

## 高功率单共振光学参量振荡器的输出特性研究

聂丹丹<sup>1</sup>, 戚蒙<sup>2</sup>, 李渊骥<sup>2,3</sup>, 冯晋霞<sup>2,3</sup>, 张宽收<sup>2,3\*</sup><sup>1</sup>太原师范学院物理系, 山西 晋中 030619;<sup>2</sup>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;<sup>3</sup>山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

**摘要** 研究了在高抽运功率下,单共振光学参量振荡器(SRO)腔型对其输出特性的影响。在理论分析的基础上,实验搭建了基于掺杂氧化镁的周期性极化钽酸锂(MgO:PPLN)晶体的两镜驻波腔和四镜环形腔 SRO。驻波腔 SRO 的阈值抽运功率为 3.2 W,当抽运光功率为 14.2 W 时,信号光和闲频光功率分别为 5.2 W 和 2.2 W。当抽运光功率大于 15 W 时,驻波腔 SRO 输出功率的实测值随抽运光功率的增大而减小,与理论预测偏差较大。环形腔 SRO 的阈值抽运功率为 7.2 W,当抽运光功率为 25 W 时,信号光和闲频光功率分别为 8.1 W 和 3.6 W。环形腔 SRO 输出功率的实测值和理论预测基本一致。驻波腔及环形腔 SRO 输出的信号光在 2 h 内的功率波动分别优于  $\pm 2.76\%$  和  $\pm 2.53\%$ ,驻波腔及环形腔 SRO 输出的闲频光在 2 h 内的功率波动分别优于  $\pm 1.24\%$  和  $\pm 1.19\%$ 。驻波腔及环形腔 SRO 输出信号光的长期频率漂移分别优于  $\pm 40$  MHz 及  $\pm 28$  MHz。

**关键词** 非线性光学; 单共振光学参量振荡器; 连续单频红外激光; 高功率; 环形腔

中图分类号 O437.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231145

## 1 引言

波长位于  $1.5\sim 1.8\ \mu\text{m}$  和  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  的红外激光在自由空间光通信<sup>[1]</sup>、痕量气体监测<sup>[2]</sup>、环境污染监测<sup>[3]</sup>、生物医学<sup>[4]</sup>等领域中具有广泛的应用。利用量子级联激光器<sup>[5]</sup>、光纤激光器<sup>[6]</sup>、固体激光器<sup>[7]</sup>、拉曼激光器<sup>[8]</sup>等均能获得红外激光输出。与这些方式相比,光学参量振荡器(OPO)<sup>[9-12]</sup>不仅能获得调谐范围更宽的激光输出,且更容易实现高功率和高稳定性的激光输出。此外,根据 OPO 腔内抽运光、信号光和闲频光的共振情况,可将其分为单共振 OPO(SRO)、双共振和三共振 OPO。其中,SRO 只需使信号光(或者闲频光)在 OPO 腔内共振,其设计比较简单,容易获得调谐范围更宽和输出特性更稳定的红外激光。

早在 1996 年,Bosenberg 等<sup>[13]</sup>通过实验研究发现,利用  $1.06\ \mu\text{m}$  单频激光器抽运基于周期性极化钽酸锂(PPLN)晶体的环形腔 SRO 输出的红外激光更易于保持单纵模运转。2006 年,Henderson 等<sup>[14]</sup>利用  $1.08\ \mu\text{m}$  光纤激光器抽运基于掺杂氧化镁的 PPLN(MgO:PPLN)晶体的 SRO,获得了输出功率为 750 mW 的  $2.80\ \mu\text{m}$  闲频光输出,阈值功率为 780 mW,光光转换效率达 26.7%。2016 年,姜洪波等<sup>[15]</sup>通过优化抽运光功率和输出镜反射率,获得了 8 W 的  $2.90\ \mu\text{m}$  闲频

光输出,光光转换效率为 19.5%。2019 年,Bae 等<sup>[16]</sup>利用  $1.06\ \mu\text{m}$  激光抽运基于扇形 MgO:PPLN 晶体的 OPO,当抽运光功率为 1.1 W 时,获得了最大功率为 64 mW 的  $3.50\ \mu\text{m}$  闲频光输出,光光转化效率为 5.8%。2021 年,Wang 等<sup>[17]</sup>采用内腔式 OPO 结构,抽运光波长为  $1.06\ \mu\text{m}$ ,当抽运光功率为 9.1 W 时,获得了 1.08 W 的  $3.19\ \mu\text{m}$  闲频光输出,光光转换效率为 11.88%。2022 年,王海龙等<sup>[18]</sup>利用  $1.06\ \mu\text{m}$  单频激光器抽运基于 MgO:PPLN 和 PPKTP 晶体的环形腔 SRO,当抽运光功率为 21 W 时, $1.55\ \mu\text{m}$  信号光、 $3.39\ \mu\text{m}$  闲频光和  $0.775\ \mu\text{m}$  倍频光的输出功率分别为 2.1、1.7、1.1 W,5 h 内的功率稳定性(均方根)分别优于 2.5%、1.6%、0.8%,总光光转换效率为 23.3%。

