对于吸收抽运功率的斜率效率分别为62%和49%，而相对于吸收抽运功率的阈值分别为0.87 W和0.98 W<sup>[17]</sup>。目前，利用钛宝石激光器和二极管激光器抽运高掺杂浓度的Nd:YAG晶体时，获得的最高斜率效率分别为50%和62%<sup>[16]</sup>。

除Nd:YAG激光晶体外，Nd:YVO<sub>4</sub>，Nd:GdVO<sub>4</sub>，Nd:GdCOB，Nd:Al<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>和Nd:LaB<sub>3</sub>O<sub>6</sub>等多种晶体也已被用于直接抽运实验中。其中，Nd:YVO<sub>4</sub>和Nd:GdVO<sub>4</sub>等硫酸盐晶体非常有潜力成为构建高质量固态激光器的候选材料。Nd:YVO<sub>4</sub>晶体在879.8 nm处的吸收横截面约为44×10<sup>-20</sup> cm<sup>2</sup>（大约为Nd:YAG晶体在885 nm处吸收横截面的35倍），吸收系数约为36.1 cm<sup>-1</sup>（大约为Nd:YAG晶体在885 nm处吸收系数(1.8 cm<sup>-1</sup>)的21倍），且其在1064 nm的有效发射横截面和荧光寿命的乘积也小于Nd:YAG晶体。因此，与Nd:YAG晶体相

比，硫酸盐家族的晶体似乎更适合用于直接抽运方式运转。事实上，Nd:YVO<sub>4</sub>晶体也表现出了与Nd:YAG相似的激光特性。波长878.6 nm的钛宝石激光器抽运掺杂原子数分数分别为1%，2%和3%的未镀膜Nd:YVO<sub>4</sub>晶体时<sup>[21,22]</sup>，在未对谐振腔进行优化的情况下，获得的相对于吸收抽运功率的斜率效率分别为70%，67%和58%；传统808 nm波长抽运掺杂原子数分数为1%的Nd:YVO<sub>4</sub>时，获得的相对于吸收抽运功率的斜率效率平均降低了大约10%，光束质量因子也增大了百分之几，而且，由于严重的热效应，利用掺杂原子数分数分别为2%和3%的未镀膜Nd:YVO<sub>4</sub>晶体进行实验时，只在阈值附近观察到了激光输出。2003年，V. Lupei等<sup>[23,24]</sup>采用880 nm的钛宝石激光器抽运掺杂原子数分数为1%的Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体时，获得的相对于入射抽运功率的斜率效率均为80%左右，而80.3%的斜率效率是波长1 μm附近的Nd<sup>3+</sup>激光器中获得的最高斜率效率。采用光纤直径为800 μm，数值孔径为0.15的880 nm二极管激光器抽运掺杂原子数分数为1%的Nd:YVO<sub>4</sub>晶体时，由于模式匹配问题，获得的相对于吸收抽运功率的斜率效率较低，约为75%<sup>[25]</sup>，如表1所示。

表1 直接抽运方式下不同激光器实现四能级激光运转时的实验结果

Table 1 Results obtained with different lasers operating on the four-level transition under direct pumping

Reference	Laser medium	Pump source, Pump wavelength/nm	Laser wavelength /μm	Maximum output power/W	Slope efficiency for absorbed pump power/%	Optical efficiency/%
[13]	Nd:YAG 1.1%	LD,885	1.06	14	77	53
[14]	Nd:YAG 1%	Ti,885	1.06		79	
[16]	Nd:YAG 2.4%	Ti,885	1.06		50	
[17]	Nd:YAG 3.5%	LD,885	1.06		49	
	Nd:YAG 2.4%				62	
[19]	Nd:YAG 1%	LD,885	1.06	250	76	57
[20]	Nd:YAG 1%	Ti,946	1.06	0.03	40	
[21],[22]	Nd:YAG 1%	Ti,878.6	1.06		70	
[23],[24]	Nd:YAG 1%	Ti,879	1.06		80	
[25]	Nd:YAG 1%	LD,880	1.06		75	

我们在直接抽运方面也开展了一些研究工作。利用调谐范围在 700~920 nm 的连续钛宝石激光器和波长为 808 nm 的二极管激光器共同抽运掺杂原子数分数为 0.5% 的 6 mm 长 Nd:CNGG 晶体, 成功实现了波长为 1061 nm 的连续激光运转。实验装置见图 2。抽运波长为 882 nm, 获得的 20.8% 的斜率效率大于传统 808 nm 波长抽运时获得的 10.5% 的斜率效率<sup>[26]</sup>。另外, 同样以可调谐连续钛宝石激光

