高效率外腔倍频产生低噪声连续单频 780 nm 激光

李 宏 冯晋霞* 万振菊 张宽收

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 利用 1.56 μm 连续单频光纤激光器抽运周期极化铌酸锂晶体,通过外腔谐振增强倍频技术获得了低噪声连续单频 780 nm 激光。为了实现高效率倍频,理论设计了倍频腔的最佳腔镜透射率、腔长以及腔模体积等以实现谐振倍频过程中的模式匹配和阻抗匹配。在此基础上,实验获得了输出功率达 1 W 的连续单频 780 nm 激光,倍频效率达 84.8%。进一步利用高精细度模式清洁器降低激光的强度噪声,实验获得了输出功率达 700 mW、强度噪声在分析频率 4 MHz 处达到散粒噪声基准的低噪声连续单频 780 nm 激光。该系统的激光波长分别位于量子态传输波段与原子存储波段,可用于研究实用化量子信息处理系统。

关键词 非线性光学; 连续单频 780 nm 激光; 谐振倍频; 高转换效率; 低噪声

中图分类号 O437.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0502003

Low Noise Continuous-Wave Single Frequency 780 nm Laser High-Efficiently Generated by Extra-Cavity-Enhanced Frequency Doubling

Li Hong Feng Jinxia Wan Zhenju Zhang Kuanshou

(*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi* 030006, *China*)

Abstract Low noise continuous-wave single frequency 780 nm laser is generated high-efficiently by an extra-cavity-enhanced frequency doubler constructed from a periodically poled lithium niobate crystal and a linear cavity that is pumped by a continuous-wave single frequency fiber laser at 1.56 μm. Based on the design of the transmission of input coupler and the waist of cavity to optimize the mode and impedance matching of the frequency doubler, a second-harmonic laser at 780 nm is obtained experimentally with the output power of 1 W and conversion efficiency of 84.8%. Using a high fineness mode cleaner to reduce the laser intensity noise, a low noise 780 nm laser with the output power of 700 mW is achieved and intensity noise reaches the shot-noise-limit at analysis frequency of 4 MHz. The center wavelengths of the laser system at 1.56 μm and 780 nm are in the wave bands of quantum states transmission and quantum storage, respectively, so this kind of system can be employed for researches of practical quantum information processing.

Key words nonlinear optics; continuous-wave single frequency 780 nm laser; extra-cavity-enhanced frequency doubling; high conversion efficiency; low noise

OCIS codes 140.3515; 140.3570; 190.2620; 270.2500

1 引 言

在量子信息科学研究中,比较理想的量子信息网络系统是以光作为量子信息传输的载体、原子作为量子信息存储的节点。因此,光与原子之间量子态的传递、存储成为目前广泛研究的课题。近年来,连续变量 1.5 μm 波段量子态光场,由于其在现有

收稿日期: 2013-10-20; **收到修改稿日期**: 2013-12-10

基金项目: 国家重大科学研究计划(2010CB923101)、国家自然科学基金(61227015)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ030127)

作者简介: 李 宏(1987—),女,硕士研究生,主要从事量子光学和激光技术等方面的研究。
E-mail: lihong201122607009@163.com

导师简介: 张宽收(1965—),男,博士,教授,主要从事量子光学及激光技术等方面的研究。
E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn(中国光学学会会员号: S040420365S)

