

DPSS激光器

# VHG 稳波二极管泵浦 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光器的最新进展

文中讨论了光纤耦合波长锁定的二极管在Nd : YVO<sub>4</sub>高能级泵浦与优化方面的优势，并给出实施基于VBG的解决方案时，在成本、功率、效率和动态范围方面的系统级权衡。

文/Kirk Price, Michael Atchley, Rob Martinsen; nLight公司

工业用二极管泵浦固态(DPSS)激光系统正在快速发展，以满足市场对其输出功率、接近衍射极限的光束质量和线偏振输出等方面不断提升的需求。输出功率的提升有助于提高加工产量，并且也在微加工、材料加工、光谱学、晶圆检测、激光显示和医疗诊断等领域实现了很多新应用。优异的光束质量和线偏振输出，可实现高效的二次和三次谐波产生。

传统上，工业用DPSS激光器的主力是用808nm二极管泵浦的Nd : YAG激光器，其具有大吸收截面、宽吸收线宽、晶体热性能良好等优势。然而由于808nm泵浦光和1064nm输出光之间存在较高的量子数亏损，导致了热透镜效应以及相应较差的空间光束质量，从而使得该系统的性能受到了限制。此外，YAG晶体的各向同性特性会导致随机偏振输出，这将降低谐波产生过程的效率。显然，需要一种新的晶体材料系统和泵浦方法，来提高未来DPSS激光系统的输出功率、光-光效率和光束质量。

Nd : YVO<sub>4</sub> (掺钕钒酸钇) 晶体由于其具有较大的受激发射截面、高

吸收率、高激光损伤阈值以及线偏振输出等特点，正越来越多地用于未来的DPSS系统。此外，用878nm进行高能级泵浦的Nd : YVO<sub>4</sub> 固态激光器，实现了更高的输出功率和更高的效率，这是由于其量子数亏损减少了约30%，相应地热负荷/热透镜效应也有所减少。<sup>[1]</sup>

通过使用基于钒酸钇的晶体，DPSS激光系统在输出功率、光束质量和输出偏振方面均获得了改善，但同时其对泵浦二极管也提出了严格的要求。由于钒酸钇晶体本身具有双折

射属性，其高能级的吸收线宽很窄，并且具有强烈的偏振依赖性。因此，这就要求高功率二极管泵浦源，在变化的工作温度和工作电流下，其光谱宽度和波长稳定性能够满足严苛的规格要求。要充分利用Nd : YVO<sub>4</sub>材料系统提供的性能，需要波长稳定的泵浦源。此外，泵浦二极管的亮度和泵浦强度的空间分布，对DPSS系统的输出功率、光束强度和效率都会产生重大影响。

本文中，我们将讨论光纤耦合波长锁定的二极管在Nd : YVO<sub>4</sub>高能级

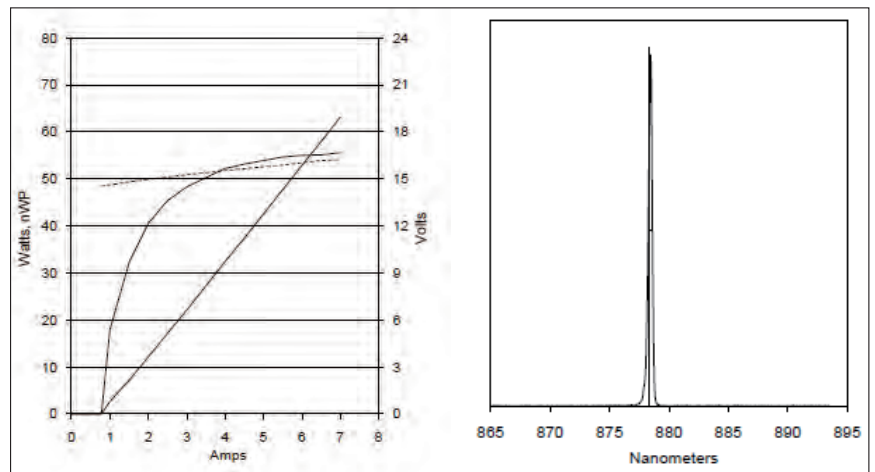


图2: (左图) 耦合到400μm、0.22 NA光纤的波长稳定的P10 Pearl模块的功率、电压和效率与电流之间的关系。运行功率为50W，效率>55%。(右图) Pearl模块在工作点的光谱特性。光谱线宽<0.4nm，在整个工作范围内的漂移<0.2nm。

