

半导体泵浦全固体蓝光激光器的研究进展

周 城, 叶子青, 郑 权, 钱龙生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 由于全固体蓝光激光器的广阔的应用前景和潜在的商业价值, 使全固体蓝光激光器的研究成为当前激光领域的一个热点。简述了 LD 泵浦全固体蓝光激光器的发展历史和现状。讨论了产生蓝光的增益介质、倍频晶体、被动调 Q 晶体和已出现的直腔、“V”型腔及“Z”型腔的结构。指出了 LD 泵浦固体蓝光激光器面临的镀膜技术与“蓝光噪声问题”两大困难和其大功率、小型化的发展方向。

关键词: LD 泵浦; 固体蓝光激光器; 增益介质; 倍频晶体; 蓝光噪声

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

1 引言

1960 年世界上第一台固体激光器诞生不久, 第一台用激光二极管泵浦的固体激光器便在美国的林肯实验室诞生了。进入八十年代, 由于量子阱结构半导体激光器的出现, LD 的阈值电流减小, 连续或准连续的输出功率有了明显的提高, 因而激光二极管泵浦固体激光器的研究工作也有了很大的进展。1986 年, T. Y. FAN 和 R. L. BYER 提出用辐射波长为 808nm 的 LD 端面泵浦 Nd: YAG 棒, 产生波长为 946nm 的激光, 并建立了准三能级激光器的理论模型^[1]。不久, 他们用辐射波长为 808nm 的 LD 端面泵浦 Nd: YAG 棒, 并得到了在室温下连续运行的 946nm 的激光, 此时泵浦阈值低于 10mW, 在泵浦阈值以上的斜效率高达 34%^[2]。同时, W. P. Risk 和 W. Lenth 用波长为 808nm 的 LD 端面泵浦 Nd: YAG 棒, 并用 Li IO₃ 作腔内倍频晶体, 得到了波长为 473nm 的 100μW 的蓝光激光^[3], 这是世界上第一台用 LD 端面泵浦棒状增益介质的腔内倍频产生蓝光的激光器。

到目前为止, 除了连续的蓝光输出功率已达 2.2W^[4], 采用被动调 Q 得到 473nm 的蓝光脉冲输出的峰值功率高达 26W^[5]。产生蓝光的谐振腔除了直腔外, 还有“V”型腔^[6]和“Z”型腔^[7]。

我国蓝光的研究才刚刚起步。中国科学院长春光机所新产业公司研制的 LD 端面泵浦 Nd: YAG 腔内倍频得到 50mW 的蓝光激光^[8-9]。山西大学用类似的方法, 用 1W 的 LD 端面泵浦 2.8mW 的蓝光激光^[10]。但到目前为止, 产生蓝光的 LD 泵浦腔内倍频激光器都采用端泵的方式, 侧泵的方式还未见报道。

2 全固体蓝光激光器的激光材料、倍频晶体和调 Q 晶体

2.1 激光材料

通过腔内倍频产生蓝光的激光材料有 Cr: LiSaF、Nd: YVO₄、Nd: YAlO₃、Nd: YAG 等。而产生 473nm 和 457nm 的激光材料分别为: Nd: YAG 和 Nd: YVO₄。在这两种激光材料中, Nd 离子发生跃迁 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$, 这种跃迁是介于三能级与四能级之间的跃迁, 这种跃迁系统被称为准三能级系统。表 1 列出这两种激光材料的比较。

表 1 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄的一些参数Table 1 Properties of Nd:YAG and Nd:YVO₄

	λ_o (nm)	λ_{2o} (nm)	Stimulated emission cross-section σ ($\times 10^{-20} \text{cm}^2$)	Upper-level lifetime τ (μs)	$\sigma\tau$ ($\times 10^{-20} \text{cm}^2 \cdot \mu\text{s}$)	Absorption cross-section σ_a ($\times 10^{-20} \text{cm}^2$)	Thermal conductivity (at 300K) ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
YAG	946	473	4.3 ^[11]	230 ^[12]	989	7 ^[12]	0.13 ^[12]
YVO ₄	914	457	19.5 ^[6]	95	1852.5	27 ^[12]	0.0532 ^[13]