* **通信联系人**。E-mail: fengjx@sxu.edu.cn

成熟的光纤通信系统中能保持最低损耗传输，受到越来越多的关注[1-3]。中心波长为 780 nm 的单频激光与碱金属原子的吸收线相匹配，是研究量子信息存储所必需的工具[4-6]。该波段激光光源在激光冷却与俘获、量子频标以及量子保密通信等领域也有着广泛的应用[7-9]。利用非线性二次谐波过程可以将 1.56 μm 光场频率上转换为 780 nm 光场，其中心波长分别位于量子信息处理过程中的量子态传输波段与原子存储波段，可将两者有机地结合起来。但要构成一个实用化的量子信息处理系统，需要使系统的每个组成部分最优化。其中之一就是要在降低激光光场噪声的同时最大限度地提高光场的频率转换效率。连续波激光功率密度相对较低，利用外腔谐振增强倍频技术可以实现高效率的频率变换。特别是随着准相位匹配技术的发展和成熟，不仅可以利用非线性晶体的最大非线性系数进行频率变换，而且在晶体透明区域内相互作用的耦合波都可以实现相位匹配。因此，采用准相位匹配晶体外腔谐振倍频技术，可以在扩展频率转换波段的同时使倍频转换效率不断提高[10-12]。近期，德国 Hannover 大学的 R. Schnabel 小组采用半整块腔型周期极化磷酸氧钛钾晶体外腔倍频，获得了连续波激光倍频效率达 95% 的实验结果[13]。为提高连续波激光的倍频转换效率、进一步研究实用化的量子信息处理系统，本实验室在利用模清洁器降低激光器强度噪声的基础上，进行了 1.5 μm 连续单频激光的外腔谐振增强倍频研究。

本文利用 1.56 μm 连续单频光纤激光器抽运周期极化铌酸锂(PPLN)晶体，通过外腔谐振增强倍频技术，获得输出功率达 1 W 的连续单频 780 nm 激光，倍频效率达 84.8%。并利用高精细度模式清洁器，过滤降低 780 nm 激光的强度噪声，使之在分析频率 4 MHz 处达到散粒噪声基准(SNL)。

2　谐振倍频腔的设计

利用现有的腔镜及腔内元件，即在腔内损耗及晶体非线性转换系数一定的条件下，为实现高效率的谐振增强倍频，需要对谐振倍频器进行优化设计。首先，要设计实现倍频器的最佳腔模体积并与抽运激光实现模式匹配。通过设计倍频器的腔长、腔模腰斑半径等得到最佳聚焦因子，利用匹配透镜使得抽运激光聚焦在晶体中心位置，并和腔模实现模式匹配。通常将高斯光束聚焦可以提高倍频效率，但过分聚焦又会使相位失配，缩短有效相干长度，因此设计倍频器时要考虑最佳聚焦的问题。最佳聚焦因子 $h_{\rm opt}$ 可以表示为[14]

$$h_{\rm opt}=h(\sigma,\beta,\kappa,\xi,\mu),\tag{1}$$

式中 $\sigma=b\Delta k/2$，$b=\omega_0^2k_1$ 为基频高斯光束的共焦参数(ω_0 为基频光束腰斑半径)，$\Delta k=2k_1-k_2$ 表示波矢失配量(k_1，k_2 分别表示基频光和倍频光的传播常数)；$\beta=\rho\sqrt{bk_1}/2$ 为双折射参数，ρ 表示光束在晶体中的离散角(对于温度匹配倍频晶体，无离散效应，$\beta=0$)；$\kappa=\alpha b/2$ 表示晶体吸收参数，$\alpha=\alpha_1-\alpha_2/2$，$\alpha_1$、$\alpha_2$ 分别表示晶体对基频光和倍频光的吸收系数；$\xi=l/b$ 为聚焦参量；l 为晶体长度，$\mu=(1-2f)/l$，f 为光束腰斑到晶体一边的距离，μ 为光束腰斑偏离晶体中心的归一化距离。由此可知，σ 和 ξ 是可以通过调节倍频腔的结构来优化的参量，对于固定的 Δk，σ 依赖于 b，从而与 ξ 有关，因此可以通过改变聚焦参量 ξ，达到优化聚焦因子的目的，使高斯光束达最佳聚焦，从而提高倍频效率。

在实验中，采用两镜驻波腔和 PPLN 晶体作为倍频器。利用表 1 所示的参数，通过理论数值模拟[14]，计算得到倍频腔聚焦因子 $h_{\rm opt}=0.6$，非线性晶体倍频系数 $\gamma_{\rm sh}=0.00112$。