泵浦与优化方面的优势。此外，文中还将给出实施基于 VBG 的解决方案时，在成本、功率、效率和动态范围方面的系统级权衡。

量子阱半导体激光器的光学发射光谱与有源区域的光学增益谱密切相关。该光学增益谱很大程度上取决于二极管激光器的驱动电流和温度。标准的面发射二极管激光器不采用波长选择反馈机制，导致在有源区光谱增益带宽内只要满足增益的模式都输出。因此，激发模式的包络光谱宽度，主要取决于光学增益的光谱宽度，而光谱宽度本身又与激光波长的平方成正比。<sup>[2]</sup> 由于二极管激光器的带隙和相应的光学增益谱，会随着温度和工作电流的变化而变化，非锁波长的二极管激光器，其输出波长随温度的漂移约为  $0.3\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。换句话说，二极管激光器的光谱宽度和中心波长，基本上会随着工作环境的变化而变化，并且不能通过在给定的材料系统中进行单独的外延修改来直接设计。

### 外部VHG波长锁定的优势

二极管激光器的波长稳定性，通常是通过波长选择反馈机制来实现的；这种机制将激光器锁定到一个（或几个）纵向模式。稳定二极管激光器

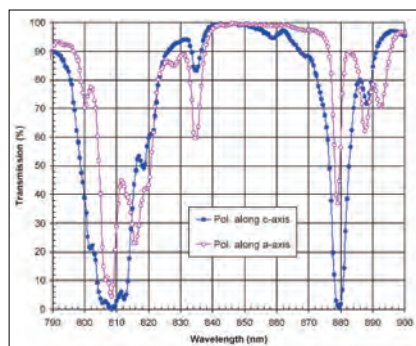


图3: Nd:YVO<sub>4</sub>的a轴偏振光和c轴偏振光的吸收曲线。当在878nm波段泵浦时，a轴偏振光和c轴偏振光的吸收差异能对激光器的性能产生实质性的影响。

表1: 三种二极管激光器的性能比较。

	自由运转	DFB/DBR波长锁定	VHG-波长锁定
10W单管的中心波长的变化	~10 nm	~2 nm	< 0.2 nm
光谱线宽 (FW1/e <sup>2</sup> ), 880nm	5-7 nm	<1.3 nm	< 0.5 nm
峰值效率	65%	60%	65%

的输出波长，有两种最常见的方法。一种是内部反馈机制，通过包含在激光器有源区域中的蚀刻的分布式布拉格光栅（DBR 和 DFB 激光器）来实现；另一种是外部反馈机制，通过外部光学元件来实现，如体全息光栅（VHG）<sup>[3,4]</sup>。相比于 DFB 或 DBR 波长锁定方式，采用外部 VHG 波长锁定的二极管激光器，具有诸多优势。

首先，外部 VHG 波长锁定方式，二极管自发热与反馈波长的调谐无相关性，进一步提高锁波长二极管的温度稳定性，并通过 VBG 元件的独立温度控制，实现了波长可调的激光输出。采用内部光栅（如 DFB 或 DBR 激光器）的器件，随着温度的不同，波长的偏移量为  $0.07\text{nm}/^\circ\text{C}$ ，从而导致输出波长在整个功率范围内出现 2nm 的偏移。相比之下，VHG 较低的光学吸收，使得激光器在其工作范围内的波长偏移  $<0.2\text{nm}$ 。

