

输出镜反射相移对倍频效率的影响

庄昌辉¹ 王晓忠² 蔡志平² 魏 栋¹

(¹ 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005; ² 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要 利用 Macleod 反射相移理论, 模拟 V-型腔 457 nm Nd:YVO₄ 蓝光激光器输出镜多层膜反射相位偏移。结合 I 类匹配 LBO 倍频晶体的倍频特性, 讨论了输出镜反射膜对腔内基光偏振特性造成的影响, 及其对 I 类相位匹配倍频效率的影响。研究发现, 当基频光在输出镜处, 入射角不大于 15° 的情况下, 造成的反射相移小于 2°。在近似相位匹配下, 倍频效率相对于理想情况降低幅度不超过 6%。

关键词 腔内倍频; 多层膜反射相移; Macleod 反射相移理论; Nd:YVO₄ 蓝光激光器

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0070

Influence of the Reflection Retardance in Output Lens on Frequency-Doubling Efficiency

Zhuang Changhui¹ Wang Xiaozhong² Cai Zhiping² Wei Dong¹

(¹ Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China
² Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract Reflection retardance induced by multi-optical coatings in output mirror of an all-solid-state single frequency V-shaped 457 nm Nd:YVO₄ blue laser is reported with the theory of reflection-induced retardance by Macleod. Combining with the frequency-doubling theory of elliptical Gaussian beam under the conditions of critical phase matching, especially in type I LiB₃O₅ (LBO) crystal, we discussed the influence the multi-optical coatings in output mirror on polarizing characteristic of intracavity fundamental frequency light and frequency-doubling efficiency. Research indicates that when the induced angle in output mirror is less than 15°, the reflection-induced retardance is less than 2°. Furthermore, in the approximations of the exact phase matching, compared with the ideal case, the frequency-doubling efficiency reduced by multi-optical coatings is not more than 6%.

Key words intracavity frequency doubling; reflection-induced retardance in multi-coating; theory of reflection-induced retardance by Macleod; blue laser Nd:YVO₄

1 引 言

激光电视作为一种新兴的显像技术, 因其优良的特性及广阔的应用前景, 受到了广泛的关注^[1~3]。蓝光激光器作为激光成像的三原色之一, 是激光电视的重要组成部分。相对于红光及绿光激光器, 其研制难度比较大, 因此成为关注的焦点。近年来, 蓝光激光器在输出功率以及光束质量上都取得了很大的进展^[4~6]。

在以 Nd:YVO₄ 为激光晶体产生蓝光的激光器

中, 基频光的偏振特性对倍频效率影响很大^[7~10], 但输出镜反射膜反射相移^[11,12]对基频光偏振特性的影响却鲜为人知。本文讨论了输出镜多层镀膜对腔内基光偏振特性造成的影响, 及其对 I 类相位匹配倍频效率的影响。

2 实验装置及基本原理

腔内倍频 547 nm Nd:YVO₄/LBO 蓝光激光器的实验装置如图 1 所示。该实验由耦合光学系统, 温控

基金项目: 福建省自然科学基金重点基金。

作者简介: 庄昌辉(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事全固态连续蓝光激光器方面的研究。

E-mail: youguang29@yahoo.com.cn

导师简介: 蔡志平(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事 LD 抽运薄片激光技术与激光动力学, 光纤通信中的重要关键器件等方面的研究。E-mail: zpcai@xmu.edu.cn

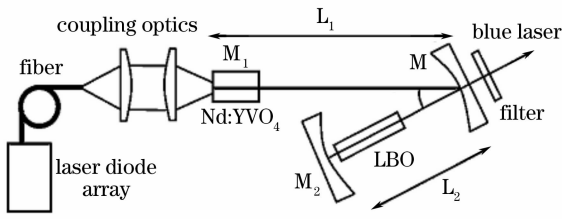


图 1 腔内倍频 Nd:YVO₄/LBO 457 nm 蓝光激光器实验装置图

Fig.1 Experimental setup of the intracavity frequency-doubled 457 nm Nd:YVO₄/LBO blue laser