表 1　倍频腔设计时数值模拟所用参数

Table 1　Parameters used in the numerical simulation

Name	Symbol	Value	Unit
Crystal refractive index for fundamental mode	n_1	2.13462	
Crystal refractive index for harmonic mode	n_2	20	
Length of the crystal	l	20	mm
Absorption coefficient for fundamental mode	α_1	0.001	$\rm cm^{-1}$
Absorption coefficient for harmonic mode	α_2	0.001	$\rm cm^{-1}$
Nonlinear coefficient	$d_{\rm eff}$	9.03×10^{-8}	esu.
Distance from waist to the end of crystal	f	10	mm
Beam waist of cavity mode	ω_0	63	μm
Cavity length of frequency doubler	L	55	mm

其次，设计实现倍频器的阻抗匹配。在非线性晶体倍频系数及抽运激光的注入功率确定的条件下，实现倍频器的阻抗匹配就是选择输入耦合镜的最佳透射率，使得基频光全部耦合进入倍频腔，从而增强基频光在倍频腔内的循环功率、提高倍频转换效率。由倍频器反射的基频光功率 P_r 为[15]

$$\frac{P_r}{P_1}=\frac{\left(\sqrt{r_1}-\sqrt{r_m}\right)^2}{\left(1-\sqrt{r_1 r_m}\right)^2}, \tag{2}$$

式中 P_1 为基频光的注入功率；r_1 为倍频腔输入耦合镜对基频光的反射率；$r_m=t^2\times t_{sh}^2\times r_2$ 为倍频腔的反射率，表示基频光内腔循环功率 P_c 在倍频腔内循环一周所剩下的比率。$t=1-\delta$，δ 为其他所有的内腔损耗，包括晶体的吸收、散射等引起的对基频光的损耗；$t_{sh}=1-\eta_{sh}$，$\eta_{sh}=\gamma_{sh}\times P_c$ 为基频光转换为倍频光的效率；r_2 为倍频腔输出耦合镜对基频光的反射率。从(2)式可以看出，当 $r_1=r_m$ 时，$P_r=0$，此时基频光反射场功率为零，基频光全部耦合进入倍频腔，实现外腔谐振倍频过程的阻抗匹配。在此条件下，倍频腔输入耦合镜对于基频光的透射率 t_1（$t_1=1-r_1$）实现了倍频过程中的阻抗匹配，因此也称为倍频过程中输入耦合镜的最佳透射率 t_{opt}，可以表示为 $t_{opt}=t_1=1-r_m$。结合实验参数及上述数值模拟结果，可以计算出在最大基频光抽运功率为 1.2 W时，t_{opt} 为 6%。

3　实验装置

图 1 为外腔谐振倍频产生低噪声连续单频 780 nm激光的实验装置。基频光是由 NP Photonics 公司生产的输出功率为 2 W 的 1.56 μm 连续单频光纤激光器产生的；半波片(HWP)用来控制激光的偏振方向；光隔离器(OI)用来抑制光学元件反射的激光，保证激光器稳定运转；由于光纤激光器输出的激光有远高于散粒噪声基准的强度噪声，实验中采用一个 1.56 μm 模式清洁器(1.56 μm MC)来降低基频光的强度噪声，该模式清洁器是腔长为 1.1 m 的无源三镜环形谐振腔，谐振腔精细度为 500。利用 Pound-Drever-Hall(PDH)锁腔技术[16]将 1.56 μm 模式清洁器的腔长锁定在基频光共振频率处，可降低基频光的强度噪声使之在分析频率 9 MHz 处达到散粒噪声基准。用电光调制器(EOM)为激光加载高频调制信号，用于锁腔系统。当把 1.56 μm 模式清洁器腔长锁定后，1.56 μm 基频光的透射率为 80%。经过一系列光学元件后，谐振倍频腔前的 1.56 μm 基频光功率为 1.18 W。

