

一种掺钕光纤激光器与倍频技术实现的数值模拟

沈兆国 张 萍

(西北大学 光子学与光子技术研究所 陕西 西安 710069)

摘要 :从双包层光纤激光器的速率方程和光传输方程出发,建立数学模型,进行数值计算并对掺钕光纤激光器输出功率沿光纤的分布以及不同光纤长度下抽运功率和输出功率沿光纤的分布进行了数值模拟。以 808 nm 半导体激光器为抽运源,掺钕双包层光纤为增益介质,并以 KTP 作为倍频晶体,计算并模拟其倍频效率和相位匹配角。最后,对光纤激光器及其倍频的实现进行了模拟研究。结果表明,该光纤激光器能够高效率地实现可见光输出。

关键词 :激光技术;光纤激光器;掺钕光纤;偏振;倍频

中图分类号:TN248.8 文献标识码:A

A neodymium-doped fiber laser and frequency doubling numerical simulation

SHEN Zhao-guo ZHANG Ping

(Institute of Photonics & Photonic Technology, Northwestern University, Xi'an 710069, China)

Abstract : On the basis of the rate equation and the optical transmission equation for a double-clad fiber laser, a mathematical model was established to calculate the output power for the optical fiber laser. Then, the distribution of output power along optical fiber and distributions of output power and pump power in different fiber lengths were simulated numerically for a neodymium-doped fiber laser. By taking a 808 nm semiconductor laser as pumping source. By taking a neodymium-doped double-clad fiber as gain medium and KTP crystal as a multiplier, the efficiency of doubling frequency and phase angle of the laser were calculated and simulated. Finally, the frequency doubling of fiber lasers was simulated. Experimental results show that the fiber laser can achieve visible light output in high efficiency.

Key words : laser technology; fiber laser; neodymium-doped fiber; polarization; frequency doubling

1 引言

近几年来,光纤激光器以其体积小、效率高、稳定性好、光束质量好等优点,倍受青睐,发展十分迅速,但是目前成熟的、占大半市场份额的高功

率光纤激光器,输出波长主要集中在 1 030 ~ 1 100 nm 之间^[1-6],输出波长的单一化限制了其在许多领域,尤其是在可见光波段的应用。所以研制在新波段工作的双包层光纤并实现光纤激光器在可见光波段的高功率输出,是当前光纤激光器最有前途的发展方向之一^[7-16]。

本文所研究的高功率光纤激光器,理论上可以实现高功率的可见光的输出,既具有全固态激光器功率高、效率高等优点,还具有光纤激光器体积小、寿命长、稳定性好、可集成化等特性^[17-19],在诸多需要小体积、高稳定性、高功率、高光束质量可见光光源的领域具有广泛的应用前景,可有效地扩展光纤激光器的输出波段并促进其在短波段尤其是可见光波段的应用,进一步提高光纤激光器的市场竞争优势。

2 光纤激光器数值模拟和分析

2.1 双包层光纤激光器的速率方程

设双包层光纤激光器的泵浦光从光纤端面注入,如图 1 所示。

设光纤长度为 L ,纤芯的截面积为 A ,纤芯的掺杂浓度为 N ,前后腔镜对纤芯内激光的反射率分别为 R_1 和 R_2 ,后腔镜对抽运光的反射率为 R_3 ,抽运光吸收截面为 σ_{ap} ,抽运光发射截面为 σ_{ep} ,运转光吸收截面为 σ_{as} ,运转光发射截面为 σ_{es} 。

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p\lambda_p}{hcA} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)]\sigma_{as}\Gamma_s\lambda_s}{hcA}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p\lambda_p}{hcA} + \frac{1}{\tau} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)](\sigma_{as} + \sigma_{es})\Gamma_s\lambda_s}{hcA}}, \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_{ap}N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z)]P_p^\pm(z) - a_p P_p^\pm(z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \Gamma_s[(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2(z) - \sigma_{as}N]P_s^\pm(z) - a_s P_s^\pm(z), \quad (3)$$

