

全固化 SHG 蓝光激光器的研究

黄元庆

(厦门大学科学仪器与精密机械系, 厦门 361005)

杜 晖

(广西应用物理研究所, 广西 530003)

摘要 介绍了一种新型结构的全固化二次谐波(SHG)蓝光激光器。该器件用波长 860nm 的激光二极管作基频光源, 采用 KTP 晶体作为非线性倍频器并装在半共焦谐振腔内。由一个偏振器与一个 $\lambda/4$ 波片组成光隔离器, 而偏振器的一个端面与一个球面输出镜组成半共焦腔。可获得功率 2mW、波长 430nm 的蓝光激光的稳定输出, 且二次谐波激光束为高斯分布。

关键词 半导体激光, KTP 倍频器, 蓝光激光器

1 引 言

气体蓝光激光器由于存在效率低、尺寸大、价格高、寿命短等问题, 面对高密度光存储及改善激光打印机性能等关键技术的急迫需要, 显得力不从心。因此, 强烈希望有商品化的小尺寸全固化激光器发射蓝光激光, 以便克服气体蓝光激光器的上述缺点。目前, 国内外正竞相在这个领域开展研究工作。

实现全固化蓝光激光器主要有三种途径: (1) 半导体蓝光激光器。该类器件由于在材料、工艺及内部欧姆电接触等方面存在问题, 目前, 只能在低温下运转, 但是功率、寿命均尚未达到实用化; (2) 频率上转换法蓝光激光器。它包括和频与光纤上转换蓝光激光器, 目前的研究工作仍处在实验室阶段; (3) SHG(Second Harmonic Generation) 法产生的蓝光激光器。这种激光器的研究工作在整个全固化蓝光激光器研究领域进展最快。94 年美国相干公司已向市场推出 D³430 型蓝光激光器新产品。该激光器用 KNBO₃ 作为非线性倍频器, 对 860nm 波长的激光倍频, 获得波长 430nm、10mW 功率的蓝光激光输出^[1]。这是至今为止唯一的一种全固化蓝光激光器的商品。

微小型全固化 SHG 蓝光激光器大致有两种结构型式。一种是用半导体激光泵浦诸如: Nd:YAG 等激光晶体, 输出的红外激光再由非线性晶体倍频, 获得蓝光激光输出。这种器件结构复杂、体积大、价格也高, 且非线性晶体对 946nm 的激光存有再吸收, 因此转换效率也低。另一种是采用对红外半导体激光直接倍频, 而获得蓝光激光输出。由于该类器件体积中等(仅次于半导体蓝光激光器件)、价格低、结构简单, 是一种比较有应用前景的蓝光激光器。

本研究是针对目前第二种 SHG 蓝光激光器件存在的问题, 采用最简单的光学隔离器与半共焦腔新颖结构, 获得稳定的蓝光激光输出。

2 实验装置

本研究器件的装置示意图,如图 1 所示,图中 LD 是发射 860nm 波长的激光的二极管, L_1 与 L_2 为光学球面透镜组成耦合聚焦光学系统,其焦距分别为 4.5mm 和 20mm; PM 与 WP 分别是偏振镜和 $\lambda/4$ 波片,它们组成光学隔离器; KTP 是非线性倍频晶体,尺寸为 3mm \times 3mm \times 5mm; M 是谐振腔输出镜,曲率半径 R 为 70mm; PM、M 及 KTP 三者组成非线性倍频谐振腔,腔长 46mm. 为减少基频光的损耗,提高光-光转换效率,即倍频光的输出功率, L_1 、 L_2 与 WP 双面及 PM 的输入面均镀 860nm 光的增透膜; KTP 棒的输入端镀 860nm 增透、430nm 全反的双色膜;其输出端镀对 860nm, 430nm 增透的双色膜; M 镜内侧表面镀对 860nm 全反, 430nm 增透的双色膜,其外侧表面镀 430nm 增透膜. 其工作原理是: 由 LD 发出的 860nm 基频光经耦合准直,再由 L_2 聚焦耦合进入 KTP 晶体内; PM 的作用是让偏振面与其光轴平行的线偏振光通过;光轴与入射光偏振面成 45 度放置的 $\lambda/4$ 波片,使由 M 反射返回通过它的 860nm 波长的偏振光的偏振面旋转 90 度;而与 PM 的偏振方向相互垂直,不能返回 LD 光源干扰基频光源的稳定性,达到光学隔离作用;KTP 是使 860nm 基频光变成 430nm SHG 倍频蓝光,并由 M 镜输出;谐振腔的作用是使 860nm 基频光封闭在腔内,以提高倍频效率.

