

文章编号: 1001-3806(2006)03-0323-04

可调谐 Yb 光纤激光器 LBO 倍频特性理论研究

戴 明, 柳 强, 闫 平, 巩马理*

(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要: 针对大信号高斯光束聚焦情况, 对平面波耦合波方程进行了改进; 利用改进后的耦合波方程, 分析了 LBO 晶体对掺 Yb 光纤激光整个发射光谱的腔外倍频特性。结果显示, 利用温度调谐, LBO 晶体可以在掺 Yb 光纤的整个发射光谱内达到非临界相位匹配; 随着基频光波长的增加, 倍频效率会有小幅度下降, 可接收角有小幅度增长, 可接收温度宽度和可接收线宽有较大幅度加宽。结果表明, 采取非临界相位匹配, 并选用较长的基频光波, 易于得到理想的倍频效果。

关键词: 激光技术; 带宽; 耦合波方程; 二次谐波产生; 光纤激光器; LBO

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Theoretical analysis of frequency doubling of wavelength-tunable Yb-doped fiber lasers with LBO crystal

DAI Ming, LIU Qiang, YAN Ping, GONG Ma-li

(Department of Precision Instrument and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The couple equations with plan wave have been improved to describe focused Gaussian beam under big signal. With the improved equations, the SHG character of LBO has been analyzed under the condition of broad emission spectra of Yb-doped fiber laser. Main results are summarized as follows: in the case of all the emission spectra of Yb-doped, none critical phase match (NCPM) can be reached by temperature tuning. With increasing of wave length of fundamental beam, the SHG efficiency decreases a little; the acceptable temperature and the acceptable wave length increase greatly; the acceptable angle increases not so obviously. It shows that an ideal SHG result can bring about using none critical phase match and long fundamental wave length.

Key words laser technique; bandwidth; couple equation; second harmonic generation (SHG); fiber laser; LBO

引 言

高亮度绿光对于科学研究、医疗、工业加工和军事等领域都有重要应用意义^[1]。目前调 Q 固体激光器通过倍频已经获得了百瓦级的绿光输出^[2,3], 但由于固体激光器的固有缺陷, 往往光束质量较差^[2], 造成亮度较低。光纤激光器则在提供高功率输出的同时, 可以获得近衍射极限的光束质量^[4], 而且光纤激光在高电光效率、散热性能等方面更有明显的优势。掺 Yb 光纤激光器作为红外光纤激光的代表, 除了拥有光纤激光器的上述优秀特性外, 其极宽的发射光谱也成为显著的特点, 理论分析及试验数据显示, 掺 Yb 光纤发射光谱可从 980nm 到 1100nm^[4-6]。将高转换效率的倍频晶体和掺 Yb 光纤激光器相结合产生高亮度绿光, 越来越引起人们的兴趣。国内外已有试验报道^[1,6,7]。

利用掺 Yb 光纤激光器倍频获得绿光时, 其宽光

作者简介: 戴 明 (1975-), 男, 硕士研究生, 现从事光纤激光器应用技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: gongn@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005-04-12; 收到修改稿日期: 2005-07-03

谱的特点为倍频设计带来了直接的问题, 因为不同的基频波长对倍频晶体的匹配方式、匹配方向、可接收角、可接收线宽、可接收温度宽度等重要参量影响不同。为了获得较好的倍频效果, 深入分析倍频晶体对可调谐 Yb 光纤激光器的倍频特性, 显然十分重要。

1 理论分析

1.1 分析方法

在以往对非线性过程的分析中, 往往以平面波代替高斯光束^[8]。但实际光束为发散高斯光束, 当晶体长度大于 2 倍瑞利长度时, 光束的发散会引起功率密度的严重下降, 从而导致倍频效率的下降。为了能够准确描述大信号聚焦高斯光束相位失配下的倍频特性, 作者改进了平面波形式的耦合波方程。考虑到传播方向沿 z 轴的高斯光束的标量表达式为:

$$\begin{cases} E(z) = \frac{E_0 w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \\ w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \\ z_0 = \frac{1}{2} k w_0^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, k 是光波波矢, r 是径向半径, w_0 是光束束腰, z 是沿光传播方向距束腰处的距离, z_0 是瑞利长度, $w(z)$ 是距束腰为 z 处, 功率为 $1/e$ 处的半径, E 是电场强度, E_0 是 $z=0$ 处的电场强度。

