

动态综述

泵浦用大功率半导体激光器研制与应用发展状况*

王勇刚, 马骁宇, 张洪波, 刘媛媛

(中国科学院半导体研究所, 北京, 100083)

摘 要: 详尽地介绍了当前可以使用半导体泵浦的固体激光器泵浦要求, 相应的半导体泵浦源的发展状况, 存在的问题, 最后介绍了列阵和耦合两种提高半导体泵浦源功率, 改善其光束质量的方法。

关键词: 大功率; 半导体泵浦; 固体激光器

中图分类号: TN 248.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1005-488X (2003)04-0250-04

Research and Development of the High Power Semiconductor Laser for Pumping and Its Applications

WANG Yong-gang, MA Xiao-yu, ZHANG Hong-bo, LIU Yuan-yuan

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100083, China)

Abstract: In this article, the condition of semiconductor pumping source, existing problems and the requirement of pumping for solid-state lasers pumped with semiconductor lasers are introduced in detail. We also introduce diode laser array and fiber coupling, which can be used to increase the power of semiconductor laser and improve the beam quality.

Key words: high power; diode-laser-pumped; solid-state laser

引 言

1962年, 第一只同质结砷化镓半导体激光器(LD)问世, 1963年, 美国人纽曼就首次提出了用半导体作为固体激光器泵浦源的构想, 并利用GaAs二极管在865~890 nm的辐射激发Nd:CaWO₄得到了1.06 μm的荧光输出^[1]。当时, 二极管

的各项性能还很差, 效率低, 阈值高, 而且只能在低温77 K下运转。1978年量子阱激光器概念的提出, 是半导体激光器泵浦全固化固体激光器(DPSSL)发展历史上的一个里程碑。由于量子阱激光器的出现, 使得LD的增益系数提高, 而且在室温下阈值电流减小, 线宽变窄, 效率提高, 极大地推动了DPSSL的发展。1985年, 激光二极管泵浦Nd:YAG获得80 mW、1.06 μm单模输出, 总效率

* 收稿日期: 2003-06-03

作者简介: 王勇刚(1973-), 男, 博士研究生。主要从事固体激光器及光纤激光器锁模和调Q用吸收体(半导体可饱和吸收镜, GaAs等)的研制。

马骁宇(1963-), 男, 主任研究员。主要从事半导体激光器产业化研究, 开发了650 nm, 670 nm, 808 nm, 980 nm, 1300 nm, 1500 nm等一系列半导体激光器产品。

张洪波(1974-), 男, 博士研究生。从事14xx nm泵浦激光器的研究。

为 8%^[2]。1987 年, 横向泵浦棒状 Nd: YAG 得到 21 W 的峰值输出^[3]。同年, LD 列阵泵浦板条 Nd: YAG 得到峰值功率 70 kW 的巨脉冲输出。1997 年, 日本 Mitsubishi Electric 公司的研究人员采用侧面泵浦 Nd: YAG 棒结构, 得到了 80 W 基模输出, 光-光转换效率为 20.7%, 电光效率为 8.06%^[4]。

1 半导体激光器泵浦的激光器

适合 LD 泵浦的激光晶体, 必须具备以下三个条件: 较宽的泵浦吸收带与现有的大功率激光二极

管的发射带相匹配, 而且吸收带越宽, LD 结温变化对激光输出影响越小; 激活离子有较长的荧光寿命, 亚稳态能级上能积累更多的粒子, 有利于储能和器件的输出功率的提高; 激光晶体还要具有大的激光跃迁截面, σ 大的晶体易实现激光振荡。适合 LD 泵浦的晶体有几十种, 它们一般都具有锐荧光谱线、较宽的吸收带和大的发射截面的特点, 但于具体应用而言, 必须将晶体的物理、化学、热学和光谱学性能有机结合, 综合考虑, 而不能单独追求某一项性能指标, 这样才能满足器件整体的稳定性和可靠性的要求。表 1 列出了部分适合 LD 泵浦的激光晶体。

表 1 适合 LD 泵浦的激光晶体

Tab 1 The laser crystals suitable for LD pumping

掺杂离子	激光基质晶体	荧光寿命 $\tau/\mu\text{s}$	受激截面 $\sigma/10^{-19} \text{ cm}^2$	$\sigma\tau/10^{-23} \text{ cm}^2\text{s}$	吸收波长 λ_e/nm	吸收带宽 $\Delta\lambda_{\text{abs}}/\text{nm}$	输出波长 λ_0/nm	
Nd ³⁺	YAG	230	4.5	10.4	807.5	2~5.5	1064	
	YLF	σ	520	2.1	10.9	806	2.0	1053
		π	520	3.7	19.2	792	2.0	1047
	YVO ₄	98	10.0	9.8	808	15.7	1064	
	YAP	170	2.0	3.4	808	—	1079	
	GSGG	284	1.3	3.72	808	—	1061	
	GGG	240	2.0	4.8	806	8.0	1061	
	FAP	250	5.0	12.5	—	—	1063	
	Glass	300	3.1	9.1	801	14	1062	
	LNA	260	0.4	1.04	—	22.0	—	
GdVO ₄	90	7.6	6.84	808	2.0	1062		
Yb ³⁺	YAG	1080	0.2	2.16	942	18.0	1029	
	FAP	1100	0.59	6.5	905	2.4	1043	
	S-FAP	1260	0.73	9.2	899	3.7	1047	
Cr ³⁺	LiSAF	67	0.48	—	670	100	846	
	LiCAF	170	0.13	—	670	100	763	
	LiSGAF	88	0.33	—	670	100	835	