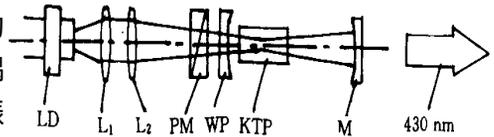


图 1 带有外倍频器谐振腔的 SHG 蓝光激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure of SHG blue laser with a external double resonator.

3 理论分析与实验结果

根据电动力学的理论分析,可得出 SHG 的倍频效率 η 为^[2]

$$\eta = \frac{8\pi^2\omega^2}{c^3 n_{\omega} n_{2\omega}} d_{\text{eff}}^2 L^2 \left(\frac{P_{\omega}}{A_{\text{eff}}}\right)^2 \left[\frac{\sin \frac{\Delta k L}{2}}{\frac{\Delta k L}{2}}\right]^2. \quad (1)$$

式中, ω 是基频光频率, n_{ω} 与 $n_{2\omega}$ 分别为基频光和倍频光的折射率, c 为真空光速, d_{eff} 为倍频晶体的有效非线性系数, L 为倍频晶体长度, P_{ω} 为基频光功率, A_{eff} 为光在倍频晶体中的有效光斑, Δk 为波矢差, $\Delta k = 2k_{\omega} - k_{2\omega}$, k_{ω} 与 $k_{2\omega}$ 分别为基频光与倍频光波矢.

当实现位相匹配时, $\Delta k = 0$, 此时,

$$\frac{\sin \frac{\Delta k L}{2}}{\frac{\Delta k L}{2}} = 1, \quad (2)$$

为最大值, 那么 η 变成

$$\eta = \frac{8\pi^2 \omega^2}{c^3 n_{\omega}^2 n_{2\omega}} d_{\text{eff}}^2 L^2 \left(\frac{P_{\omega}}{A_{\text{eff}}} \right)^2. \quad (3)$$

由此可见, 要获得高的倍频转换效率, 在实现位相匹配的情况下, 可采用: (1) 选择非线性倍频系数大的倍频晶体, (2) 增大倍频晶体长度, (3) 提高基频光的功率密度.

目前, 在近红外波段非线性最大的要算 KNBO₃ 倍频晶体, 但该晶体其吸收带宽仅几埃, 对温度的容许幅度仅为 0.1°, 非常窄, 需要精确的温度控制. KTP 倍频晶体虽然线性系数比 KNBO₃ 小, 但其对温度、角度、波长变化不敏感, 可很容易实现非临界相位相匹配. 因此本实验采用 KTP 倍频晶体而不采用 KNBO₃ 倍频晶体.

若基频光经光学耦合系统变换后在 KTP 晶体中的焦斑半径为 W_1 , 那么(1)式中的 $A_{\text{eff}} = \pi W_1^2$. 因此, 在晶体长度 L 不变的情况下, 要提高基频光在倍频晶体中的功率密度, 除了增大基频光功率 P_{ω} 外, 就是设法减小 W_1 的尺寸, 通常是采用短焦距的光学透镜聚焦. 但 W_1 不能无限小, 还必须考虑基频光的模与谐振腔激光模之间的匹配. 实验已验证, 当基频光焦斑 W_1 与倍频器谐振腔基模束腰 W_0 大小近似相等时, 能获得高的转换率以及 TEM₀₀ 模输出. 通常半导体激光出射的光束是矩形光束, 经光学系统变换后在 KTP 晶体内呈椭圆焦斑, 而不是理想的圆焦斑 W_1 . 这种椭圆高斯光束沿 z 方向传播时的光强分布形式为:

$$\exp\left[-2\left(\frac{X^2}{W_x^2(z)} + \frac{Y^2}{W_y^2(z)}\right)\right], \quad (4)$$

其中 $W_x(z)$ 、 $W_y(z)$, KTP 晶体中光斑大小可由下式表征:

$$W_x = \left[\frac{1}{L} \int_0^L W_x^2(z) dz \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$W_y = \left[\frac{1}{L} \int_0^L W_y^2(z) dz \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

选择基频光焦斑大小的原则是取 W_x 、 W_y 中的较小值. 若 $W_x < W_y$, 则令 $W_x = W_1$. 用激光高斯光束传输理论计算可知 $W_1 = W_x = 0.08\text{mm}$, 其相应的瑞利准直范围 Z_R 内为^[3]:

$$Z_R = \frac{1}{2} k_{\omega} W_1^2 \quad (6)$$

$$Z_R = 23\text{mm}$$

式中 k_{ω} 为基频光波矢. 由于基频光处于聚焦状态, W_1 焦斑实际上就是决定聚焦孔径角 u , 它与晶体长度 L 之间有一定的内在关系. 一般是使晶体完全处于瑞利准直范围 Z_R 内 (在该范围内基频光束几乎是平行光束). 有极小值 u 角. 由于 L 等于 5mm 小于 23mm, 所以 KTP 晶体完全处于瑞利范围内, 从而 $u < \Delta\theta_n$, KTP 晶体最大允许位相匹配偏离角, 此处 $\Delta\theta_n = 5^\circ$, 故可实现临界相位相匹配.