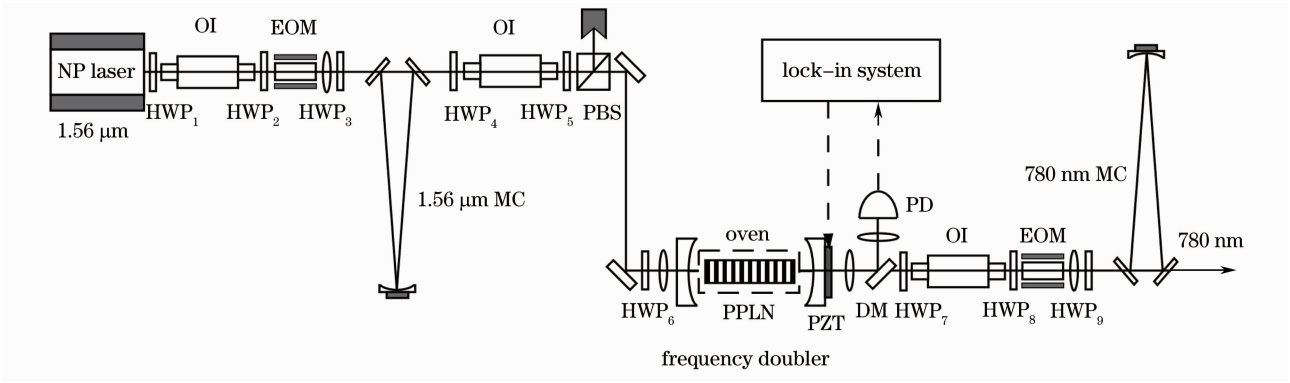

图 1　外腔谐振倍频实验装置

Fig. 1　Experimental setup for extra-cavity frequency doubling

谐振倍频腔为由两个曲率半径为 30 mm 的平凹镜构成的两镜驻波腔，输入耦合镜的平面镀基频光减反膜（$R_{1.56\ \mu m}<1\%$），凹面镀基频光部分反射膜、倍频光高反膜（$T_{1.56\ \mu m}=6\%$，$R_{780\ nm}>99.8\%$）；输出耦合镜的平面镀倍频光减反膜（$R_{780\ nm}<1\%$），凹面镀基频光高反膜、倍频光高透膜（$R_{1.56\ \mu m}>99.8\%$，$T_{780\ nm}>90\%$）。倍频腔的光学腔长为 55 mm。采用尺寸为 1 mm×10 mm×20 mm 的 PPLN 晶体作为倍频晶体，PPLN 晶体的通光面镀基频光和倍频光减反膜（$R_{1.56\ \mu m\&780\ nm}<0.2\%$）。PPLN 晶体置于控温炉中，用自制的控温精度为 0.003 ℃的高精度温度控制仪控制。利用焦距为 80 mm 的聚焦透镜将基频光聚焦至 PPLN 晶体的中心位置，聚焦腰斑为 63 μm，使基频抽运光与倍频腔实现模式匹配。实验中，模式匹配率达到 98%。将 PPLN 晶体温度控制在 120 ℃，采用锁相电子伺服系统将倍频腔腔长锁定在基频光共振频率处，实验获得了稳定的倍频 780 nm 连续单频激光输出。

为进一步降低 780 nm 激光的强度噪声，实验中采用无源三镜环形谐振腔作为 780 nm 激光的模式清洁器(780 nm MC)降低强度噪声。模式清洁器类似于一个“低通滤波器”：在低频处以及从输出镜耦合的真空起伏场的强度噪声全部被反射，因此利用模式清洁器通低频阻高频的特性来改善输出激光的强度噪声。为了有效地降低输出激光的强度噪声，模式清洁器腔的线宽应该尽可能的窄。获得窄线宽的方法有两种：1) 增加腔长；2) 提高腔的精细度。使用长腔必然会导致腔的机械稳定性变差，给模式清洁器腔长的锁定增加难度；而如果腔精细度过高则会减小模式清洁器的透射效率。因此在设计模清洁器腔时，应兼顾窄线宽与透射效率两方面的要求。实验中采用一个腔长为 1.1 m、精细度为 400 的无源三镜环形谐振腔作为模式清洁器降低倍频 780 nm激光的强度噪声。