DPSSL 从泵浦方式上可以简单地归为两类: 端面泵浦和侧面泵浦。一般认为, 在端面泵浦的结构中, 泵浦光沿晶体轴向传播, 通过整个晶体, 吸收效率很高, 而且利用光学器件可以很容易地将泵浦光的光束与谐振腔的振荡模式相匹配, 获得单模输出, 斜效率可以达到 70% 以上^[5], 缺点是由于晶体的受光截面以及晶体中热效应的影响, 很难得到大功率的激光输出。对于侧面泵浦来说, 半导体激光器放置在晶体的周围, 有足够的空间得到很高的泵浦功率, 可以得到更大功率输出, 缺点是, 泵浦光的入射方向与晶体中的光传播方向相互垂直, 泵浦光

的分布与谐振腔所决定的模式分布很难达到最佳匹配, 所以侧面泵浦的激光器光束质量较差。

2 泵浦用半导体激光器

2.1 14xx 波长大功率半导体激光器

1480 nm LD 作为 EDFA 和 Raman 放大器的泵浦源在光纤通信中的作用非常重大。实际应用中, 激光器与单模光纤连接, 从应用角度出发, 激光器模块应具有以下特性: 在保证单模工作的前提下

输出光功率尽量大、功率消耗应尽可能地小;同时要求具备低阈值、高效率、小发散角、高特征温度等特点。通常采取的措施是:通过管芯波导结构优化设计使激光器获得尽可能高的微分量子效率;提高激光器与单模光纤的耦合效率。

从 1989 年开始,人们在提高 1 480 nm LD 特性方面做了大量工作归纳起来这些工作主要集中在三个方面:材料系的选择,生长方法的选用,管芯结构的优化。三者中管芯结构是主线。材料方面:前期工作中,相当长一段时间管芯有源区使用 InGaAs/InGaAsP,随着应变量子阱理论的发展和 InGaAsP 材料系的不断成熟,现在人们都选用 InGaAsP/InGaAsP;对于这一材料系减小热阻、降低漏电流是获得高功率的有效手段,通常此材料系的激光器采用长腔(700~1 800 μm)和增反、增透腔面镀膜(HR 和 AR)。1 480 nm LD 材料生长方法主要有 LPE、MOCVD、CBE 以及 GSMBE;其中 MOCVD 可以精确控制外延层厚度便于获得大面积、组分均匀的外延片,适于工业化生产,因此现在的工作中人们多采用此生长方法。

2.2 980 nm 波长大功率半导体激光器

980 nm 半导体激光器可以作为 EDFA 的泵浦源运用于光纤通信网络中。980 nm 大功率半导体激光器分为有铝(采用 InGaAs/GaAs/AlGaAs)和无铝(采用 InGaAs/GaAs/InGaP 或 InGaAs/InGaAsP)两种。InGaAs/GaAs/AlGaAs 是目前的主流。InGaAs/GaAs/AlGaAs 的特征温度约为 170 K 左右,工作温度提高到 200 $^{\circ}\text{C}$ 以上。而 1 480 nm 激光器仅能工作在 100 $^{\circ}\text{C}$ 左右。随着功率的提高,带来了高功率密度下的器件可靠性问题。人们围绕着 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱腔面退化及腔面光学灾变损伤(Catastrophic optical damage, COD)即激光器突然失效进行了大量的研究。COD 的根源是由于腔面处的光吸收引起的端面发热损坏所致。对 980 nm InGaAs/GaAs/AlGaAs 来说,含 Al 导致在高的光功率密度下,腔面极易氧化,使用久了腔面处存在应力释放导致的带隙收缩。现在发展了真空解理镀膜,腔面钝化处理以及无吸收镜面的窗口结构制备等技术,有效地提高了产品的寿命。但是,这些技术并不容易掌握,特别是产品化的条件下。

InGaAs/GaAs/InGaP 是无铝 980 nm 激光器

的增益结构,它具有一系列优点。由于没有 Al 氧化问题, COD 现象大大减轻,寿命也大大提高。GaInP 具有较好的电学和热学特性,如电导率较高,热导率也较高。GaAs 和 GaInP 之间具有很好的选择性腐蚀,因此可以精确地控制腐蚀深度。但是, InGaAs/GaAs/InGaP 也存在一些缺点。它的特征温度小于 150 K。GaAs 和 GaInP 之间有较大的折射率差,使得该激光器具有很大的垂直方向远场发散角,不利于与单模光纤的耦合。