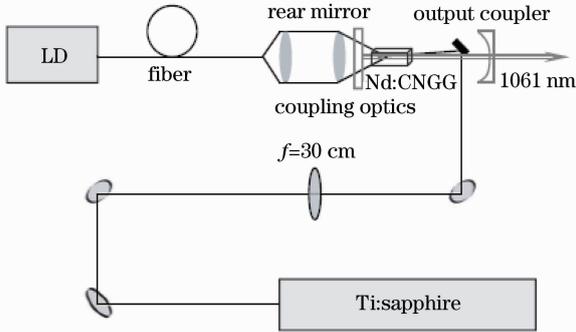


图 2 波长为 1061 nm 的 Nd:CNGG 激光器的实验装置

Fig. 2 Experimental setup of the 1061 nm Nd:CNGG laser

器作为抽运源, 我们还研究了纯 Nd:YAG 棒和两端键合的 Nd:YAG 棒在直接抽运方式下运转时的激光特性。实现四能级运转(1064 nm)时, 纯 Nd:YAG 棒和两端键合的 Nd:YAG 棒表现出相似的激光特性, 且微小的抽运光波长的改变会导致激光斜率效率有明显变化。其中, 抽运纯 Nd:YAG 棒时, 抽运波长为

868.3 nm, 875.2 nm, 883.8 nm 和 885.5 nm 的情况下, 获得的斜率效率分别为 52.9%, 27.7%, 40.2% 和 43.2%, 激光阈值分别为 274 mW, 589 mW, 391 mW 和 402 mW<sup>[27]</sup>。

#### 4.2 准三能级激光发射

目前, 人们利用钛宝石激光器<sup>[28, 4]</sup> 和二极管激光器作为抽运源, 也分别实现了 Nd<sup>3+</sup> 激光器的准三能级运转。但是, 由于运转于准三能级的 Nd<sup>3+</sup> 激光器具有较小的受激发射截面和较严重的重吸收损耗, 因此, 与 Nd<sup>3+</sup> 激光器的四能级激光运转相比, 实现起来要困难得多, 所以, 有关实现 Nd<sup>3+</sup> 激光器的准三能级激光运转的报道较少, 且主要集中于 Nd:YAG 激光器的准三能级激光运转。其中 2002 年 V. Lupei 等<sup>[28]</sup> 利用钛宝石激光器(885 nm)抽运掺杂原子数分数为 1% 的 3 mm 长 Nd:YAG 晶体获得了 68% 的斜率效率, 该效率是目前为止 946 nm 连续激光运转时获得的最高斜率效率。2005~2006 年, S. Bjurshdgen 等<sup>[9, 29, 30]</sup> 首次采用波长为 869 nm 和 885 nm 的二极管激光器为抽运源, 实现了 Nd:YAG 激光器的准三能级激光运转, 获得的斜率效率分别为 24% 和 49%。最近, N. Pavel 等<sup>[31]</sup> 利用光纤直径 600  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.22, 最大输出功率为 30 W, 波长为 879 nm 的二极管激光器作为抽运源, 采用多通抽运薄片结构, 分别实现了 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 两种微片激光器的准三能级运转, 获得的相对于入射抽运功率的斜率效率分别为 9% 和 12%, 如表 2 所示。

表 2 直接抽运方式下不同激光器实现准三能级激光运转时的实验结果

Table 2 Results obtained with different lasers operating on the quasi-three-level transition under direct pumping

Reference	Laser medium	Pump source, Pump wavelength/nm	Laser wavelength/ $\mu\text{m}$	Maximum output power/W	Slope efficiency/%	Optical efficiency/%
[28]	Nd:YAG	Ti, 885	0.946	0.18	$\eta_a = 68$	
[29]	Nd:YAG	LD, 869	0.946	1.6	$\eta_a = 24$	
[30]	Nd:YAG	LD, 885	0.946	1	$\eta_a = 49$	25
[31]	Nd:YVO <sub>4</sub>	LD, 880	0.914	1.7	$\eta_s = 9$	6
	Nd:GdVO <sub>4</sub>	LD, 879	0.912	1.8	$\eta_s = 12$	6

Notes:  $\eta_s$  denotes slope efficiency for incident pump power;  $\eta_a$  denotes slope efficiency for absorbed pump power

在基频连续运转的基础上, 人们还采用直接抽运技术进行了许多关于倍频<sup>[14, 31, 32]</sup> 和脉冲<sup>[17]</sup> 激光输出的实验研究。