不考虑光束径向分布, 引入修正量:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{z - z_s}{z_0}\right)^2}} \quad (2)$$

式中, z_s 是聚焦光斑位置 (原点在晶体入射端面)。

由于引入了 z_s , (2) 式中 z 的定义更改为: z 是沿入射方向、距晶体入射端面的距离 (后面的公式都利用这个定义)。改进后, 无走离效应的耦合波方程为 (设三波波矢方向都沿 z 轴, 此时波矢可写为标量形式):

$$\begin{cases} \frac{dE_1(z)}{dz} = -\frac{\omega_1^2 \mu_0 \epsilon_0 d_{\text{eff}}}{k_1} \xi E_3 \sin\beta(z) \\ \frac{dE_2(z)}{dz} = -\frac{\omega_2^2 \mu_0 \epsilon_0 d_{\text{eff}}}{k_2} \xi E_3 \sin\beta(z) \\ \frac{dE_3(z)}{dz} = -\frac{\omega_3^2 \mu_0 \epsilon_0 d_{\text{eff}}}{k_3} \xi E_1 E_2 \sin\beta(z) \\ \frac{d\beta(z)}{dz} = \Delta k + \mu_0 \epsilon_0 d_{\text{eff}} \left[\frac{\omega_3^2}{k_3} \frac{\xi E_1(z) E_2(z)}{E_3(z)} - \frac{\omega_2^2}{k_2} \times \right. \\ \left. \frac{\xi E_1(z) E_3(z)}{E_2(z)} - \frac{\omega_1^2}{k_1} \frac{\xi E_2(z) E_3(z)}{E_1(z)} \right] \cos\beta(z) \end{cases} \quad (3)$$

式中, μ_0 是真空导磁率, ϵ_0 是真空电容率, $\beta(z)$ 是三波相位差^[8], d_{eff} 是有效倍频系数, k_1, k_2, k_3 分别为三光波波矢, $\omega_i (i=1, 2, 3)$ 是三波光波频率, $E_i(z) (i=1, 2, 3)$ 是 z 处三波电场强度振幅。

相位失配量计算公式为^[8]:

$$\Delta k = \frac{2\pi}{\lambda_3} n(\omega_3) - \frac{2\pi}{\lambda_2} n(\omega_2) - \frac{2\pi}{\lambda_1} n(\omega_1) \quad (4)$$

式中, $n(\omega_i)$ 是频率为 ω_i 的光波的折射率。

倍频效率计算式为:

$$\eta(z) = \frac{E_3^2(z)}{E_1^2(0) + E_2^2(0)} \quad (5)$$

(5) 式为倍频效率计算公式。改进后的耦合波方程 (3) 式可以描述聚焦光斑大小及聚焦光斑位置对倍频效率的影响。从耦合波方程可以看出, 当基频光波确定后, 对效率产生影响的有: 电场强度 E 、有效非线性系数 d_{eff} 以及光束失配量 Δk 。

在 NCPM 条件下 ($\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$), d_{eff} 不随波长的变化而变化^[9]。相位失配量 Δk 是晶体温度 T 、基频光波长 λ 及角度偏差 $\Delta\theta, \Delta\varphi$ 的函数。

$$\begin{aligned} \Delta k(T, \delta\theta, \lambda) &\approx \Delta k(0) + \frac{\partial(\Delta k)}{\partial T} \Delta T + \\ &\frac{\partial(\Delta k)}{\partial\theta} \Delta\theta + \frac{\partial(\Delta k)}{\partial\varphi} \Delta\varphi + \frac{\partial(\Delta k)}{\partial\lambda} \Delta\lambda \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\Delta k(0) = 0$ (相位匹配情况)。当作用于非临界相