为了进一步优化 SRO 输出红外激光的转换效率和稳定性,本文研究了 SRO 的腔型对其输出特性的影响。首先从理论上分析了 SRO 腔长以及非线性晶体对腔内共振信号光的吸收导致的热透镜效应对谐振腔稳定性参数的影响,在此基础上进一步分析了 SRO 的阈值抽运功率以及输出激光功率随抽运光功率的变化关系。然后在实验上搭建了利用高功率全固态连续单频  $1.06\ \mu\text{m}$  激光器抽运的两镜驻波腔和四镜环形腔 SRO,其由 MgO:PPLN 晶体构成,信号光共振且部分耦合输出,研究了两种腔型下 SRO 输出信号光和闲频

收稿日期: 2023-08-28; 修回日期: 2023-09-22; 录用日期: 2023-10-07; 网络首发日期: 2023-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(62175135)、山西省高等学校科技创新项目(2021L447)

通信作者: \*kuanshou@sxu.edu.cn

光功率随抽运光功率的变化,以及输出激光的长期功率波动和频率漂移。

## 2 理论分析

SRO 的抽运激光为高斯光束,如果选取的聚焦因子较大,虽然可以获得较低的阈值抽运功率,但晶体本身存在的热效应会导致输出激光的稳定性和光束质量变差。为了优化 SRO 的输出特性,选择共焦聚焦(即聚焦因子为 1)设计 SRO。我们将在设计 SRO 腔型结构的基础上,理论分析 SRO 腔的腔长和非线性晶体的热透镜焦距对 SRO 腔稳定性参数的影响以及不同腔型 SRO 的激光输出特性。

驻波腔 SRO 的结构如图 1 所示。驻波腔 SRO 由两个曲率半径为  $r_1$  的平凹镜  $M_1$ 、 $M_2$  和非线性晶体构成,其中信号光在腔内共振并通过  $M_2$  部分耦合输出,闲频光单次穿过非线性晶体后通过  $M_2$  输出,抽运光两次穿过非线性晶体,非线性晶体端面到凹面镜的距离均为  $l_1$ 。

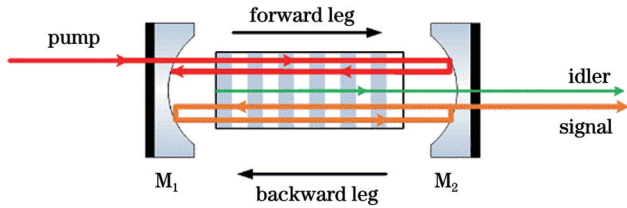


图 1 驻波腔 SRO 的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of standing wave cavity SRO

环形腔 SRO 的结构如图 2 所示。环形腔 SRO 由曲率半径为  $r_2$  的平凹镜  $M_3$ 、 $M_4$  以及平面镜  $M_5$ 、 $M_6$  和非线性晶体构成,其中信号光在腔内共振并通过  $M_6$  部分耦合输出,闲频光和抽运光单次穿过非线性晶体后通过  $M_4$  输出,非线性晶体端面到  $M_3$  和  $M_4$  的距离均为  $l_2$ ,信号光从  $M_4$  经  $M_5$  和  $M_6$  传输到  $M_3$  的距离为  $l_3$ 。非线性晶体为 MgO:PPLN 晶体,其长度为  $l$ ,信号光在非线晶体中的折射率为  $n_s$ 。注入到 SRO 腔前的抽运光功率为  $P_{p0}$ 。

首先利用谐振腔的 ABCD 矩阵分析计算 SRO 腔

$$\begin{pmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{pmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{M}^2 \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{M}, \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} A_r & B_r \\ C_r & D_r \end{pmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{M}, \quad (4)$$

式中:s和r分别表示驻波腔和环形腔。

SRO 稳定运转须满足谐振腔的稳定性条件  $|(A+D)/2| < 1$ 。图 3 中的虚线和实线分别是利用式(3)、(4)计算得到的驻波腔和环形腔 SRO 的稳定性参数  $(A+D)/2$  随腔长(驻波腔的腔长为  $2l_1+l$ , 环形腔的腔长为  $2l_2+l_3+l$ )的变化,其中  $l_2=50$ ,  $r_1=$