4　实验结果与分析

图 2 为倍频光输出功率以及倍频效率随着基频光注入功率的变化曲线。当基频光最大注入功率为 1.18 W 时，实测的 780 nm 倍频光输出功率为 1 W，倍频转换效率达 84.8%。考虑到倍频腔的模式匹配率为 98%，实际倍频效率达 86.5%。图 2 中的菱形和方块为实验测量值，黑色曲线为理论计算曲线。理论计算和实验结果基本吻合，存在微小偏离的原因是，在不同注入功率下，PPLN 晶体对基频光及倍频光的吸收系数不同、晶体热效应影响模式匹配等。如果要进一步提高倍频转换效率，就需要尽量降低倍频腔的内腔损耗。实验中测量的倍频腔精细度为 89，可以估算出倍频腔的内腔损耗为 0.6%。该内

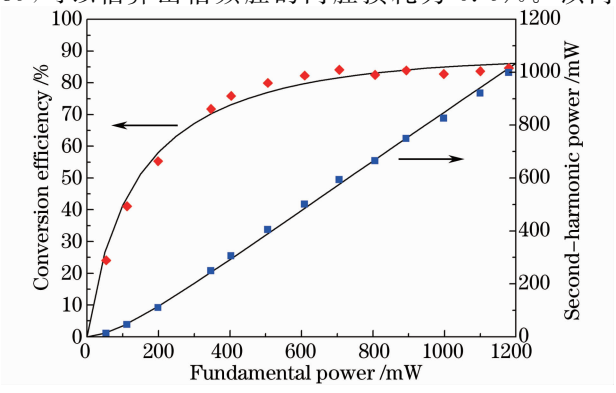

图 2　倍频光输出功率和倍频转换效率随基频光注入功率的变化曲线

Fig. 2　Second-harmonic power and conversion efficiency versus fundamental power

腔损耗包括 PPLN 晶体的吸收、散射损耗，晶体通光面和腔镜的镀膜质量引起的损耗等。购置高质量的非线性晶体、提高晶体及腔镜的镀膜质量及采用整块或半整块倍频器，可降低倍频器的内腔损耗。理论计算如果将内腔损耗降低为 0.2%，可以将倍频转换效率提高至 95%。

倍频 780 nm 连续单频激光已经在实验室作为光学参量放大器的抽运光，用来产生 1.5 μm 光通信波段的连续变量量子态。同时，该光源对应于碱金属原子的吸收线，可以用于量子存储的研究。上述研究均需要 780 nm 连续单频激光具备低噪声特性。因此，在高效谐振倍频实验的基础上，设计如图 1 所示的高透射率、窄线宽模式清洁器(780 nm MC)，进一步降低 780 nm 激光的强度噪声。当利用 PDH 锁腔技术将 780 nm 模式清洁器的腔长锁定在倍频光共振频率处，实验获得了稳定的低噪声 780 nm 连续单频激光。780 nm 模式清洁器的透射率达 80%，测得的激光输出功率为 700 mW。测量的 780 nm 连续单频激光强度噪声曲线如图 3 所示，曲线 a 为散粒噪声基准，曲线 b 和 c 分别是模式清洁器后和模式清洁器前的倍频 780 nm 激光的强度噪声曲线。可以看出利用模式清洁器，780 nm 激光的强度噪声得到进一步降低，在分析频率 4 MHz 处达到散粒噪声基准。

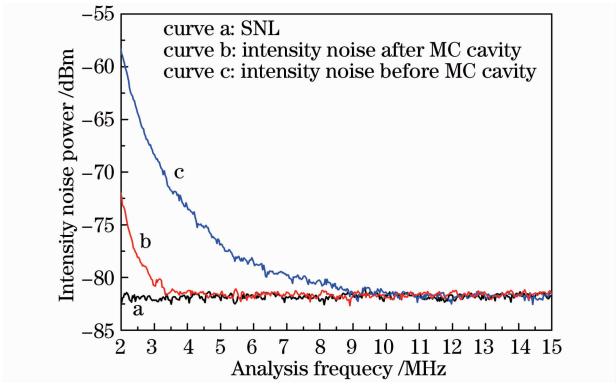

图 3　780 nm 激光的强度噪声曲线

Fig. 3　Intensity noise of 780 nm laser

5　结　　论

采用 1.56 μm 连续单频光纤激光器作为抽运源，抽运由 PPLN 晶体和两镜驻波腔构成的倍频器，通过外腔谐振倍频，获得输出功率达 1 W 的连续单频 780 nm 激光，倍频转换效率达 84.8%。优化倍频器各元件的质量，降低倍频腔的内腔损耗，可进一步提高倍频转换效率。该系统的激光波长分别