系统和谐振腔系统组成。抽运源是输出光束直径 400 μm, 数值孔径 0.22, 最大输出功率 30 W 的连续输出半导体激光器。通过温控调节, 其输出中心波长可限定在 Nd:YVO₄ 的吸收峰(807.5 nm)。抽运光经两个平凸镜 1:1 地准直和聚焦后入射到 Nd:YVO₄ 的中间, 光束在晶体中的束腰半径为 220 μm。激光晶体为 5 mm 长, 0.1% Nd³⁺, 其左边镀 808 nm 高透, 914 nm 高反, 使其作为腔镜 M₁。晶体右面在 914nm, 1064nm, 1342nm 波段高透, 以减少 914nm 光

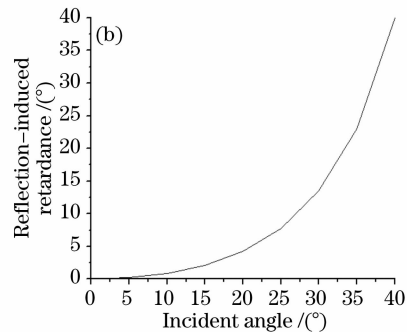
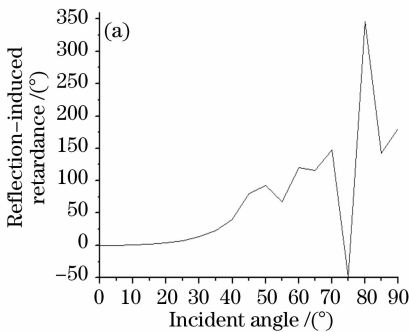


图 2 多层膜反射相移与入射角的关系曲线

Fig.2 Reflection-induced retardance in multi-coatings versus incident angle from 0° to 90° (a) and from 0° to 40° (b)

3 反射相移对倍频效率的影响

Nd:YVO₄ 晶体受激辐射发出的沿 z 方向的线偏振光, 在腔镜 M 处, 经过反射, 分成相互垂直的 p 偏振方向的 E_p 和 s 偏振方向的 E_s , p 和 s 分别为垂直于入射面和平行于入射面的两本征偏振方向, E_p 和 E_s 为两方向上相应的电场强度, 他们的频率都为基频光的频率 ω 。此时,

$$\begin{aligned} E_p &= E \exp(j\Delta_1) \cos \theta, \\ E_s &= E \exp(j\Delta_2) \sin \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 E 为线偏振光电场强度, $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$ 为相位偏移值。 θ 为 E 与 E_p 间的夹角。

LBO 晶体是一种非常优良的非线性光学晶体, 有较大的非线性系数, 大的接受角和温度接收范围,

的损耗, 并有效降低 1064 nm 及 1342 nm 光的起振。镜 M 镀 914 nm 高反, 457, 1064, 1342 nm 高透。镜 M₃ 在 457 nm, 914 nm 高反, 1064 nm, 1342 nm 波段高透。腔壁 L_1 取 69 mm。腔壁 L_2 取 39 mm。两臂夹角 α 约 12°。LBO 为 3 mm × 3 mm × 15 mm, 采用 I 类相位匹配。整个系统采用 TEC 实现制冷。

激光晶体 Nd:YVO₄ 受激辐射产生的 914 nm 基频光在腔内实现 TEM₀₀ 模单模运转, 即为一线偏振光。在腔镜 M₁, M₂ 处, 由于是垂直入射, 将不产生相位偏移, 而腔镜 M 离轴放置, 腔内光线与其成一入射角 α , 如图 1 所示, 将导致相位偏移, 形成椭圆偏振光, 进入倍频晶体 LBO。三个腔镜为实现设计要求, 采用多层镀膜^[12]。多层膜光学特性的分析一般采用矩阵法^[13]。使用软件 MathCAD 7.0 进行计算机仿真, 计算出输腔镜 M 处的反射相移的色散曲线, 如图 2(a) 所示, 当入射角 α 在 0~90° 间变化时, 反射相移色散曲线变化剧烈。

实验中, 一般采用小角度入射 ($\alpha < 15^\circ$), 此时, 从图 2(b), 可以看出, 反射相移不超过 3°。

并且能够在临界相位匹配下实现 914 nm 倍频到 457 nm 的非线性光学过程。在 914 nm 倍频到 457 nm 的过程中, LBO 晶体采用 I 类临界相位匹配方式切割。在 I 类临界相位匹配条件下对 914 nm