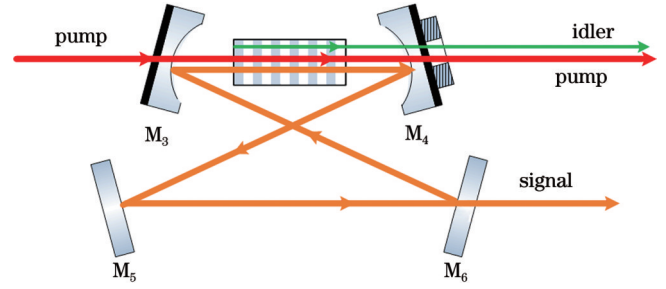


图 2 环形腔 SRO 的结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of ring cavity SRO

长和腔内 MgO:PPLN 晶体的热透镜焦距对谐振腔稳定性参数的影响。在高功率抽运条件下,非线性晶体对内腔共振信号光的吸收会导致热透镜效应。由于闲频光单次穿过、抽运光双次穿过非线性晶体,忽略非线性晶体对闲频光和抽运光的吸收。假定信号光的腰斑位置与非线性晶体的中心重合,可得到 MgO:PPLN 晶体的热透镜焦距( $f$ )<sup>[19]</sup>为

$$f = \frac{\pi K_c}{\alpha_s P_s (dn/dT)} \times \frac{\omega_{0s}^2}{l}, \quad (1)$$

式中: $K_c$  为 MgO:PPLN 晶体的热导率,  $K_c=4020 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $\omega_{0s}$  为非线性晶体中心处信号光的腰斑;  $\alpha_s$  为 MgO:PPLN 晶体对信号光的吸收系数,  $\alpha_s \approx 0.008\% \cdot \text{mm}^{-1}$ ;  $P_s$  为 SRO 内腔共振的信号光功率;  $dn/dT$  为 MgO:PPLN 晶体折射率( $n$ )随温度( $T$ )的变化,  $dn/dT=5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

由于 MgO:PPLN 非线性晶体较长(实验研究中其长度  $l=30 \text{ mm}$ ),在理论分析过程中,将 MgO:PPLN 晶体的热透镜等效为间距相同的焦距均为  $8f$  的 8 个薄透镜,则信号光在非线性晶体中传输一半距离( $l/2$ )的矩阵可以表示为

$$\mathbf{M} = \left[ \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{8f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right]^4. \quad (2)$$

设定 SRO 腔内共振的信号光从晶体中心处开始传输,由此可得到驻波腔和环形腔 SRO 的传输矩阵分别为

$25 \text{ mm}$ ,  $r_2=100 \text{ mm}$ ,  $n_s=2.13$ ,非线性晶体的等效热透镜焦距  $f$  选取为  $25 \text{ mm}$ (信号光输出功率为  $3 \text{ W}$  时对应的热透镜焦距值,此时腔内共振信号光的内腔功率约为  $145 \text{ W}$ )。由图 3 可以看出:当驻波谐振腔的腔长从  $35 \text{ mm}$  增加到  $65 \text{ mm}$  时, SRO 均可稳定运转,满足谐振腔稳定性条件的腔长变化范围仅为  $30 \text{ mm}$ ;当环形谐振腔

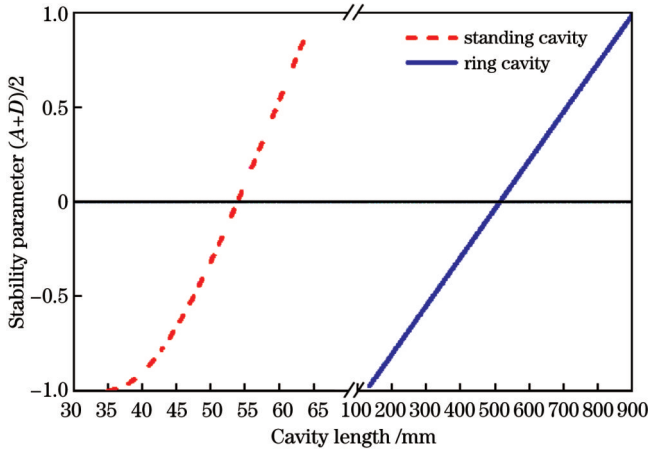


图3 SRO腔的稳定性参数随谐振腔腔长的变化

Fig. 3 Stability parameter of SRO cavity versus resonator cavity length

的腔长从 135 mm 增加到 905 mm 时, SRO 均可稳定运转, 满足谐振腔稳定性条件的腔长变化范围长达 770 mm。为了使 SRO 在较大的谐振腔参数变化范围内均可稳定运转, 在设计 SRO 时, 选择谐振腔的腔长为  $|(A+D)/2|=0$  时对应的腔长, 即选择驻波腔腔长为 54 mm ( $l_1=12$  mm), 环形腔腔长为 516 mm ( $l_3=386$  mm)。