位匹配时, 角度项的一阶微分为 0 此时二阶微分项起主要作用, 失配量和 $\Delta\theta, \Delta\varphi$ 的平方成正比。

1.2 晶体选择

选择 LBO 晶体作为研究对象。LBO 为 mm2 点群双轴晶体, 具有较高的非线性系数 (约为 KDP 的 3 倍)、很高的损伤阈值, 及良好的温度调谐特性, 较容易获得非临界相位匹配 (NCPM) 条件。当晶体在非临界相位匹配下工作时可以得到较宽的接受角 ($\Delta\theta, \Delta\varphi$), 且走离角为 0^[8]。图 1 为利用 LBO 晶体色散方程^[10], 计算得到 类匹配情况下, 非临界相位匹配温度 (T_{NCPM}) 随波长的变化情况。

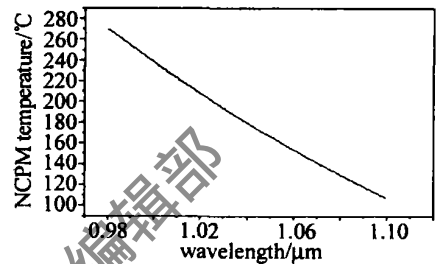


Fig 1 Relationship between NCPM temperature and wavelength for LBO type phase match

从图中可以看出, LBO 晶体在波长 980nm ~ 1100nm 的 T_{NCPM} (107°C ~ 270°C) 十分符合实际试验条件。可以在掺 Yb 光纤激光的整个发射谱段实现 NCPM 条件。因而, 将在 NCPM 条件下分析倍频特性。

选取 980nm, 1030nm, 1064nm, 1080nm, 1100nm 作为参考点, 取归一化效率, 设定功率密度为 $I_0 = 200 \text{ MW/cm}^2$, 晶体长度选择为 25mm, 聚焦光斑 $w_0 = 60 \mu\text{m}$ 。

2 结果分析

2.1 倍频效率

图 2 为 NCPM 条件下, 倍频效率随波长的变化, 其中横坐标为晶体长度。计算结果显示在功率密度、晶体长度、聚焦光斑大小都不变的情况下, 倍频效率会随着波长的增加而小幅度下降。

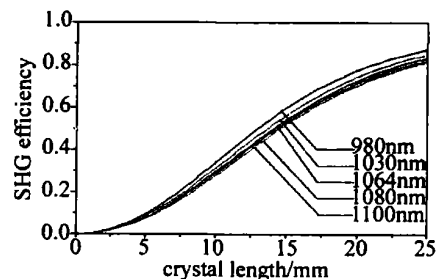


Fig 2 Variation of SHG efficiency due to change of wavelength type phase match ($P = 11 \text{ kW}, w_0 = 60 \mu\text{m}$)

从耦合波方程 (3) 式分析可知, 在相位匹配情况下, 与波长有关的因素只有 $(\omega_i^2/k_i) (i=1, 2, 3)$, 化简

后有 $\omega_i^2 k_i = 2\pi c^2 / (\lambda_i n_i)$, 其中 c 为光速, λ_i 为真空中波长, n_i 为相对于 λ_i 的折射率。

从图 3 可以看到, 基频光和倍频光的 $(\lambda_i \cdot n_i)$ 都随波长单调递增。故当波长增加时倍频效率会有所下降。

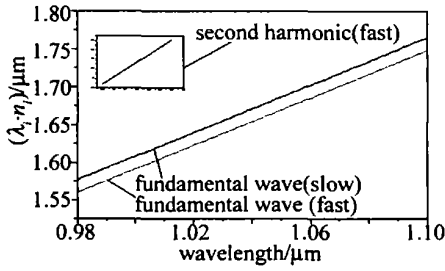


Fig 3 $(\lambda_i \cdot n_i)$ versus wavelength

2.2 可接收角

图 4 和图 5 分别为匹配 θ φ 角偏离中心值时, 倍频效率的变化情况, 计算结果显示, 在 NCPM 条件下, 接受角 $\Delta\theta$ $\Delta\varphi$ 随波长变化极小。从 980nm 到 1100nm, $\Delta\theta$ 的变化只有 0.21°, 约为 980nm 时可接收角的 15%。