位于量子信息处理过程中的量子态传输波段与原子存储波段，可将两者有机地结合起来。为扩展该光源在量子信息处理研究中的应用，利用高精细度模式清洁器，过滤降低激光的强度噪声，获得了输出功率达 700 mW、强度噪声在分析频率 4 MHz 处达到散粒噪声基准的低噪声 780 nm 连续单频激光。该激光光源已用于研究产生高质量的光通信波段量子态光场。

参　考　文　献

1 J X Feng, X T Tian, Y M Li, *et al*.. Generation of a squeezing vacuum at a telecommunication wavelength with periodically poled $LiNbO_3$[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(22): 221102.

2 M Mehmet, S Ast, T Eberle, *et al*.. Squeezed light at 1550 nm with a quantum noise reduction of 12.3 dB[J]. Opt Lett, 2011, 19(25): 25763－25772.

3 T Eberle, V Händchen, J Duhme, *et al*.. Strong Einstein-Podolsky-Rosen entanglement from a single squeezed light source [J]. Phys Rev A, 2011, 83(5): 052329.

4 M D Eisaman, A Andre, F Massou, *et al*.. Electromagnetically-induced transparency with tunable single-photon pulse [J]. Nature, 2005, 438(7069): 837－841.

5 H de Riedmatten, M Afzelius, M U Staudt, *et al*.. A solid-state light-matter interface at the single photon level [J]. Nature, 2008, 456(7223): 773－777.

6 Rikizo Ikuta, Yoshiaki Kusaka, Tsuyoshi Kitano, *et al*.. Wide-band quantum interface for visible-to-telecommunication wavelength conversion [J]. Nature Communications, 2011, 2 (11): 537.

7 F Lienhart, S Boussen, O Carraz, *et al*.. Compact and robust laser system for rubidium laser cooling based on the frequency doubling of a fiber bench at 1560 nm[J]. Appl Phys B, 2007, 89 (2-3): 177－180.

8 Y Ovchinnikov, G Marra. Accurate rubidium atomic fountain frequency standard[J]. Metrologia, 2011, 48(11): 87－100.

9 Nicolas J Cerf, Philippe Grangier. From quantum cloning to quantum key distribution with continuous variables: a review (Invited)[J]. J Opt Soc Am B, 2007, 24(2): 324－334.

10 Jinxia Feng, Yongmin Li, Xiutao Tian, *et al*.. Noise suppression, linewidth narrowing of a master oscillator power amplifier at 1.56 μm and the second harmonic generation output at 780 nm[J]. Opt Express, 2008, 16(16): 11871－11877.

11 S Chaitanya Kumar, G K Samanta, M Ebrahim-Zadeh. High-power, single-frequency, continuous-wave second-harmonic-generation of ytterbium fiber laser in PPKTP and MgO:sPPLT [J]. Opt Express, 2009, 17(16): 13711－13726.

12 Lu Yanhua, Zhang Lei, Ma Yi, *et al*.. Sodium guidestar laser based on high-efficiency PPSLT quasi-phase-matched sum frequency generation [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2306－2310.
鲁燕华，张　雷，马　毅，等. 高效率 PPSLT 准相位匹配和频导星激光器[J]. 光学学报，2010，30(8)：2306－2310.

13 Stefan Ast, Ramon Moghadas Nia, Axel Schönbeck, *et al*.. High-efficiency frequency doubling of continuous-wave laser light [J]. Opt Lett, 2011, 36(17): 3467－3469.

14 G D Boyd, D A Kleinman. Parametric interaction of focused gaussian light beams[J]. J Appl Phys, 1968, 39(8): 3597－3639.

15 A Ashkin, G D Byod, J M Dziedzic. Resonant optical second harmonic generation and mixing[J]. IEEE J Quant Electron, 1966, 2(6): 109－124.

16 E D Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. Am J Phys, 2001, 69(1): 79－87.

栏目编辑：殷建芳