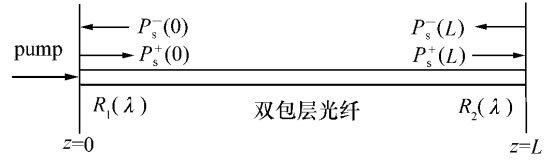
其中 a_p 和 a_s 分别为抽运光和激光的散射损耗系数。

当抽运光功率很强时,有 $N_2(z) \ll N$ 成立。利用这个条件,若抽运光从左端面注入,则由式(3)可得正向抽运光功率分布:

$$[P_p(0)]_{th} = \frac{[N\Gamma_s\sigma_a(\lambda_s)L + \ln(\frac{1}{R_1R_2})]\{\frac{\nu_p}{\nu_s}\}P_{sat}(N\Gamma_p\sigma_{ap} + a_p)}{N\Gamma_p\sigma_{ap}\{1 - \exp[-(N\Gamma_p\sigma_{ap} + a_p)L]\}}, \quad (7)$$

在端面泵浦条件下,双包层光纤对泵浦光的最大吸收功率由下式确定^[25]:

$$P_{max} = h\nu_p N L_a A / \tau_{f0}, \quad (8)$$



传输光线示意图以 z 为光轴,“+”代表向右传输,“-”代表向左传输

图 1 双包层光纤激光器的泵浦光从光纤端面注入
Fig. 1 Double-clad fiber laser pumping from fiber end-injection

泵浦光从 $z=0$ 处耦合进内包层,被纤芯吸收的比例为 Γ_p , $P_p^+(z)$ 、 $P_p^-(z)$ 分别为光纤内正反传输两个方向的泵浦功率分布函数,光纤内 z 处泵浦光功率 $P_p(z) = P_p^+(z) + P_p^-(z)$, $P_s^+(z)$ 、 $P_s^-(z)$ 分别为纤芯内沿正反两个方向传输的激光功率的分布函数,纤芯内 z 坐标处的激光功率分布 $P_s(z) = P_s^+(z) + P_s^-(z)$,注入光纤内的泵浦光功率为 P_p ,输出激光功率为 P_o 。

在稳态条件下,双包层光纤激光器的速率方程为^[20-24]:

$$P_p^+(z) = P_p^+(0) \exp[-(\Gamma_p\sigma_{ap}N + a_p)z], \quad (4)$$

$P_s^+(z)$ 和 $P_s^-(z)$ 满足边界条件:

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0), \quad (5)$$

$$P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L), \quad (6)$$

阈值抽运功率:

其中 L_a 为光纤的有效吸收长度, τ_{f0} 为荧光寿命, ν_p 为抽运光频率。由此式可知,光纤对抽运光的吸收能力与光纤长度成正比,因此抽运功

率一定时,选择合适的光纤长度将有利于提高激光器的光光转换效率,也就是光纤激光器设计中最佳纤长的概念。

利用 Matlab 编程可求得以上方程组的数值解,计算中所用的光纤激光器的相关参数为: $\lambda_p = 808 \text{ nm}$, $\lambda_s = 1\ 064 \text{ nm}$, $\sigma_{ap} = 2.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\sigma_{ep} = 2.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\sigma_{as} = 1.4 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$, $\sigma_{es} = 2.9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $A = 1.97 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$, $N = 4.33 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_s = 5 \times 10^{-5}$, $\mu_p = 3 \times 10^{-5}$, $\tau = 0.34 \times 10^{-3} \text{ s}$, $\nu = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$, $R_1 = 0.98$, $R_2 = 0.04$, $R_3 = 0.04$, $\Gamma_s = 0.82$, $\Gamma_p = 16 \times 10^{-4}$, $n_1 = 1.45$, $n_2 = 1.474$ 。其中 n_1 、 n_2 分别为双包层外层和内包层的折射率。