对于 Nd:YVO₄ 来说,由于吸收截面积大,所以吸收系数大,又因为热导率小,所以 Nd:YVO₄ 适用于薄片状端泵中小功率激光器。此外,它的荧光寿命短,不宜用于脉冲激光器。由于 Nd:YAG 的荧光寿命长,因而使用于脉冲激光器。由于阈值功率随 $\sigma\tau$ 的增加而减小,所以 Nd:YAG 的阈值功率比 Nd:YVO₄ 的阈值功率小,因而斜效率高。因为 Nd:YAG 的热导率大,所以适用于侧泵大功率激光器。其次,两者的波长都与 LD 泵浦的中心波长 808nm 离的比较近。为了提高对泵浦光的利用率,通常对增益介质的一端面镀 808nm 的增透膜,同时,还要对同一端面镀 946nm 或 914nm 的增反膜。这对镀膜技术提出了相当高的要求,镀出适合应用的膜成功率极低,而侧面泵浦则可解决这个难点。所以, Nd:YAG 成为 LD 侧面泵浦大功率固体激光器的首选材料。此外,还有人将 Cr⁴⁺ 和 Nd³⁺ 一起掺到 YAG 里形成 Nd³⁺:Cr⁴⁺:YAG 自调 Q 激光晶体,并用 808nm 的 LD 端泵该晶体,用 KN 作腔外倍频晶体(这种方式称为自调 Q 腔外倍频),得到峰值功率为 26W 的蓝光激光^[5]。但该晶体长度很难选取到最佳值。

2.2 倍频晶体

当前,产生蓝光的倍频晶体应用较为广泛的有: KN, BBO, LBO, LiIO₃。KN 倍频晶体的优点是: (1) 非线性系数较高, $d_{31} = -15.8 \text{pm/V}$, $d_{32} = -18.3 \text{pm/V}$ ^[14]; (2) 走离角较小。缺点是: (1) 光谱温度接受带宽较小; (2) 能发生畴反转(即磁畴反转,该现象将会使晶体的光学性质发生变化); (3) 光折变率较小; (4) 加工上存在一些困难,价格非常昂贵。因为这些缺点,所以人们把目光转向了 BBO, LBO, LiIO₃ 倍频晶体。表 2 列出了这些晶体用 946nm 的激光产生 473nm 的倍频激光的有关参数和某些物理性质。

表 2^[15] BBO, LBO, LiIO₃倍频参数(对 946 nm)Table 2^[15] Properties of BBO, LBO and LiIO₃ for frequency doubling at 946 nm

	BBO	LBO	LiIO ₃
Phasematching type	I class(ooe)	I class(ooe)	I class(ooe)
Phasematching angle θ	24.9°	19.5°	34.3°
d_{eff} (10^{-19}m/V)	2.08	0.92	4.0
Walk-off angle	3.5°	0.7°	4.6°
n_o	1.658	$n_z = 1.6077$	1.861
$\Delta\theta L$ [mrad cm]	0.42	2.29	0.28
$\Delta\mathcal{L}$ (nm cm)	0.43	0.63	0.16
ΔTL (k cm)	23	8	20
Deliquescence	Easy	Not easy	

由上表可以看到 LiIO₃ 和 BBO 晶体的特点如下。

优点:

- 1) 都具有较大的非线性有效系数,分别是 LBO 的约 2 倍和 4 倍;
- 2) 都能允许较大的温度变化范围(ΔTL),可以对其不采取温度控制。

缺点:

- 1) 谱线接受带宽($\Delta\mathcal{L}$)和允许角($\Delta\theta L$)较小;
- 2) 走离角较大,分别是 LBO 的约 6 倍和 5 倍。

以上两缺点主要是由材料本身引起的,通过外界手段不易克服。

LBO 晶体的特点如下。

优点:

- 1) 其走离角最小,是 BBO 的五分之一,约为 LiIO₃ 的 1/6.5。
- 2) 允许角较宽,是 BBO 的 5 倍多,是 LiIO₃ 的 8 倍多;
- 3) 光谱接受带较宽,约是 BBO 的 1.5 倍,是 LiIO₃ 的 4 倍;

4) 有轻微潮解, 但镀膜后就可以防止。

缺点:

1) 非线性系数低, 是 BBO 的 1/2, 是 LiIO₃ 的 1/4. 5。

2) 允许的温度变化范围小, 是另两晶体的 1/2~ 1/3。

对 LBO 的两个缺点可以采取不同的方法来解决。由倍频公式

$$P_{2\omega} = \frac{2\omega^2 h K_{\omega} M P_{\omega}^2}{\epsilon_0 c^3 \pi n_{\omega}^2} d_{eff}^2 L, \quad (1)$$