#### 5 直接抽运技术的缺点及改进方法

与传统抽运方式相比, 采用直接抽运方式不但可以减弱激光介质中热量的产生, 还能明显改善某

些激光特性。但是, 由于与传统抽运波长相比, 激光介质对直接抽运波长的吸收系数明显降低。例如: 掺杂原子数分数为 1.1% 的 Nd:YAG 晶体对 808 nm, 869 nm 和 885 nm 激光的最大吸收系数分别为 11  $\text{cm}^{-1}$ , 3.5  $\text{cm}^{-1}$  和 1.8  $\text{cm}^{-1}$ ; 掺杂原子数分数为 1% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体对 808 nm, 880 nm 抽运光的最大吸收系数分别为 74.5  $\text{cm}^{-1}$  和 55.5  $\text{cm}^{-1}$ ;

掺杂原子数分数为 1% 的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体对 808 nm, 880 nm 抽运光的最大吸收系数分别为 31.3 cm<sup>-1</sup> 和 22.2 cm<sup>-1</sup>。

$$P_{\text{th}}^{(\text{in})} \propto \frac{1}{\eta_a \eta_{\text{qd}}^{(\text{I})} \eta_{\text{qe}}} \times (T + L + L_r^{\text{th}});$$

$$\eta_{\text{sl}}^{(\text{in})} \propto \eta_a \eta_{\text{qd}}^{(\text{I})} \times \frac{T}{T + L + L_r}, \quad (7)$$

其中,  $P_{\text{th}}^{(\text{in})}$  和  $\eta_{\text{sl}}^{(\text{in})}$  分别为相对于入射抽运功率的激光阈值和斜率效率<sup>[4]</sup>, 由(7)式可知, 低吸收效率不利于获得相对于入射抽运功率的低激光阈值和高斜率效率值。

$$\eta_a = 1 - \exp(-2\sigma_p N_0 f_l l) = 1 - \exp(-\alpha l), \quad (8)$$

其中  $\sigma_p$  为对抽运光的受激吸收截面,  $N_0$  为 Nd<sup>3+</sup> 的掺杂浓度,  $f_l$  为激光下能级的热布居系数,  $\alpha$  为介质的吸收系数且  $\alpha = N_0 \sigma_p f_l$ ,  $l$  为晶体的长度。为了获得尽量好的相对于入射抽运功率的激光参数值, 实验中主要采用了如下几种方法:

1) 利用掺杂浓度高且较长的激光介质。掺杂原子数分数分别为 1% 和 8% 的 Nd:YAG 陶瓷在 885 nm 附近处的吸收带宽分别为 2.5 nm 和 3.2 nm, 吸收系数分别为 1.7 cm<sup>-1</sup> 和 13~14 cm<sup>-1</sup>。由(8)式可知, 增加浓度有助于吸收效率  $\eta_a$  的增大, 但随着浓度的增加, 由于能量转换浓度淬灭效应, 激光的发射量子效率  $\eta_{\text{qe}}$  也会随之降低, 由公式(7)结合参考文献[15]中图 1 可知, 对于四能级激光运转而言, 为了获得尽量好的相对于入射抽运功率的激光参数值, 当晶体长度一定时, 并不是浓度越大越好, 应从优值系数  $\eta_a \eta_{\text{qe}}$  入手进行考虑; 对准三能级激光系统而言, 由于存在重吸收损耗(与浓度和长度有关), 则需借助优值系数  $\eta_a \eta_{\text{qe}} (1 + \epsilon)^{-1}$  对晶体的浓度进行优化选择, 其中  $\epsilon = L_r^{\text{th}} (T + L)^{-1}$  [33]。另外, 对于四能级激光运转而言, 增加长度固然可以增加激光介质吸收的抽运光能量, 但也会增加介质内部的损耗; 对于准三能级激光运转而言, 由于存在重吸收损耗, 问题也会变得更加复杂。因此, 在选择激光晶体时, 应针对具体情况, 根据(7)式和(8)式对晶体的浓度和长度进行优化选择。

2) 采用多通抽运的薄片激光器结构。该方法不但可大大增加激光晶体对抽运光的吸收, 而且还可避免因采用长的激光晶体而带来严重的重吸收损耗问题。因此, 该方法对于运转于准三能级的激光器尤其有利。以 Nd:YAG 激光器的准三能级运转为例, 理论计算表明: 与抽运光单次通过激光晶体(吸收效率 63.9%)相比, 4 次通过时, 抽运吸收效率可以增加 18%, 达到 82%, 而 32 次通过时, 则可增加