通过改变方程中某个参量的值可分析该参量与激光器最终输出功率的关系。改变光纤的长度,可得到信号光沿光纤的功率分布曲线^[26]。

在 20 m 附近得到一个最佳的光纤长度使得运转光在 $z = 0$ 处有最大的强度^[26],而当光纤长度 $> 10 \text{ m}$ 时,运转光的分布曲线基本相同。为实现输出功率达到最大,光纤长度存在最佳值,从图 2 中可获得对应 20 W 抽运功率,最佳光纤长度为 15 m,输出波长为 1 060 nm 的偏振激光。通过实验,实现了在波长 1 060 nm 处得到 7.5 W 的激光输出,斜率效率为 56%^[27]。

光学材料,很大范围内适合于 II 类匹配,现已广泛应用于倍频、混频和光参量振荡等过程,具有大的接收角、大的温度带宽、高的非线性系数、较好的热特性和高的损伤阈值以及硬度高、化学性能稳定等优点,缺点是生长困难、成本高、体积小,具体特性如表 1^[28]。

表 1 KTP 晶体的主要特性
Tab. 1 Main characteristics of KTP crystals

KTP 晶体	晶体特性
晶体结构	正交,点群 mm^2
晶体类型	正双轴晶体
密度	2.95 g/cm^3
破坏阈值	$300 \sim 500 \text{ MW/cm}^2$ $100 \sim 200 \text{ MW/cm}^2$
Mohs 硬度	稍 > 5
熔点	约 $1\ 150 \text{ }^\circ\text{C}$
透光范围	$350 \sim 4\ 500 \text{ nm}$
生长方式	水热法和熔盐法
走离角	$\varphi = 90^\circ$ ($\theta_{pm} = 68.7^\circ$) $\rho_2 = 1.829^\circ$ $\theta = 90^\circ$ ($\varphi_{pm} = 23^\circ$) $\rho_1 = 0.202^\circ$, $\rho_3 = 0.268^\circ$
非线性光学系数	$d_{31} = 6.5$, $d_{32} = 5.0$, $d_{33} = 13.7$, ($\times 10^{-12} \text{ m/V}$) $d_{24} = 7.6$, $d_{15} = 6.1$

借助 Matlab 软件编程,利用上述晶体参数,可以得到如图 3 所示的波长分布。

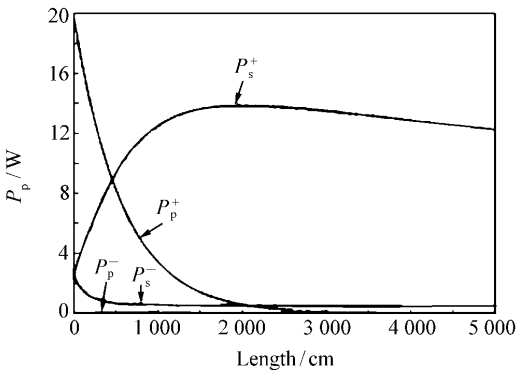


图 2 信号光沿光纤的功率分布曲线

Fig. 2 Power distribution curves of signal along optical fiber

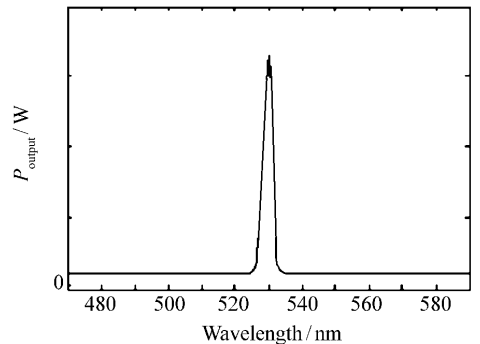


图 3 波长分布

Fig. 3 Wavelength distribution

3 倍频晶体磷酸钛氧钾(KTP)