知,

$$P_{2\omega} \propto d_{eff}^2 L, \quad (2)$$

(1) 式中, d_{eff} 是该晶体的非线性有效系数, ω 基频波的频率, L 是晶体的长度, K_{ω} 是基波在晶体内的波矢, n_{ω} 为基波在晶体内的折射率, P_{ω} 是基频光在晶体内的功率, c 是光速, h 普朗克常数, ϵ_0 是电导率, M 为考虑激光的多模而引进的因子, 乘以 2 是考虑到内腔倍频激光在晶体内的两个传播方向。由 (2) 式知, 虽然 d_{eff} 较小, 但可以通过增加 LBO 的长度 L 使倍频效率保持较高, 而 LBO 的走离角非常小, 所以该措施是切实可行的。对 LBO 采取制冷措施来控制温度变化。所以说 LBO 有可能代替 KN 成为倍频蓝光具有广泛应用价值的倍频材料。

2.3 被动 Q 开关晶体

当前, 新出现的被动调 Q 吸收体是 Cr⁴⁺: YAG 晶体, 与传统的有机染料和色心晶体相比, 该晶体具有吸收截面大、饱和光强低、热导性能好、损伤阈值高、使用方便以及使用寿命长等优点, 非常适合对 Nd³⁺: YAG 激光器进行被动调 Q^[16]。S. Spiekermann, H. Karisson, and F. Laurell 用该晶体作被动调 Q 吸收体, 用 Nd³⁺: YAG 作增益介质, 用 PPKTP 作腔内倍频晶体, LD 端泵, 得到峰值功率为 660W, 平均功率为 285mW 的 473nm 蓝光激光^[17]。

3 LD 端泵腔内倍频蓝光谐振腔的类型

对于中小功率而言, LD 最基本的泵浦方式是端泵, 如图 1^[18]。由于端面泵浦在功率较小时, 泵浦光束与谐振腔模式匹配良好, 增益介质对泵浦光的吸收十分充分, 激光输出极易实现基模, 因而阈值泵浦功率低, 斜效率高。因而, 被广泛应

用于蓝光激光器中。

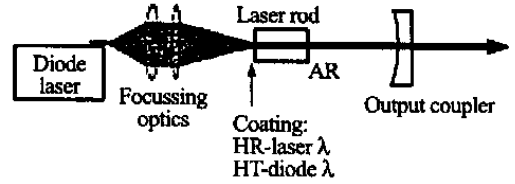


图 1 LD 端面泵浦直腔

Fig. 1 LD end-pumped linear cavity.

LD 端面泵浦方式除了一个 LD 外, 还有人将两个 LD 的泵浦光先进行耦合, 然后再泵浦, 如图 2^[19]。这种方法可以增大 LD 的泵浦功率, 使蓝光的输出功率增大。但整个装置的体积比较大, 泵浦光在未进入增益介质前, 就有一部分损失, 不利于产业化所采用。

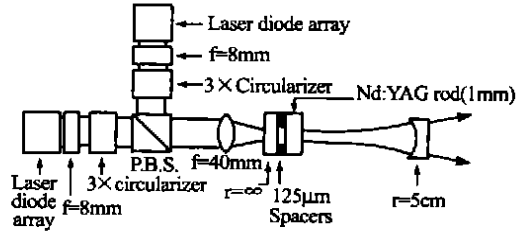


图 2 两个 LD 耦合端面泵浦结构

Fig. 2 Two LD coupled setup.

LD 泵浦腔的结构除了直腔外, 还有折叠腔 (包括“V”型腔, 如图 3^[20]; “Z”型腔, 如图 4^[7])。折叠腔与直腔相比, 其特点是: (1) 热透镜效应的焦距容许的变化范围大; (2) 可以提高倍频输出功率。“V”型腔与“Z”型腔相比, 其特点是: (1) “V”型腔的稳定范围窄; (2) “V”型腔的模参数随热透镜效应的焦距的变化较显著; (3) “V”型腔子午面和弧矢面上的模半径相差较大; (4) 由于“V”型腔内元件和光路转折比“Z”型腔少, 因而相应的腔内损耗更低一些^[21]。

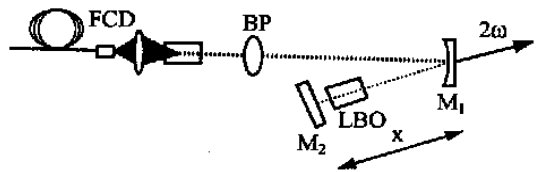


图 3 “V”型腔

Fig. 3 “V”-shaped cavity.