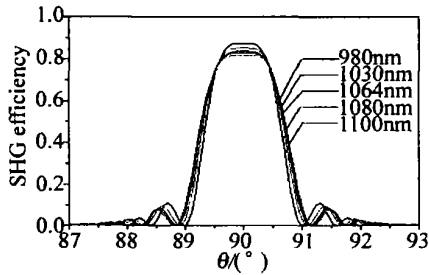


Fig 4 Relationship between SHG efficiency and θ under different wavelengths

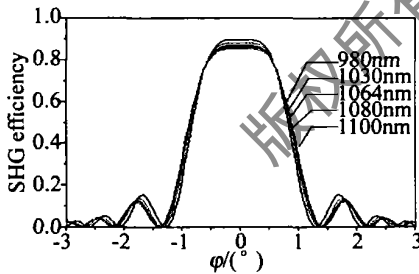


Fig 5 Relationship between SHG efficiency and φ under different wavelengths

2.3 可接收线宽

图 6 为在不同的中心波长下, 倍频效率随波长偏

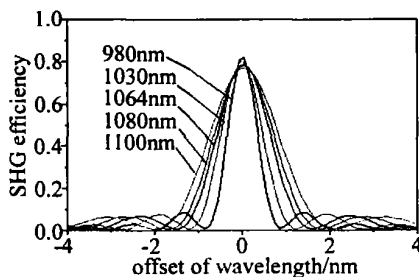


Fig 6 Variation of SHG efficiency due to offset of wavelength under different fundamental wavelengths

移量的变化。从图中可以看到, 可接收线宽随波长的增加, 有比较明显的增长。在 980nm 的情况下, 计算所得接收线宽为 0.76nm; 1100nm 时为 1.81nm, 是 980nm 时的 2.4 倍, 这对于基频光光源的选择是十分有意义的, 可以有效地降低对基频光源窄线宽的要求。

2.4 可接收温度宽度

图 7 为温度偏离最佳温度对倍频效率的影响。可以看出, 随波长的增大, 可接收温度宽度也有较明显的增加。在 980nm 时, 可接收温度为 1.26°C; 1100nm 时, 约为 1.91°C。

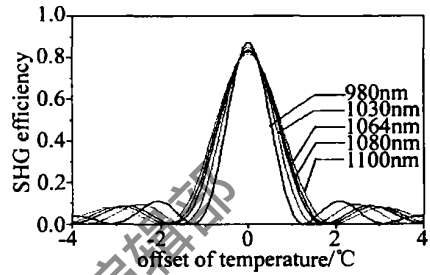


Fig 7 Variation of SHG efficiency due to offset of wavelength under different fundamental wavelengths

表 1 为计算所得以上各个参量的半峰宽度值。可以看出随着波长增加, 各参量可接收带宽分别有不同程度的增加, 其中 $\Delta\lambda$, ΔT 增长较为明显。

Table 1 Bandwidth of LBO for type phase match under condition of NCPM

wavelength/nm	980	1030	1064	1080	1100
$\Delta\theta/(^\circ)$	1.44	1.53	1.59	1.63	1.65
$\Delta\varphi/(^\circ)$	1.89	1.96	2.01	2.04	2.06
$\Delta\lambda/\text{nm}$	0.76	1.08	1.38	1.55	1.81

图 8 图 9 为利用作者的模型对文献 [1] 中的数据进行了模拟所得结果。文献 [1] 中, 中心波长为 1080nm, 腰斑半径 56 μm , 峰值功率 2.4kW。当晶体长度为 50mm 时, 计算得出最佳倍频效率为 72.4%。文献中试验数据为 54.5%, 两者符合得比较好 (不考虑光束发散时计算所得效率为 86.2%)。但计算所得 NCPM 温度 (129.3°C) 略低于文献 [1] 中数据 (约 133.6°C), 有可能是晶体参数的差异, 以及试验中的其它相位失配用温度调谐补偿时导致了温度略高。计

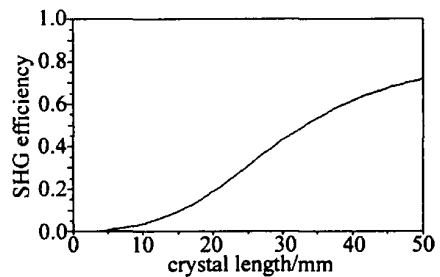


Fig 8 Relationship between SHG efficiency and crystal length type phase match ($L = 1080\text{nm}$, $w_0 = 56\mu\text{m}$, $P = 2.4\text{kW}$)