2.3 808 nm 波长大功率半导体激光器

808 nm 半导体激光器是 Nd:YAG 固体激光器的泵源,可以利用 AlGaInAs($x=0.07$)有源区或是约 6 nm 的 GaAs 薄量子阱。高质量的 AlGaAs 难以生长,存在可靠性方面的问题,而 GaAs 没有这种可靠性的问题,但当大功率工作时, GaAs 内部会产生暗线缺陷,最终受 COD 的影响。采用 InGaAsP 有源区解决了这一问题。In 原子比 Ga、Al 和 As 原子都大,因而起到硬化晶格的作用。但是, InGaAsP/GaAs 材料系具有较小的禁带不连续性,引起严重的载流子泄露,导致阈值电流增大和特征温度变低。

2.4 670 nm 波长大功率半导体激光器

670 nm 波长大功率半导体激光器是 $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSAF}$, $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCAF}$, $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSGAF}$ 等固体激光器吸收峰相符的。遗憾的是,目前还没有大功率的 670 nm 波长大功率半导体激光器。 $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSAF}$, $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCAF}$, $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSGAF}$ 增益带宽,可以实现 20 fs 以下的锁模脉冲宽度,如果实现半导体泵浦,将可以制成良好的全固化半导体泵浦用半导体可饱和吸收镜被动锁模超短脉冲激光器。目前的 AlGaInP 激光器受所含 Al 的氧化问题的影响,大功率工作下寿命低,并且特征温度也不高。

3 半导体激光器阵列

单管的大功率半导体激光器输出功率有限,现在较为成熟的 808 nm 波长单管产品输出功率最大不过三四瓦,因此,人们把半导体激光器作成阵列来增大输出功率。激光二极管阵列分为相干阵列和不相干阵列。相干阵列的最大优点是高亮度,但

是很难实现高功率输出,而非相干列阵可以作到高功率输出。列阵的关键是封装,而封装的最重要的参数是封装密度和热阻,这两个量是互相矛盾的。封装密度的提高,指线列阵单元间距的减少,热功率密度也相应提高,散热变得更困难,器件热阻增大,这样对器件的长期工作不利。所以在封装研究过程中,提高封装密度的同时,也要减少器件热阻。降低热阻的方法是使用微通道制冷。对于高占空比连续和连续器件,微通道制冷是必须的。就比较成熟的 808 nm 大功率半导体激光器列阵而言,产品功率已经达到上千瓦,由数十个 bar 构成,每个 bar 由数十个单管构成。现在出现了模块化,即将激光晶体和列阵集成在一起。国内中科院半导体研究所研制的 808 nm 大功率列阵已经形成产品。

4 半导体激光器光纤耦合

由于大功率半导体激光器列阵输出光束的远场分布不对称以及像散的影响,使大功率激光器列阵与光纤的高效耦合成为一个较难解决的问题。大功率半导体激光器列阵的输出光束是椭圆高斯光束,用一个简单的透镜无法实现快轴和慢轴同时聚焦。大功率半导体激光器列阵光纤耦合器件可以解决上述问题。有两种方法:微光学系统耦合方法和光纤列阵耦合方法。应用微光学系统耦合方法可以

将大功率半导体激光器列阵的输出光束耦合到单根光纤中。这样可以用一根芯径相对较小的光纤进行能量传输,因此可以得到高亮度、高功率密度的激光输出,缺点是微透镜和微透镜列阵的加工难度大,成本高。光纤列阵耦合方法是用一根圆柱的微透镜对大功率半导体激光器列阵输出光束的快轴方向进行压缩,然后耦合到光纤列阵中。这种耦合方法的缺点是光纤束直径较大,因此输出激光的亮度和功率密度低,但它具有耦合系统相对简单、成本低优点,因此更多地应用在实用化的耦合系统中。

参 考 文 献

- [1] Roger Newman. Excitation of the Nd^{3+} fluorescence in CaWO_4 by recombination radiation in GaAs[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(2): 437.
- [2] Sipes D L. Highly efficient neodymium: yttrium aluminum garnet laser end pumped by a semiconductor laser array[J]. Applied Physics Letters, 1985, 47(2): 74.
- [3] Hanson F. Conf Lasers Electro-Opt[C]. Opt Soc, Amer, Washington, DC 1987.
- [4] Susumu Konno, Shuichi Fujikawa, Koji Yasui. 80 W CW TEM₀₀ 1.064 nm beam generation by use of a laser-diode-side-pumped Nd: YAG red laser[J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(20): 2 650.
- [5] Zhang H, Meng X, Wang P, et al. Slope efficiency of up to 73% for $\text{Yb:Ca}_4\text{YO}(\text{BO}_3)_3$ crystal laser pumped by a laser diode[J]. Applied Physics B, 1999, 68: 1 147.

信息之窗

《液晶与显示》2004 年征订启事

《液晶与显示》是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示领域中最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态。《液

晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。同时,竭诚欢迎社会各界洽谈广告业务、合作组织技术交流与信息发布活动。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价 15.00 元,国内邮发代号:12-203;国外发行代号:4868Q。广告经营许可证号:200004100137。

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登产品广告

地 址:长春市东南湖大路 16 号

《液晶与显示》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)6176862

E-mail: yjxs@ciomp.ac.cn

传 真:(0431)5682346

网 址:www.ciomp.ac.cn