

方兴未艾的二极管泵浦的激光晶体材料

臧竞存 刘燕行

(北京工业大学化学与环境工程系,北京,100022)

摘要: 简要叙述了半导体激光器现存的一些问题和二极管泵浦固体激光器的特点,评述二极管泵浦激光晶体材料的最新进展。

关键词: 激光晶体 半导体激光器 二极管泵浦激光材料

Laser crystal materials of pumped by diodes

Zang Jingcun, Liu Yanxing

(Dept. of Chemical & Environmental Engineering, Beijing Polytechnic University)

Abstract: Problems on semiconductor laser are discussed. The advantages of solid laser pumped by diodes are summarized. Some major recent development in laser crystal materials pumped by diodes are reviewed.

Key words: laser crystal semiconductor laser laser materials pumped by diodes

1962年半导体激光器就诞生了,但由于功率低根本不可能用作泵浦源。近年大功率激光二极管问世,使得人们开始用它代替氙灯,作为固体激光器的泵浦源,并获得迅猛发展,1987年,有人就认为二极管泵浦固体激光器已成为技术主流^[1]。

半导体激光器已可以达到大功率激光输出,那么为什么人们不直接利用它而还要用它去泵浦其它晶体材料获得激光输出呢? 现行半导体激光器的主要问题在于:1)光束质量、模式太差,难于满足激光器的要求;2)半导体激光器波长的不确定性,目前商品出售的大功率激光器如果对波长要求比较严格的话价格很高,而波长要求放宽一些价格可降低20%;3)可见光区的二极管输出功率还不够大;4)频率不可调谐,限制了应用范围。

二极管泵浦激光器是指利用二极管作泵浦源来激励激光晶体中的激活离子,产生激光振荡。激光器的激光输出特性与氙灯泵浦的激光器一样,取决于激光晶体材料的特性。激光晶体的研究是伴随激光诞生而起步的,因而积累了大量的丰富的经验。它的主要问题是效率低,氙灯寿命短,光谱不匹配的机制造成总体效率低,振荡波长多样性不足。

二极管激光是高效长寿命和功率稳定的辐射源,其发射波长可以选择,使之落在激活离子的吸收带内进行有效泵浦,与闪光灯泵浦相比优点为基模工作,结构紧凑,长寿命高增益、高效率、低阈值,易于温度调谐来改变发射光谱,激光棒可用空气冷却,模匹配有效,泵浦密度高,宽光波段工作,稳定,高储能性。

采用二极管激光器代替惰性气体放电管来激励就可以在以下几个方面使激光器得到改善:(1)总体效率提高5~10倍;(2)达到衍射极限光束;(3)热效应减小到1/2~1/3,由于热负荷降低,平均输出功率提高;(4)可靠性提高,使用寿命大大延长,可达几年($1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ h);(5)外形尺寸可缩小9/10以上。

正因为如此,二极管泵浦激光晶体材料的探索掀起了固体激光器的新潮。在这方面的研制自然首先从最成熟的固体激光器Nd:YAG开始,这主要是因为它的阈值低、增益高。1989年日本光产业技术振兴会声称^[2],委托日本电气公司研制的“激光二极管激励的小型高功率YAG激光器”已获得成功。在长59mm,宽8mm厚3mm的板条YAG晶体两侧各配置10支激光二极管(输出1W,波长809nm),采用以光纤和自聚焦透镜的耦合系统,在输入11W时,TEM₀₀模输出3.5W,输入16W时,最大输出5.9W。

激光二极管泵浦Nd:YAG激光器最近已有商品出售,实验室阶段Z字型传输板条激光器的平均输出功率已达275W,重复频率2.5kHz,目前,激光二极管泵浦Nd:YAG激光器的连续输出据报道已达15W,脉冲工作的峰值功率高达44MW。在其它基质材料中,也取得重要进展,美国俄勒冈州ESI公司和光谱物理公司共同研制的二极管泵浦Q开关Nd:YLF激光器已成批量出售。表1列出了二极管泵浦的1~3μm激光材料。