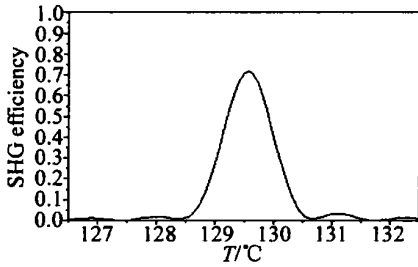


Fig 9 Relationship between SHG efficiency and offset of temperature type phase match ($L=1080\text{ nm}$, $w_0=56\mu\text{m}$, $P=2.4\text{ kW}$)

算所得可接收温度 (FWHM) 为 1.14°C , 文献 [1] 中略低于 2°C , 符合得比较好。

3 结 论

对平面波形式的耦合波方程引入了修正因子, 使得常微分形式的耦合波方程可以描述聚焦光斑大小和聚焦位置对倍频效率的影响。利用文献 [1] 中 LBO 倍频掺 Yb 光纤激光的试验数据, 对分析模型进行了检验, 结果和文献 [1] 中的试验数据获得了比较好的吻合。进一步利用改进后的耦合波方程, 对掺 Yb 光纤整个发射光谱 ($980\text{ nm} \sim 1100\text{ nm}$) 范围内, LBO 晶体的倍频特性进行了深入分析。结果显示: LBO 晶体在 Yb 光纤的整个发射谱段都可以达到 NCPM 条件。随着基频光波长增大, 倍频效率会有小幅度下降; 可接收温度宽度 ΔT 、可接收线宽 $\Delta\lambda$ 有比较大的展宽; 而可接收角 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\varphi$ 虽然也呈现增加趋势, 但变化很小。综合以上结论, 在利用 LBO 对掺 Yb 光纤激光倍频时, 采

取非临界相位匹配, 并选用较长的基频光波, 易于得到比较理想的倍频效果。

参 考 文 献

- [1] LIU A P, NORSEN M A, MEAD R D. 60W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser [J]. Opt Lett 2005, 30 (1): 67~69.
 - [2] KONNO S, KOJIMA T, FUJIKAWA S *et al*. High-brightness 138W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. Opt Lett 2000, 25(2): 105~107.
 - [3] XUE D G, YAO J Q, GUO L. 104W laser diode pumped intracavity frequency doubled Nd:YAG green light laser [J]. Acta Optica Sinica 2004, 24(7): 925~928 (in Chinese).
 - [4] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N *et al*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power [J]. Optics Express 2004, 12(25): 6088~6092.
 - [5] PASK H M, CARMAN R J, HANNA D C *et al*. Ytterbium-doped silica fiber lasers versatile sources for the 1~1.2 μm region [J]. IEEE JQ E Selected Topics 1995, 4(1): 2~13.
 - [6] SOH D B S, CODEMARD C, WANG S *et al*. A 980nm Yb-doped fiber MOPA source and its frequency doubling [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2004, 16(4): 1031~1034.
 - [7] LOU Q, ZHOU J, WANG Z. Double-cladding fiber laser and frequency doubling with PPLN [J]. SPE, 2004, 5460: 31~34.
 - [8] YAO J Q. Nonlinear optical frequency conversion and tunable laser technology [M]. Beijing: Science Press, 1995: 27, 44, 50 (in Chinese).
 - [9] DMITRIEV V G, NIKOGOSYAN D N. Handbook of nonlinear optical crystals [M]. 3rd ed. Berlin, New York: Springer, 1999: 27.
 - [10] KATO K. Temperature-tuned 90° phase-matching properties of LiB_3O_5 [J]. IEEE JQ E, 1994, 30(12): 2950~2952.
- (上接第 322 页)
- [6] LU W, CHEN X Sh. Ultra-narrow band pass optical filter plate and film thickness produce method [P]. China Patent 1354371, 2002-06-19 (in Chinese).
 - [7] HAGEDORN H, LOTZ A, PECHER P *et al*. Ultra narrow bandpass filters produced by plasma assisted deposition in optical interference coating [J]. JO S A Technical Digest 2001, WA 4: 1~4.
 - [8] MACLEOD H A. Thin-film optical filters [M]. 3rd ed. USA: Macleod, 2000: 626~680.
 - [9] TANG Q. Optical coating film design through manufacture method [J]. Society of Technology Information, 2002, 3(1): 1~26 (in Chinese).