晶体 KTiOPO_4 (KTP) 是一种很独特的非线性

KTP 晶体在 1 060 nm 基频光作用下得到的倍频相位匹配角曲线如图 4, $\varphi = 90^\circ$ ($\theta_{pm} = 69.01^\circ$), $\beta = 90^\circ$ ($\varphi_{pm} = 26.5^\circ$)。

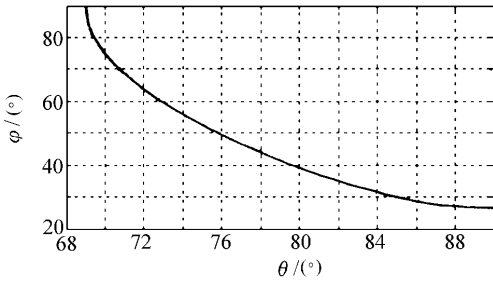


图 4 相位匹配角曲线

Fig. 4 Phase matching angle curve

利用 Matlab 编程画出 KTP 晶体 1 060 nm 最佳相位匹配角时有效非线性系数与 φ 的关系曲线图(图 5),并计算得到 1 060 nm 有效非线性系数 $d_{\text{eff}} = 4.825 3$,最佳相位匹配角是 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 26.5^\circ$ 。

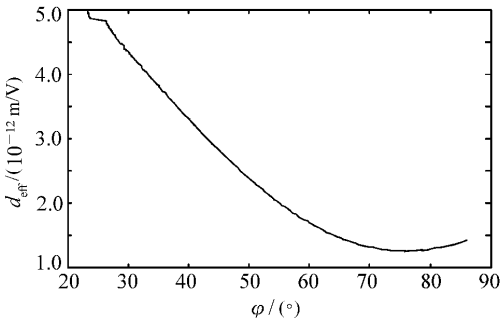


图 5 最佳相位匹配角时有效非线性系数与 φ 的关系
Fig. 5 Relationship of nonlinear coefficient and φ when phase matching is in the best angle

4 倍频效率

设 ω 为基频光 2ω 为倍频光,则由理论计算可以得到倍频的效率为^[29]:

$$\eta_{\text{SHG}} = \frac{|I_{2\omega}|}{|I_\omega|} = \frac{8\pi^2 L^2 d_{\text{eff}}^2}{n_\omega^2 n_{2\omega}^2 \lambda_\omega^2 c \epsilon_0} |I_\omega| \left[\frac{\sin\left(\frac{\Delta k L}{2}\right)}{\frac{\Delta k L}{2}} \right]^2, \quad (9)$$

式中 I_ω 为基频光光强 $I_{2\omega}$ 为倍频光光强 L 为晶体长度 d_{eff} 为晶体倍频有效非线性系数 n_ω 为基频光折射率 $n_{2\omega}$ 为倍频光折射率 $\Delta k = k_2 + k_2 - k_3$ 为三波互作用时的波矢量失配。由公式给出的倍频效率是一个 Sinc 平方函数,当 $\Delta k = 0$ 时效率达到最大值,即 $\theta = 90^\circ$ ($\varphi_{\text{pm}} = 26.5^\circ$),失配量在 π 的整数倍时达到最小值。图 6 表示理想状态下的

倍频效率。

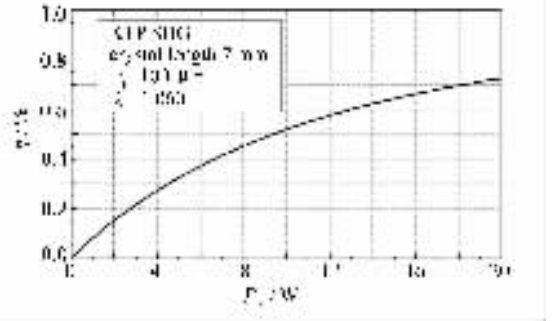


图 6 理想状态下的倍频效率曲线

Fig. 6 Efficiency curve of frequency doubling under ideal circumstance

由于周期性极化晶体价格昂贵且主要用于低功率倍频,而 LBO 晶体效率偏低,采用生长技术成熟、倍频转换效率高、热特性好、价格适中的 KTP 作为倍频晶体,其倍频转化效率在理论上数值模拟最高可达 70%;并且前面的模拟可以实现输出波长 1 060 nm 的偏振激光,所以其偏振性能能够保证倍频转化效率。