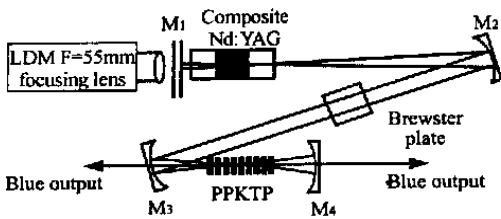


图 4 “Z”型腔

Fig. 4 “Z”-shaped cavity.

4 蓝光激光器发展所面临的难题

1) 镀膜技术的成熟与否, 将成为蓝光激光器发展的一个制约因素。由于目前产生蓝光所用的激光材料是 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄。这两种材料经 LD 泵浦, 产生 1064nm 的红外光的强度最强, 而 946nm 和 914nm 的红外光较弱。要得到 946nm 或 914nm 的红外光, 须在同一端面镀 1064nm 的高透膜和 946nm 或 914nm 的高反膜。这种条件的膜目前来说, 其成功率极低。因此说蓝光激光器的进一步发展在一定程度上将依赖于镀膜技术的不断提高。镀膜成功率的提高将会降低镀膜成本, 进而降低蓝光激光器的生产成本, 开创蓝光激光器产业化发展的新局面。

2) “蓝光噪声问题”可能是蓝光激光器所面临的又一个难题。和“绿光噪声问题”一样, 蓝光噪声影响输出激光的稳定性和光束质量, 限制了蓝

光在高密度光储存、数字视频技术、海洋水色、水下通讯等领域的应用。因此, 低噪声和单频蓝光激光器的研究将成为新的课题。

5 结束语

尽管 LD 泵浦腔内倍频蓝光激光器面临着许多困难, 但我们完全相信, 随着广大激光研究者的不断努力和镀膜技术的日臻完善, 蓝光激光器将会有以下几个方面的进展:

1) 朝着小型化发展。由于蓝光被应用于流动血球计数和作为癌症早期观察和检测的光源、高密度光存贮、数字视频技术, 所以需要小型化。

2) 沿大功率方向: 首先, 前面提到侧面泵浦能在一定程度上解决镀膜问题。其次, 由于激光材料的破坏阈值, 材料的光学性质随温度的变化和其它光学元件的限制, 端面泵浦功率不能太高。此外, 当 LD 的功率增大时, 所花成本很高。而作为大功率激光器来说, 侧面泵浦的强度离破坏阈值较远, 同时侧面泵浦还解决了其它光学元件的限制问题。但侧面泵浦的阈值功率较高, 因而非常适用于大功率输出器件。另外, 在彩色激光显示、海洋水色、海洋资源探测及水下通讯等方面具有广泛的应用, 因此需要大功率。

3) 蓝光激光器也会象绿光激光器那样得到更加广泛的应用, 并开创其产业化发展的新局面和新的应用领域。

参考文献:

- [1] Fan T Y, Byer R L. Model and CW operation of a quasi- three- level 946 nm Nd: YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1987, QE- 23: 605- 612.
- [2] Fan T Y, Byer R L. Continuous- wave operation of a room temperature, diode- pumped, 946- nm Nd: YAG laser [J]. *Opt. Lett*, 1987, 12: 809- 811.
- [3] Risk W P, Lenth W. Room temperature, CW 946 nm Nd: YAG; laser pumped by laser- diode- array and intracavity frequency doubling to 473 nm [J]. *Opt. Lett*, 1987, 12: 993- 995.
- [4] Huber G. Advances in solid- state lasers [R]. [Extended Abstracts of the Fourth German- Vietnamese Seminar on Physics and Engineering (GV S4), Dresden, 2001.
- [5] Lv L, Wang L, Fu P, et al. Diode- pumped self- Q- switched single- frequency 946- nm Nd³⁺, Cr⁴⁺: YAG microchip laser [J], *Opt. Lett*, 2001, 26(2): 72- 74.
- [6] Zeller P, Peuser P. Efficient, multiwatt, continuous- wave laser operation on the ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ transitions of Nd: YVO₄ and Nd: YAG [J], *Opt. Lett*, 2000, 25(1): 34- 36.
- [7] Pierrou M, Laurell F. Generation of 740 mW of blue light by intracavity frequency doubling with a first- order quasi- phase- matched KTiOPO₄ crystal [J]. *Opt. Lett*, 1999, 24(4): 205- 207.