Table 1 Laser materials pumped diode for 1~3 μm

excitation ions	hosts	emission wavelength (μm)	fluorescence time (ms)	pumped wavelength(nm)
Nd	YAG	0.946,1.064,1.310	0.23	809
	YLF	1.047,1.053	0.5	791
	YAP	1.08, 1.34	0.18	808
	YVO ₄	1.064,1.34	0.095	809
	MgO + LiNbO ₃	1.085,1.387	0.085	813
	LiNdP ₃ O ₁₂	1.048	0.32	810
Ho	YAG	2.1(77K)	5.0	785
	YAP	2.92	0.9	808
Er	YAG	1.65, 2.94	9.1,0.1	—
	YLF	1.73, 2.8	4.3	797
	YAP	1.66	0.13	808
Tm	YAG	2.02	16	785
	YLF	2.31	—	781
Ho,Tm	YAG	2.09	—	785
	YLF	2.08, 2.31	—	791
Cr,Tm	YAG	2.02	—	—
	YAP	2.27	0.77	—
Cr,Nd	YAG	1.064	0.21	—
	YAP	1.064	0.18	—

日本保谷研究人员用375mW,800nm的二极管激光泵浦,在自倍频激光晶体硼酸钕钇铝(NYAB)产生高达23mW的531nm绿光输出^[3]。表2列出了二极管泵浦的蓝绿光激光器。

Table 2 Blue and green light lasers pumped laser diodes

crystals	transfer technology	noline crystals	output wavelength (nm)
Nd : YAG	SHG(1)	KNbO ₃	473
	SFM	KNbO ₃	436
	SHG(2)	MgO : LiNbO ₃	532
	SHG(3)	MgO : LiNbO ₃	532
	SFM	KTP	459
Nd : YAG	SHG(2)	KNbO ₃	532
NYAB	SHG	NYAB	532
Nd : YAG	paraphase-conjunction	PPLN	532

SHG(1)为内腔二次谐波产生,SHG(2)为外腔二次谐波产生,SHG(3)为外环形腔二次谐波产生,SFM 是 809nm 波长二极管激光产生和二极管泵浦的 Nd : YAG(946nm)激光和频混合,NYAB:硼酸钕钇铝,PPLN:周期极化铌酸锂。

国内清华大学周炳

琨、霍玉晶等^[4]开展了 LD 泵浦的 Nd : YAG 激光器的工作,获得中心波长为 532nm 激光输出,阈值为 $P_{th}=41mW$,最大输出功率 $P_{max}=1.4mW$.斜效率 $s=1.7%$,偏振度 $\geq 99.7%$ 。肖建伟等^[5]用激光二极管泵浦 Nd : YLF,采用平凹腔,在 $\varnothing 3mm \times 4mm$ 的样品中,80mW 脉冲泵浦下,获得 17.3mW 输出,脉冲能量 6.7 μJ .光效率为 24%。

对于稀土激活离子二极管泵浦的优势尚未得到充分发挥,因为稀土离子的吸收一般为窄带锐线,要作到光谱完全匹配,给半导体激光二极管的制作提出了难题;其次稀土离子不能产生波长连续可调谐的激光输出。因此人们又开始注意寻找其它的新型固体激光材料。这些材料有些在激光发展初期已进行过研究,但因为在寻找高能量激光器时期不能与红宝石、YAG 等竞争而被放弃,但对于新的应用,完全可能发挥某些方面的优势而受到重新评价。也有些是新研制的激光晶体材料,从一开始就以激光二极管泵浦为目标,尽管其物理机械性能方面稍差。

Table 3 Laser parameters of fluorite doped Cr³⁺ ions

hosts	LiCaGaF ₆	LiCaAlF ₆	LiSrGaF ₆	LiSrAlF ₆
instinctive efficiency $\eta_0(\%)$		67	52	53
quantum efficiency $\eta_{0q}(\%)$		82	66	67
π emission cross section $\sigma_{em}(10^{-20}cm^2)$	—	1.3	3.3	4.8
fluorescence peak(nm)	770	763	835	846
fluorescence time(μs)	200	170	88	67
zero phonon line(nm)	—	678	699	699
expansion coefficient α ($10^{-6}/C$) α_c	—	3.6	0	-10
	—	22	12	25
melt point($^{\circ}C$)	762	810	716	766

1990 年首次报道了用二极管泵浦紫翠宝石,获得激光输出^[6],近三年掺铬氟化物的研究引起广泛重视。特别是 LiCaAlF₆ : Cr³⁺,其中 Ca²⁺ 和 Al³⁺ 离子又可为 Sr²⁺, Ga³⁺ 等替代^[7]。这种材料阈值低,效率高。已用 AlGaInP 二极管泵浦获得激光输出^[8]。