5 实施倍频的模拟分析

5.1 腔外倍频

采用前向泵浦的 F-P 腔结构,由泵浦源、耦合系统、腔镜、增益光纤及输出准直透镜组成该光纤激光系统。如图 7 所示,由尾纤输出的泵浦光经耦合聚焦系统后进入双包层光纤并将其激活,然后在二色镜与光纤端面形成的 F-P 腔内产生激光振荡,最后经准直透镜输出腔外。在前期光纤激光器模拟研究的基础上,对所获得的光纤激光输出进行了倍频研究。

为提高基频光利用率,采用独立设计光纤激光器输出的基频光经 L_1 与 L_2 组成的耦合聚焦透镜组后聚焦到倍频晶体上,倍频晶体放置于由平面镜 M_1 和 M_2 构成的等效平面倍频腔中,透镜 L_2 、 L_3 置于平面腔中并共同实现了激光器和倍频腔之间的模式匹配,通过调节两透镜的位置,使倍频晶体位于功率密度最大的光腰处进行倍频,通过倍频晶体而未发生二次谐波转换的基频光经平面镜 M_2 反射后再次通过倍频晶体进行谐波转换,而后由 M_1 将得到的 530 nm 激光一起反射输出腔外,理论上可得到高倍频效率和高功率可见光输出。

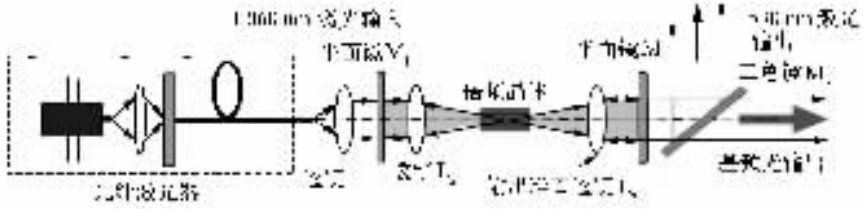


图 7 腔外倍频

Fig. 7 SHG produced by outside cavity

5.2 腔内倍频

图 8 表示单端泵浦腔内倍频实验方案。其构成包括:泵浦装置、前端输入耦合装置、光纤输出耦合装置、光纤装置、倍频装置和平面镜,构成一个标准的 F-P 谐振腔,在前端输入耦合装置的激发和输入信源的引导下形成 808 nm 的激光振荡,在倍频装置中实现腔内倍频,经输出耦合透镜得到高功率的绿光输出。图 9 表示双端泵浦腔内倍频

频实验方案。该方案构成比单端泵浦腔内倍频其构成多了下端泵浦源。激光二极管 LD 泵浦源带尾纤输出,波长与纤芯材料的峰值吸收波长相匹配。利用包层泵浦光纤激光器输出质量高、转换效率高等优点,通过特殊设计光纤的组成和结构,利用光纤弯曲损耗等实验方法有效地抑制了纤芯 1 092 nm 的强四能级振荡,并采用腔内倍频结构,得到高功率、高效率的绿光激光输出。