- [8] 刘伟仁. LD 泵浦的 946nm Nd: YAG 激光器及腔内倍频 473nm 蓝光输出[J]. 激光杂志, 2000, 21(3): 12- 13.
- [9] 刘伟仁. LD 泵浦的室温运转内腔倍频 473nm 全固态蓝激光器[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(2): 133- 135.
- [10] 李瑞宁, 来引娟, 余建华, 等. LD 抽运 Nd: YAG 内腔倍频全固化蓝光激光器[J]. 激光与光电子学进展. 2001, 9.
- [11] 刘伟仁. LD 泵浦的 473 nm 波长全固态蓝激光器的研究[D]. 中科院长春光机所博士学位论文, 1999.
- [12] Wang Z, Sun L, Zhang S, *et al* . Investigation of LD end- pumped Nd: YVO₄ crystals various doping levels and lengths [J]. *Optics & laser technology*, 2001, 33: 47- 51.
- [13] Chen Y F, Liao C C, Lan Y P, *et al* . Design of efficient high- power diode- end- pumped TEM₀₀ Nd: YVO₄ laser [J]. *SPIE*, 2000, 3929: 116- 121.
- [14] Seelert W, Kortz P, Rytz D, *et al* . Second- harmonic generation and degraion in critically phase- matched KNbO₃ with a diode- pumped Q- switched Nd: YLF laser[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(20): 1432- 1434.
- [15] Kellner T, Heine F, Huber G. Efficient laser performance of Nd: YAG at 946nm and intracavity frequency doubling with LiIO₃, β- BaB₂O₄, and LiB₃O₅[J]. *Appl. Phys. B*, 1997, 65: 789- 792.
- [16] Shimony Y, Burshtein Z, Kalisky Y. Cr⁴⁺: YAG as passive Q- switch and Brewster plate in a pulsed Nd: YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1995, QE31: 1738- 1741.
- [17] Spiekermann S, Karisson H, Laurell F. Efficient frequency conversion of a passively Q- switched Nd: YAG laser at 946nm in periodically poled KT iOPO₄[J]. *Appl. Opt*, 2001, 40(12): 1979- 1982.
- [18] Agnesi A, Reali G. Diode- pumped all state lasers: solutions for scientific, bio- medical and industrial applications[J]. *SPIE*, 1997, 3423: 13- 28.
- [19] Risk W P, Lenth W. Room- temperature, continuous- wave, 946- nm Nd: YAG laser pumped by laser- diode arrays and intyacavity frequency doubling to 473 nm [J]. *Opt. Lett*, 1987, 12(12): 993- 995.
- [20] Agnesi A, Reali G C, Gobbi P G. 430- mW single- transverse- mode diode- pumped Nd: YVO₄ laser at 671 nm [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1998, 34(7): 1297- 1300.
- [21] 刘均海. 高功率半导体激光器端面抽运连续固体激光器谐振腔的设计[J]. 中国激光. 2000, 27(1): 7- 10.

Investigation of the LD pumped all solid state blue laser

ZHOU Cheng, YE Zi_qing, ZHENG Quan, QIAN Long_sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: Research on the all_solid_state blue laser has become a focus point in the laser field because of its applications in many fields and potential value of commerce. This paper introduces the developing history and conditions of the LD- pumped all solid- state blue laser, discusses gain media, frequency- doubled crystals, Q- switched crystals and configurations of the cavities, which are linear, “v”- shaped and “z”- shaped. The “blue noise problem” and coating technology are reported. And the developing direction of high power and compactness is pointed out.

Key words: LD pump; solid- state blue laser; gain medium; frequency- doubled crystal; “blue noise problem”

作者简介: 周 城(1974—), 男, 山东省夏津县人, 现在中科院长春光机所攻读硕士学位, 主要研究方向为 LD 泵浦固体激光器。