到 96%, 增加 50% [33]。2007 年, N. Pavel 等<sup>[31]</sup> 利用最大输出功率均为 30 W 的 808 nm 和 879 nm 二极管激光器作为抽运源, 采用使抽运光经过激光介质 16 次的谐振腔, 首次实现了 1.06 μm, 912 nm 和 914 nm 的薄片 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的运转。

3) 提高激光介质的温度。激光介质温度的增加会使基态的斯塔克分裂子能级上的粒子布居增加, 从而使得吸收截面增加。2008 年, S. Golding 等<sup>[34]</sup> 测得了不同温度下 Nd:YAG 晶体的吸收系数, 实验结果表明: 随着 Nd:YAG 晶体温度的增加, 晶体的吸收能力增强, 温度 180 °C 的 Nd:YAG 晶体的吸收系数大约是 20 °C 时吸收系数的 3 倍。

## 6 现状及展望

到目前为止, 采用直接抽运方式的实验研究中多采用钛宝石激光器和低功率二极管激光器作为抽运源, 采用大功率激光二极管抽运源的报道并不多, 这可能与激光介质对采用直接抽运方式时对抽运波长的需求有关, 不同掺 Nd<sup>3+</sup> 的激光介质一般需要不同的直接抽运波长, 在目前的激光二极管技术下, 并不是每个波长的激光二极管都能提供大的功率。此外, 激光二极管抽运源的价格目前还比较昂贵, 所以, 专门为某种激光介质购置价格昂贵但通用性能可能并不高的高功率二极管激光器来进行实验研究是研究人员需要现实考虑的问题。另外, 由于实验过程中所用的一些二极管激光器的特性参数(亮度、线宽、光束质量)有限, 所以, 采用钛宝石激光器抽运时获得的实验结果通常优于采用二极管激光器抽运源时获得的实验结果。

与传统抽运技术相比, 采用直接抽运方式时, 激光介质较低的吸收系数虽不利于抽运能量的利用和获得高功率激光输出, 但可使抽运光在激光晶体中分布得更加均匀。同时, 较低的吸收系数可以通过优选晶体掺杂浓度或长度、合理设计谐振腔、采用多通抽运结构的薄片激光器以及提高晶体温度等措施在一定程度上进行弥补。

总之, 直接抽运技术是非常有发展前途的一种抽运方式。随着激光二极管技术发展和广泛应用, 通过选择更高质量的激光二极管(窄线宽)、采用参数(掺杂浓度、长度等)优化的激光介质、合理设计激光腔、更有效地提高激光介质对直接抽运波长的吸收效率等措施, 直接抽运技术在改善激光器性能方面的优势必定会得到充分发挥。