他们用一对 10mW 670nm 的二极管激光器加上一个 265mW 的激光二极管,在 18.3mW 时输出 540 μW 的激光。高功率的 665nm 激光二极管泵浦产生 15.9mW 连续和脉冲频率为 10Hz 的 51.8mW 激光。表 3 列出了掺 Cr 氟化物激光性能^[9]。

三价 Cr³⁺ 离子是很稳定的激活离子,不会像 Ti 离子那样存在三价和四价之间的变价问题,因此探索 Cr³⁺ 离子晶体在广泛进行。其中钨酸盐单晶中,由于 W⁶⁺ 的电价高,离子半径小,具有很强的极化作用,W⁶⁺ 离子属于重离子,这些因素造成 Cr³⁺ 离子有很强的电声子耦合跃

迁,使之在钨酸盐晶体中的 Stokes 位移最大。 $\text{ZnWO}_4:\text{Cr}^{3+}$ 已实现室温 $400\mu\text{J}$ 的近红外激光输出^[11]。表 4 列出了掺 Cr^{3+} 钨酸盐晶体的光谱数据^[10]。

Table 4 Spectrum data of Cr^{3+} doped tungstate

hosts	$\text{Al}_2(\text{WO}_4)_3$	$\text{Sc}_2(\text{WO}_4)_3$	ZnWO_4
space group	pnca	pnca	p2/c
point group	6	6	6
ligand number	C_1	C_1	C_2
$\sigma_{\text{abs}}, ^4T_2/\text{cm}^2$	4×10^{-19}	1×10^{-19}	4.9×10^{-19}
D_q/B	2.3	2.3	2.05
B/cm^{-1}	650	630	600
$\sigma_{\text{em}}/\text{cm}^2$	1.9×10^{-19}	1.6×10^{-19}	4.3×10^{-19}
$\lambda_{\text{em}}/\text{nm}$	810	860	970
$\tau_{300\text{K}}/\mu\text{s}$	16.2	2.4	5.4

二极管泵浦的激光材料需要阈值低、效率高,能连续工作。敏化发光是一种有效的方法,由于二极管激光波长可以选择,敏化离子的作用就更为突出,这方面的特点明显优于氙灯泵浦,应该是更需要十分重视的课题。

二极管泵浦激光器的发展自然有赖于二极管激光器本身的进步,当代二极管激光已从红外迈向可见,功率也越来越大。表 5 列出美国光谱二极管公司的一些产品性能。

Table 5 Laser diode characteristics

model number	emitting wavelength			
SDL-7420 series	visible red light	670~690 nm	CW	250mW
other CW series	near infrared	780~980 nm	CW	50mW
SDL-2100 series	near infrared			pluse enery 1.5J/P
SDL-3200 series	diode matrix		para-CW	100W 600mJ/P

激光二极管泵浦激光器有着强大的生命力,激光材料的研究也方兴未艾。激光核聚变如用灯泵由于体积庞大,系统复杂,难于实现,采用激光二极管泵浦激光器,则效率高,体积小,控制容易,同步激光脉冲产生在技术上容易实现,在仪器仪表、军事探测、军用通讯等技术上有突出的作用。

参 考 文 献

- Forrest G T. L F, 1987;23(1):62~64
- 中井贞雄,山中正宜. レーザー研究, 1991;19(10):50~53
- Kales D. L F World, 1990;26(3):7
- 霍玉晶,蔡金星,周炳琨 *et al.* 中国激光, 1993,20(4):247~250
- 肖建伟,徐俊英,张敦明 *et al.* 中国激光, 1993,20(4):251~255
- Scheps R, Gately B M, Myers J F *et al.* A P L, 1990;56:2288~2290
- Scheps R. IEEE J Q E, 1991;27:1968~1970
- Scheps R, Meyers J F, Serreze H B *et al.* Opt Lett, 1991;16:820~822
- Smith L K, Payne S A, Kway W L *et al.* IEEE J Q E, 1992;28(11):2612~2618
- Petermann K, Mitzscherlich P. IEEE J Q E, 1987;23(7):1122~1126
- 臧克存,詹永铃,刘 征. 激光技术, 1993;17(3):142~144

作者简介:臧克存,男,1947年11月出生。副教授。现从事晶体生长和晶体光谱工作。
刘燕行,女,1951年2月出生。工程师。现从事材料工作。

收稿日期:1993-09-23 收到修改稿日期:1993-10-27