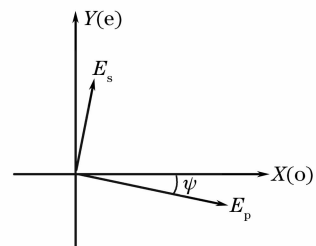


图 3 垂直于入射方向上 LBO 光轴坐标

Fig.3 Coordinate axes choice for the LBO at the plane orthogonal to the cavity axis

波长的光倍频时,如图 3 所示,选择 x 轴, y 轴分别沿着晶体正常光(o 光)和非常光(e 光)的光轴,且平面垂直于腔轴(z 轴)。两种偏振态的基频光经倍频过程转化为单一的偏振态(e 光)的倍频光: $o+o \rightarrow e$ 。基频光沿 o 光方向的总电场强度 E 为

$$E_o(\omega) = E \exp(j\Delta_1) \cos \theta \cos \psi + E \exp(j\Delta_2) \sin \theta \sin \psi, \quad (2)$$

$$E_y(2\omega) = 2\pi i l_c \frac{(2\omega/c)^2}{k_c(2\omega)} X_{yxx}(2\omega; \omega, \omega) (E^2 \cos^2 \theta \cos^2 \psi + 2E^2 \cos \theta \sin \theta \cos \psi \sin \psi \cos \Delta + E^2 \sin^2 \theta \sin^2 \psi). \quad (4)$$

于是,可以得到经过倍频晶体的二次谐波光强

$$I = K [I_1^2 \cos^4 \psi + I_2^2 \sin^4 \psi + 2I_1 I_2 \cos^2 \psi \sin^2 \psi + 4I_1 I_2 \cos \psi \sin \psi \cos \Delta (\cos \psi \sin \psi \cos \Delta + \sqrt{I_1/I_2} \cos^2 \psi + \sqrt{I_2/I_1} \sin^2 \psi)], \quad (5)$$

式中 K 正比于 $(\text{def})^2$ 和 l_c^2 , 并且 $I_1 = E_p^2$, $I_2 = E_s^2$, 是基频光两偏振态的光强。

由(5)式可见,当 $\psi = 0$ 或者 $\psi = \pi/2$ 时,倍频光仅取决于 p 光或 s 光。当入射光为一线偏振光时,根据上式,设 θ 与 ψ 都取 10° , 可得二次谐波光强 I 与反射相移 Δ 的关系,如图 4 所示。由此可见,当反射相移 Δ 在 0 到 180° 逐渐增大时,倍频效率下降。

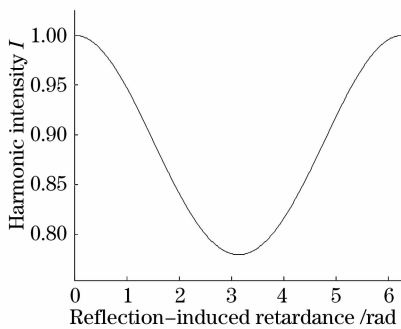


图 4 二次谐波光强与反射相移关系曲线图

Fig. 4 Harmonic in intensity versus reflection-induced retardance

由图 2(a), 可见发射的相位偏移随着入射角度的增大, 变化幅度趋于剧烈, 表明腔内的偏振基频光将无法保持原有的偏振特性。但在小角度入射时, 通过放大的图 2(b), 当入射角小于 15° , 相位偏移量很小 ($< 2^\circ$)。以 15° 角入射为例, 此时相位偏移量为 2.1° 。根据(1)式~(5)式, 当 $\Psi = 10^\circ$ 时, 与理想状态下, 即无相位偏移及严格的相位匹配下的二次谐波光强相比, θ 角在 0° 到 10° 间变化时, 由相移引起的倍频光强的变化不超过 6%, 如图 5 所示。

由图 2 可见, 偏振光发生相位偏移, 变成椭圆偏振光。这样由 V 形腔决定的本征模就是椭圆高斯

式中 Ψ 为两坐标系间的夹角。产生的非线性偏振倍频光 P 为

$$P_y(2\omega) = X_{yxx}(2\omega; \omega, \omega) E_o(\omega) E_o^*(\omega). \quad (3)$$

$X_{yxx}(2\omega; \omega, \omega)$ 为倍频晶体的非线性磁化强度系数, 即 def。

在近似限定场及严格的相位匹配下, 可以推导出二次谐波的电场强度 $E(2\omega)$:

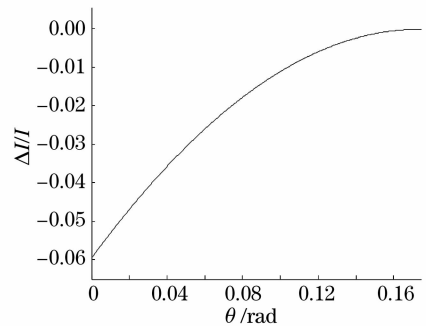


图 5 相对光强变化与反射相移关系曲线图

Fig. 5 Relative intensity versus reflection-induced retardance

光束。一般情况下, 椭圆高斯光束将不利于倍频效率的提高。但如图 5 所示, 当入射角小于 15° , 即相位偏移量很小 (不超过 2°) 时, 对倍频光的影响很小。因此, 在实际应用中, 要尽量减小入射角的大小, 同时应调整 LBO 的 o 光光轴, 使之与椭圆偏振光的长轴重合, 从而有效地提高倍频效率。

4 结 论

讨论了输出镜反射膜对腔内基光偏振特性造成的影响, 及其对 I 类相位匹配倍频效率的影响。研究发现, 在基频光在输出镜 M 处, 入射角不大于 15° 的情况下, 造成的反射相移小于 2° , 在近似相位匹配下, 倍频效率相对于理想情况下降低幅度不超过 6%。

参 考 文 献

- 1 Yang Xiaohui, Tie Bin. The full color laser display technique[J]. *Optoelectronic Technology*, 2007, 27(2): 122~125

- 杨小慧, 铁 斌. 激光全色显示技术[J]. 光电子技术, 2007, **27**(2): 122~125
- 2 Li Yuxiang, Yao Jianquan. Present status of the laser television [J]. *Laser J.*, 2007, **28**(1): 1~2
- 李玉翔, 姚建铨. 激光电视的研究进展及趋势分析[J]. 激光杂志, 2007, **28**(1): 1~2
- 3 Holl Emann G, Braun B. RGB lasers for laser projection displays [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **3954**: 140~151
- 4 Zhe Ma, Daijun Li. Monolithic Nd:YVO₄ slab oscillator-amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(10): 1262~1264
- 5 Q. H. Xue, Q. Zheng, Y. K. Bu *et al.*. High-power efficient diode-pumped Nd:YVO₄/LiB₃O₅ 457 nm blue laser with 4.6 W of output power[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(8): 1070~1072
- 6 Tian Hongbin, Wang Li. Analysis of output characteristics of Nd:YVO₄ and Nd:YAG all-solid-state laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(3): 15~18
- 田宏宾, 王 丽. Nd:YVO₄和Nd:YAB全固态激光器的输出特性的比较分析[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(3): 15~18
- 7 Gao Lanlan, Tan Huiming. Laser diode array pumped Nd:YAG/LBO high power blue laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **42**(9): 1033~1035
- 高兰兰, 檀慧明. 激光二极管阵列抽运 Nd:YAG/LBO 大功率蓝光激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(9): 1033~1035
- 8 Zheng Yaohui, Lu Huadong. All-solid-state high-efficiency high-power Nd:YVO₄/KTP laser of single-frequency operation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(6): 739~742
- 郑耀辉, 卢华东. 全固态高输出功率单频 Nd:YVO₄/KTP 激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 739~742
- 9 Jian Zhang, Michael Quade. Polarization characteristic of a Nd:YAG laser side pumped by diode laser bars[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(30): 7725~7729
- 10 V. N. Petrovskiy, N. M. Prokopova. Diode-pumped Nd:YAG laser with linear and orthogonal polarized components of a radiation at the wavelength 0.532 μm[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(3): 191~195
- 11 Wang Zhengping, Li Qingbo. Theoretical study of the effect of the reflection-induced retardance dispersion upon the sensitivity of an optical current sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1115~1118
- 王政平, 李庆波. 反射相移色散对 OCS 灵敏度影响的理论研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(9): 1115~1118
- 12 Bu Yiku, Zheng Quan, Xue Qinghua. Optical thin films for LD-pumped Nd:YVO₄ 457nm blue lasers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, **26**(4): 330~334
- 卜轶坤, 郑 权, 薛庆华. LD 抽运 Nd:YVO₄ 457 nm 蓝光激光器用光学薄膜[J]. 半导体光电, 2005, **26**(4): 330~334
- 13 Macleod Angus. Polarization in optical coating[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5875**: 587504-1~587504-14