表 1 中比较了自由运转、采用内部光栅锁波和采用外部 VHG 锁波的三种二极管激光器的性能，其中包括中心波长的变化、光谱线宽和峰值效率。从表 1 中可以看出，VHG 锁波器件显示出了最小的中心波长变化、最窄的光谱线宽以及毫不逊色的电-光效率。

第二，外部 VHG 波长锁定方法提供了更大的波长灵活性，因为纵模是通过外部光学元件选择的。发射线宽可以根据应用进行定制 - 在要求极窄线宽 ( $<0.05\text{nm}$ ) 的情况下，可以简单地将 VBG 做得更厚些。例如，

nLIGHT 公司最近展示了波长稳定的 780nm 器件，其在整个工作范围内的光谱线宽  $<10\text{pm}$ 。

第三，通过不用 p-DBR，可以大大减少电子注入器件的电压缺陷，提高这些器件的量子阱效率。可以独立地优化外延以实现高功率和高效率，而不再需要在设计上做出妥协，为实现良好的光栅耦合设计复杂掩埋光栅方法。外部光栅本身较低的内部损耗允许进行设计优化，在功率和效率方面提供零损失。外部锁波长方式，消除了掩埋光栅方法中通常采用的复杂外延再生。准直利用了与透镜中相同的成熟准直技术。锁波和非锁波芯片，可以用来自同一个晶圆。

最后，批量制造能力和价格优势方面的最新进展，已经降低了 VHG 锁波激光器的成本，使其成为一种低成本解决方案。VHG 锁波激光器的准直和安装，利用了快轴准直透镜中使用的具有成本效益的成熟技术。

### nLIGHT最新锁波长技术

以前的其它工作研究显示，采用 VHG 外部波长锁定后，二极管的斜率效率大约有 10% ~20% 的损失。为了解决这一局限，nLIGHT 最近开发出一种锁波长技术，其能够在较宽的温度范围内保持良好的锁波性能，而并不改变激光器的输出功率和效率。<sup>[5]</sup>

最近，该技术已经被应用到多款工作在 800~1900nm 波长范围内的高功率、高效率二极管激光器中。nLIGHT 已将这些技术引入到 88xnm

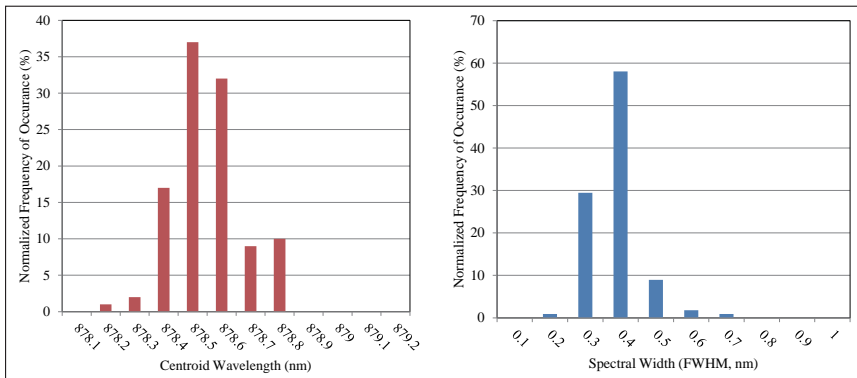


图4: 图中显示了878.6nm二极管激光器的中心波长(左图)和光谱宽度(右图)。这种使泵浦二极管的中心输出波长稳定并缩小光谱宽度的能力,显著提高了Nd:YVO<sub>4</sub>激光器的输出功率和光束质量。

光纤耦合 Pearl™ 模块中,实现了非常窄的光谱带宽,且光纤耦合器件的电-光效率高于55%,如图2所示。这些结果证明了nLIGHT在外腔激光器方面的独特实力:能够实现非常低的光损耗、精确的波长稳定性、极窄的光谱线宽,这些都是对钕酸钇 DPSS 激光器进行高能级泵浦的关键参数。