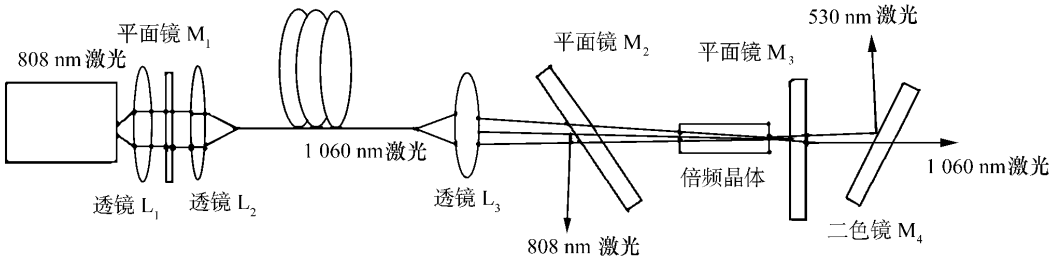


图 8 单端泵浦腔内倍频实验方案

Fig. 8 Single-pump SHG produced by inside cavity

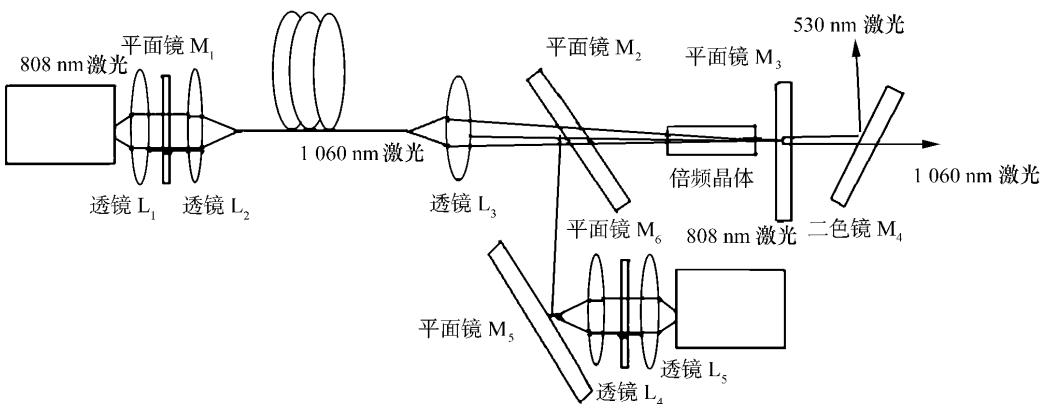


图 9 双端泵浦腔内倍频实验方案

Fig. 9 Double-pump SHG produced inside cavity

6 分析与讨论

根据模拟结果,详细讨论了泵浦方式、光纤长度等因素对光纤激光器输出、效率等性能的影响,得到如下结论:

(1)对于 Nb^{3+} 掺杂双层光纤激光器,要实现长波段的运行,应选择中心波长在 808 nm 的泵浦源来提高输出功率和斜率效率,并有效降低阈值功率。

(2)存在最佳光纤长度,使输出达到极大值,也存在最佳光纤长度使斜率效率最高、阈值最低,但各项性能所确定的最佳光纤长度彼此不同,在光纤激光器的设计中应综合考虑与权衡,确定合适的光纤长度。采用前端泵浦方式结构简单、易实现,但会造成增益分布不均匀,高功率运行还可能损坏光纤端面,双端泵浦能提高光纤内增益分布的均匀性,适合于大功率光纤激光器,耦合系统设计比较复杂,但是可以提高倍频光输出。

(3)对 LD 前端泵浦 F-P 腔结构的光纤激光器,其前腔镜反射率对系统的运行影响较大,一般前腔镜都应该对激光具有全反特性,后腔镜反射率可以在一定($<60\%$)范围内选择,应综合考虑输出功率、阈值功率来确定其最佳值,实际中常利

参考文献:

- [1] DOMINIC V, MACCORMACK S, WAARTS R *et al.*. 110 W fiber laser[J]. *Electron Lett*, 1999, 34(14): 1158-1160.
- [2] PLATONOV N S, GAPONTSEV D C, GAPONTSEV V P *et al.*. 135 W cw fiber laser with perfect single mode output[C]. *Conference on Lasers and Electro-optics*, Washington, USA, 2002, 73: CPDC3.
- [3] LIMPET J, LIEM A, HOFER S *et al.*. 150 W Nd/Yb codoped fiber laser at 1.1 μm [C]. *Conference on Lasers and Electro-optics*, Washington, USA, 2002, 73: 590-591.
- [4] JEONG Y, SAHU J K *et al.*. Cladding-pumped ytterbium-doped large-core fiber laser with 610 W of output power[J]. *Opt. Comm.*, 2004, 234: 315-319.
- [5] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Opt. Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [6] CHENG M Y, CHANG Y C, GALVANAUSKAS A *et al.*. High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200 μm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(4): 358-360.
- [7] NILSSON J, SAHU J K, JEONG Y *et al.*. High power fiber lasers new developments[J]. *SPIE*, 2003, 4974: 36-45.
- [8] BONATI G, VOELCKEL H, GABLER T *et al.*. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser[A]. *Photonics West, San Jose*, 2005.
- [9] LIEM A, LIMPET J, ZELLMER H *et al.*. 1.3 kW Yb-doped fiber laser with excellent beam quality[D]. San Francisco: CLEO, 2004.

用光纤端面 4% 的菲涅尔反射构成后腔镜以简化系统结构。

(4)对 KTP 晶体 1 060 nm 倍频的相位匹配角计算模拟,可以得到 $\varphi = 90^\circ$ ($\theta_{\text{pm}} = 69.01^\circ$); $\theta = 90^\circ$ ($\varphi_{\text{pm}} = 26.5^\circ$)。基频光的偏振性保证了高倍频效率的实现,通过理论计算,倍频效率最高为 70%。由于可以采用腔内倍频,因而可以实现更高转化效率,同时也可以利用双端泵浦,这样使得基频光的输出功率可以提高大约一倍多,从而极大地提高绿光的输出功率。

7 结论

本文从钕离子能级跃迁出发推导了速率方程,对掺钕光纤激光器的抽运和输出特性进行了数值模拟,可以得到 1 060 nm 激光输出。在此基础上实施倍频,实现可见光转换,拓展了光纤激光器输出波长,理论上可实现 530 nm 可见光输出。实验上已实现在波长 1 060 nm 处得到了 7.5 W 的保偏激光输出;由于倍频转化效率最高达到 70%,所以理论上可以得到 5 W 左右的高功率连续可见光输出。采用双端泵浦使得基频光的输出功率可以提高大约一倍多,从而极大地提高了绿光的输出功率,理论实现了更高的连续光的输出。