为获得谐振腔较小的激光基模腰斑 W_0 , 本装置采用半共焦谐振腔结构. 根据激光理论 W_0 的大小为^[3]:

$$W_0 = \left(\frac{L\lambda}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

式中 L 为腔长, λ 为基频光波长. 把有关数值代入上式可得: $W_0 = 0.08\text{mm}$. 若 KTP 晶体中心距 PM 内侧表面 8mm 处, 此时光斑 $W(z)$ 为^[3]:

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{2z}{L} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

计算得 $W(z) = 0.089\text{mm}$, W_1 与 $W(z)$ 近似相等, 可实现很好的模式匹配.

当波长 860nm 的基频光输出的 300mW 功率 P_w 经光学系统耦合进入 KTP 倍频器谐振腔内时, 可获得 2mW 的 430nm 二次谐波激光输出. 输出功率 P_{2w} 与输入功率 P_w 之间的关系, 如图 2 所示. 光-光转换效率为 0.6% , 输出 TEM₀₀ 模, 光强呈高斯形状分布, 如图 3 所示. 利用本装置的光学隔离器, 可使 SHG 功率稳定度达 5% .

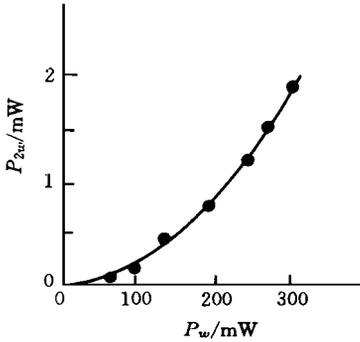


图 2 SHG 输出功率与基频光输入功率关系图

Fig. 2 Output power of SHG versus input power of fundamental frequency.

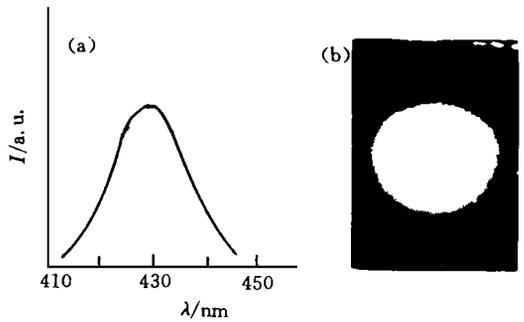


图 3 SHG 输出光强 $I/a.u.$ 分布图

(a) 高斯光束, (b) TEM₀₀ 模

Fig. 3 SHG laser beam intensity $I/a.u.$ profile. (a) Gaussian beam, (b) TEM₀₀ mode.

4 结束语

根据公式(1)理论计算得光-光转换效率 η 为 31% , 实验结果仅为 0.6% , 两值相差甚远, 其主要原因是基频光经偏振镜、 $\lambda/4$ 波片耦合及光学系统的损耗已超 50% ; 偏振镜内侧表面未镀膜, 基频光未能完全封闭; 基频光是一束象散光束, 用普通光学透镜聚焦, 在 KTP 晶体内仍为一束象散的高斯光束, 有相当一部分光能对二次谐波的产生不能作出贡献, 等等. 如果进一步完善这些问题, 其输出功率必将得到有效增加.

本器件结构具有通用性, 可用于产生其它 SHG 波长的微小型全固化激光器件上.

参 考 文 献

- [1] 陈云生, 张荣康, 激光与光电子学进展. 1995, 12: 45.
- [2] Eger D, Oron M, Katz M *et al.*, J. Appl. Phys., 1990, 77(5): 2205.
- [3] Srelto O. Principles of Lasers, Plenum Press, New York, 1982, 129.

STUDY OF ALL SOLID-STATE SHG BLUE LASER

Huang Yuanqing

(*Dept. of Sci. Instr. and Precision Mech, Xiamen University, Xiamen, 361005*)

Du Hui

(*Institute of Applied Physics, Guangxi, 530003*)

Abstract

In this paper, a kind of new structure of all solid-state SHG blue laser with an external resonant cavity containing a nonlinear crystal is presented. Laser diode at 860nm is used as a fundamental frequency laser source and nonlinear crystal KTP is used for the frequency doubler. The optical isolator is comprised of a polarizer and a waveplate at $\lambda/4$. The half confocal resonator consists of one of end planes of the polarizer and spherical mirror. Stable operation of blue laser of output power of 2mW at 430nm can be obtained, and the distribution of SHG laser intensity is a Gaussian beam.

Key words semiconductor laser, KTP doubler, blue laser