**致谢:**作者曾就文章内容与冯宝华教授、李德华老师等进行过深入的探讨,同时,李奇楠、许长文、张永东等博士也在该文成文过程中提出了宝贵的意见,在此对这些老师和同学表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser and its thermal effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 497~501
- 邵杰,李小莉,冯宇彤等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器及其热效应[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 497~501
- Shi Peng, Li Jinping, Li Long *et al.*. Influence of pump light distribution on thermal effects within Nd:YAG microchip laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 643~646
- 史彭,李金平,李隆等. 抽运光分布对 Nd:YAG 微片激光器热效应的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 643~646
- Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Study on thermal lens of Nd<sup>3+</sup>:YAG laser pumped by a laser diode[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(9): 777~781
- 张行愚,赵圣之,王青圃等. 激光二极管抽运的激光器热透镜效应研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9): 777~781
- V. Lupei, G. Aka, D. Vivien. Quasi-three-level 946 nm CW laser emission of Nd:YAG under direct pumping at 885 nm into the emitting level[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **204**: 399~405
- R. Lavi, S. Jackel, Y. Tzuk *et al.*. Efficient pumping scheme for neodymium-doped materials by direct excitation of the upper lasing level[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(36): 7382~7385
- R. Newman. Excitation of the Nd<sup>3+</sup> fluorescence in CaWO<sub>4</sub> by recombination radiation in GaAs [J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**:437
- M. Ross. YAG laser operation by semiconductor laser pumping [J]. *Proc. IEEE*, 1968, **56**: 196~197
- R. Lavi, S. Jackel. Thermally boosted pumping of neodymium lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(18): 3093~3098
- S. Bjurshagen, R. Koch, F. Laurell. Quasi-three-level Nd:YAG laser under diode pumping directly into the emitting level [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **261**(1): 109~113
- T. Y. Fan. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(6): 1457~1459
- S. Goldring, R. Lavi, A. Tal *et al.*. Characterization of radiative and nonradiative processes in Nd:YAG lasers by comparing direct and band pumping [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(4): 384~389
- Ichiro Shoji, Takunori Taira, Akio Ikesue. Thermally-induced-birefringence effects of highly Nd<sup>3+</sup>-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramic lasers[J]. *Opt. Mater.*, 2007, **29**(10): 1271~1276
- R. Lavi, S. Jackel, A. Tal *et al.*. 885 nm high-power diodes end-pumped Nd:YAG laser[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **195**(5-6): 427~430
- V. Lupei, N. Pavel, T. Taira. Basic enhancement of the overall optical efficiency of intracavity frequency-doubling devices for the 1 μm continuous-wave Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> laser emission[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(18): 3653~3655
- V. Lupei, N. Pavel, T. Taira. Laser emission in highly doped Nd:YAG crystals under <sup>4</sup>F<sub>5/2</sub> and <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> pumping[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1678~1680
- V. Lupei, A. Lupei, N. Pavel *et al.*. Comparative investigation of spectroscopic and laser emission characteristics under direct 885 nm pump of concentrated Nd:YAG ceramics and crystals[J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **73**(7): 757~762
- V. Lupei, N. Pavel, T. Taira. 1064 nm laser emission of highly doped Nd:yttrium aluminum garnet under 885 nm diode laser pumping[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(23): 4309~4311
- V. Lupei, A. Lupei, N. Pavel *et al.*. Laser emission under resonant pump in the emitting level of concentrated Nd:YAG ceramics[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(5): 590~592
- M. Frede, R. Wilhelm, D. Kracht. 250 W end-pumped Nd:YAG laser with direct pumping into the upper laser level[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(24): 3618~3619
- S. Goldring, R. Lavi. Direct pumping of Nd:YAG at 946 nm [C]. *CLEO/Europe and IQEC 2007 Conference Digest*, 2007, paper CA\_28
- V. Lupei, N. Pavel, T. Taira. Efficient laser emission in concentrated Nd laser materials under pumping into the emitting level[J]. *Quantum Electron. Lett.*, 2002, **38**(3): 240~245
- V. Lupei, N. Pavel, T. Taira. Highly efficient laser emission in concentrated Nd:YVO<sub>4</sub> components under direct pumping into the emitting level[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **201**(4-6): 431~435
- V. Lupei, N. Pavel, Y. Sato *et al.*. Highly efficient 1063-nm continuous-wave laser emission in Nd:GdVO<sub>4</sub> [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(23): 2366~2368
- Y. Sato, N. Pavel, T. Taira. Comparative study of Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YVO<sub>4</sub>: laser oscillation under 808-nm and 879-nm pumping[C]. *CLEO and IQEC 2004 Conference Digest*, 2004, paper CTbJ7
- Y. Sato, T. Taira, N. Pavel *et al.*. Laser operation with near quantum-defect slope efficiency in Nd:YVO<sub>4</sub> under direct pumping into the emitting level[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(6): 844~846
- Cao Ning, Li Qinan, Zhao Yanying *et al.*. Efficient pumping scheme by direct excitation of upper laser level in Nd:CNGG[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(11): 4016~4018
- Xu Changwen, Wei Zhiyi, He Kunna *et al.*. Nd:YAG lasers operating at 1064 nm and 946 nm by direct pumping and thermally boosted pumping[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(1): 014213
- V. Lupei, N. Pavel, T. Taira. Highly efficient continuous-wave 946-nm Nd:YAG laser emission under direct 885-nm pumping[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(15): 2677~2679
- Bjurshagen, S. Laurell, F. Koch *et al.*. 946-nm Nd:YAG laser under ground-state direct diode-pumping at 869 nm [C]. *CLEO 2005 Conference Digest*, 2005, paper CMS4
- N. Pavel, V. Lupei, J. Saikawa *et al.*. Neodymium concentration dependence of 0.94-, 1.06- and 1.34-μm laser emission and of heating effects under 809- and 885-nm diode laser pumping of Nd:YAG [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **82**(4): 599~605
- N. Pavel, K. Lünstedt, K. Petermann *et al.*. Multipass pumped Nd-based thin-disk lasers: continuous-wave laser operation at 1.06 and 0.9 μm with intracavity frequency doubling[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(34): 8256~8263
- V. Lupei, G. Aka, D. Vivien. Enhanced fundamental and self-frequency-doubling laser emission efficiency in <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> directly pumped Nd-activated nonlinear crystals: The case of GdCaO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(5): 811~813
- V. Lupei. Efficiency enhancement and power scaling of Nd lasers [J]. *Opt. Mater.*, 2003, **24**(1-2): 353~368
- Sharone Goldring, Raphael Lavi. Nd:YAG laser pumped at 946 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(7): 669~671