- [10] CHRISTOPHER D B ,FABIO D T. 1 mJ energy ,1 MW peak power ,10 W average power ,spectrally narrow ,diffraction-limited pulses from a photonic-crystal fiber amplifier[J]. *Opt. Express* 2005 ,13(22) 8999-9002.
- [11] 杜卫冲. IPG 高功率光纤激光器[J]. *激光与光电子学进展* 2002 ,39(10) 36-40.
DU W CH. IPG high-power fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress* 2002 ,39(10) 36-40.(in Chinese)
- [12] 张军 ,潘玉寨 ,胡贵军,等. 高功率光纤激光器的应用与展望[J]. *半导体光电* 2003 ,24(4) 222-226.
ZHANG J ,PAN Y Z ,HU G J *et al.* . Application and forecast of high power fiber lasers[J]. *Semiconductor Optoelectronics* 2003 ,34(4) 222-226.(in Chinese)
- [13] 阎平 ,巩马理 ,袁艳阳,等. 双端包层抽运光纤激光器实现 137 W 激光输出[J]. *中国激光* 2004 ,31(1) 80-80.
YAN P ,GONG M L ,YUAN Y Y. Dual-side cladding pumped fiber laser to achieve 137 W laser output[J]. *Chinese Journal of Lasers* 2004 ,31(1) 80-80.(in Chinese)
- [14] 周军 ,楼祺洪 ,朱健强,等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器[J]. *光学学报* 2006 ,26(7) 1119-1120.
ZHOU J ,LOU Q H ,ZHU J Q *et al.* . A continuous-wave 714 W fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber[J]. *Acta Optica Sinica* 2006 ,26(7) 1119-1120.(in Chinese)
- [15] 李伟 ,武子淳 ,史俊锋,等. 大功率光纤激光器输出功率突破 1 kW[J]. *强激光与粒子束* 2006 ,18(6) 890-890.
LI W ,WU Z H ,SHI J F *et al.* . High-power fiber laser output power break through 1 kW[J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2006 ,18(6) 890-890.(in Chinese)
- [16] 邢美术 ,陈光辉. 1 053 nm 单频线偏振光纤激光器[J]. *光纤与电缆及其应用技术* 2008 ,1(1) 9-11.
XING M SH ,CHEN G H. Single frequency and linearly polarized fiber laser of 1 053 nm[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications* 2008 ,1(1) 9-11.(in Chinese)
- [17] UPADHYAYA B N ,USHA C ,KURUVILLA A *et al.* . Effect of steady-state conditions on self-pulsing characteristics of Yb-doped cw fiber lasers[J]. *Opt. Comm.* 2008 ,28(1) 146-153.
- [18] GAPONTSEV V ,KRUPKE W. Fiber lasers grow in power[J]. *Laser Focus World* 2002 ,38(8) 83-87.
- [19] NILSSON J ,SAHU J K ,JEONG Y *et al.* . High power fiber lasers :new developments[J]. *SPIE* 2003 ,4974 :50-59.
- [20] 克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 北京 :科学出版社 2002.
KOECHNER W. *Solid-state Laser Engineering*[M]. Beijing Science Press 2002.
- [21] AMOS H ,ORON R. Signal amplification in strongly pumped fiber amplifiers[J]. *IEEE Quantum Electronics* ,1997 ,33(3) 307-313.
- [22] PASCHOTA R ,NILSSON J ,BARBER P R *et al.* . Lifetime quenching in Yb³⁺ doped fibers[J]. *opt. Comm.* ,1997 ,136 375-378.
- [23] RENAUD C C ,OFFERHAUS H L ,ALVAREZ C J A *et al.* . Characteristics of Q-switched cladding-pumped Ytterbium-doped fiber lasers with different high-energy fiber designs[J]. *IEEE Quantum Electronics* 2001 ,37(2) 199-206.
- [24] LU F Y ,FAN Y X ,HU S L. Output characteristics of high power double-clad fiber laser[J]. *SPIE* 2002 ,4914 344-347.
- [25] IDO K ,AMOS A. H. Strongly pumped fiber lasers[J]. *IEEE Quantum Electronics* ,1998 ,34(9) 570-577.
- [26] 任广军 ,张强 ,王鹏,等. 掺钕保偏光纤激光器的研究[J]. *物理学报* 2007 ,56(7) 3917-3924.
REN G J ,ZAHNG Q ,WANG P *et al.* . Study of Nd³⁺-doped polarization-maintaining fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica* 2007 ,56(7) 3917-3924.(in Chinese)
- [27] 任广军 ,姚建铨 ,王鹏,等. 保偏光纤激光器的实验研究[J]. *中国激光* 2007 ,34(9) 1208-1211.
REN G J ,YAO J Q ,WANG P *et al.* . Experimental study on polarization-maintaining fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers* , 2007 ,34(9) 1208-1211.(in Chinese)
- [28] 姚健全 ,徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京 :科学出版社 2007.
YAO J Q ,XU D G. *All-solid-state Lasers and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology*[M]. Beijing Science Press 2007.(in Chinese)
- [29] 蓝信钜. 激光技术[M]. 北京 :科学出版社 2005.
LAN X J. *Laser Technology*[M]. Beijing Science Press 2005.(in Chinese)