低成本光纤耦合泵浦模块的出现,使 SSL 泵浦架构得到了显著改进。首先,多模光纤定义泵浦光的空间分布,提供与固体激光器具有良好空间重叠的圆形输出光束。其次,泵浦可以与 SSL 晶体分开封装,这简化了系统的冷却要求。nLIGHT 已经开创了同时使泵浦光消偏振、并均匀光斑光纤输出的方法。该技术在显著消除激光偏振的同时,也提高了光纤耦合泵浦模块的稳定性和可维护性。最后,通过均质化近场和远场光束,使泵浦模块的输出能够更好地匹配 SSL 基模分布,从而提高光-光效率,并可获得接近衍射极限的输出功率。

nLIGHT 的许多客户都使用波长稳定的光纤均质泵浦源泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 固态激光器,泵浦波长为 878.6nm。在对 808nm 和 878nm 泵浦二极管进行比较研究时发现, a 轴与 c 轴偏振光

的吸收曲线的差异,对激光器性能有着显著影响。

相比于用 808nm 的器件泵浦,当用 878.6nm 光泵浦时,客户通常表示,最大输出功率会有实质性的改进。然而, a 轴和 c 轴吸收之间的差异,对泵浦波长和光谱宽度提出了严苛的要求,并且需要在这些要求之间进行权衡。许多客户已经报道,泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 的最佳波长为 878.6nm,但要严格限制光谱宽度和中心波长。通过 878.6nm 泵浦,沿 a 轴和 c 轴的吸收实现了平衡,进而实现了高输出功率和最小的热透镜效应。光谱线宽必须足够窄(大约为 0.5nm, FWHM),以至于 a 轴和 c 轴的吸收值在泵浦的光谱宽度内基本不变。

当将泵浦光调节到 878.1nm 时,较低的 a 轴吸收会导致性能变差。较大的光谱宽度(约 1nm)导致 a 轴吸收的快速减少,性能显著降低从而降低了激光光斑的光束质量。将泵浦波长调谐到大于 879.1nm, c 轴吸收较强而 a 轴吸收较弱,这将导致较低的光-光效率和较强的热透镜效应。光谱线宽的进一步增加,将导致 DPSS 性能的下降。

通过保持较窄的谱线宽度、优异的中心波长稳定性、去偏振的激光输

出和良好的光斑均匀性,我们可以同时优化 a 轴和 c 轴的吸收,同时减轻热透镜效应,能比 808nm 泵浦显著提高输出功率和斜率效率。nLIGHT 在设计和生产 VHG 锁波长泵浦模块方面具有超过五年的经验,目前已经在二极管激光器的制造方面具有独特的能力,能制造出具有严格的中心波长和光谱线宽的器件,如图4所示。

878.6nm 泵浦的 Nd:YVO<sub>4</sub> 的在输出功率和线性偏振输出方面的性能改进,直接改善了固态激光器的谐波产生。多家客户反馈,878.6nm 泵浦的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的性能改进,使得 TEM<sub>00</sub> 输出功率比 808nm 泵浦提高了 60% 以上,这将直接提高一次谐波和二次谐波的功率水平。nLIGHT 已经通过生产波长稳定的 878.6 nm 泵浦源(其具有最高的效率、最严格的中心波长稳定性、较窄的光谱线宽)展示了最佳的 Nd:YVO<sub>4</sub> 泵浦方案,从而能够在生产线上提高 DPSSL 的输出功率和稳定性、以及 DPSSL 性能的可重复性。□

参考文献

1. Y. Sato, T. Taira, N. Pavel, and V. Lupei, "Laser operation with near quantum-defect slope efficiency in Nd:YVO<sub>4</sub> under direct pumping into the emitting level," Appl. Phys. Lett. 82, 844-846 (2003).
2. S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, Wiley, New York, 2nd ed(1981).
3. L. Glebov, Photonics Spectra, Jan. (2005)] [4] [B. Volodin, et al., Optics Lett., vol. 29, pp. 1891-1893, (2004).
4. B. Volodin, et al., Optics Lett., vol. 29, pp. 1891-1893, (2004).
5. P. Leisher, et al. "High-Performance Wavelength-Locked Diode Lasers" SPIE 7198, (2009).