在 SRO 腔长确定后, 由式(1)~(4)可以分别计算出驻波腔和环形腔 SRO 的稳定性参数随热透镜焦距的变化规律, 如图 4 中的虚线和实线所示。可以看出, 当非线性晶体的热透镜焦距小于 14 mm 时(此时腔内共振信号光的功率约为 260 W), 驻波腔 SRO 的稳定性参数大于 1, SRO 已不能稳定运转。即使非线性晶体的热透镜焦距小于 10 mm(此时腔内共振信号光的

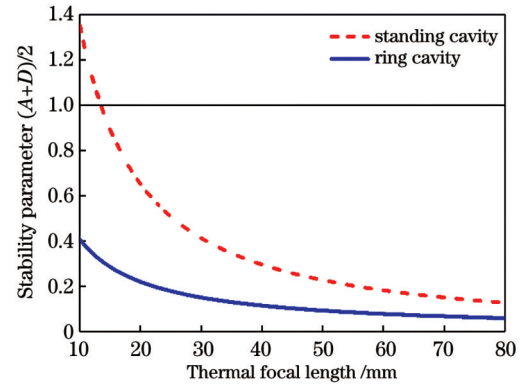


图4 SRO腔的稳定性参数随MgO:PPLN晶体热透镜焦距的变化

Fig. 4 Stability parameter of SRO cavity versus thermal focal length of MgO:PPLN crystal

功率约为 370 W), 环形腔 SRO 的稳定性参数仍然小于 1, SRO 还能稳定运转。

在设计 SRO 谐振腔结构的基础上, 下一步将理论分析不同腔型 SRO 的激光输出特性。驻波腔和环形腔 SRO 腔内各光场的分布如图 1 和图 2 所示, SRO 腔中频率为  $\omega_p$  的抽运光入射到非线性晶体中, 产生频率为  $\omega_s$  和  $\omega_i$  的信号光和闲频光。在实际研究中选择聚焦因子为 1, 非线性晶体长度小于腔模的瑞利长度, 抽运光、信号光和闲频光在其瑞利长度内可以近似为准直高斯光束。驻波腔 SRO 中的抽运光两次穿过非线性晶体, 因此需要同时考虑正向传输和反向传输时信号光的功率增益。假设非线性晶体的相位失配可以忽略不计, 则驻波腔内信号光正向和反向传输时的功率增益<sup>[20]</sup>分别为

$$\Delta P_{ss} = -8d_{\text{eff}}\epsilon_0\omega_s \text{Im} \left( \int A_s^* A_p A_i^* dx dy dz \right) = 8d_{\text{eff}}\epsilon_0\omega_s \int_0^l 2\pi r dr \frac{q_1^*}{q} |A_s^*| |A_p(0)|^2 \int_0^l dz \sin(qz) \cos(qz) =$$

$$2 \frac{\lambda_p}{\lambda_s} P_{sp} \int_0^\infty \exp(-2u) \sin^2[g_s l \exp(-mu)] du, \quad (5)$$

$$\Delta P'_{ss} = \frac{2\lambda_p}{\lambda_s} P'_{sp} \int_0^\infty \exp(-2u) \sin^2[g_s l \exp(-mu)] du =$$

$$\frac{2\lambda_p}{\lambda_s} P_{sp} \left[ 1 - 2 \int_0^\infty \exp(-2u) \sin^2[g_s l \exp(-mu)] du \right] \int_0^\infty \exp(-2u') \sin^2[g_s l \exp(-mu')] du', \quad (6)$$

式中:  $A_s^*$  为非线性晶体中信号光场振幅的共轭;  $A_i^*$  为非线性晶体中闲频光场振幅的共轭;  $x, y, z$  为光束坐标;  $q_1^* = \frac{4\pi d_{\text{eff}}}{\lambda_i n_i} A_s$ , 其中  $A_s$  为非线性晶体中信号光场的振幅,  $\lambda_i$  为非线性晶体中闲频光的波长,  $n_i$  为非线性晶体中闲频光的折射率;  $u$  为抽运光第一次穿过非线性晶体时光束的径向坐标与抽运光腰斑平方的比值;  $u'$  为抽运光第二次穿过非线性晶体时光束的径向坐标与抽运光腰斑平方的比值;  $q_1 = \frac{4\pi d_{\text{eff}}}{\lambda_i n_i} A_s^*$ ;

$q_2 = \frac{4\pi d_{\text{eff}}}{\lambda_p n_p} A_s$ , 其中  $n_p$  为非线性晶体中抽运光的折射率;  $q = \sqrt{q_1 q_2}$ ;  $d_{\text{eff}}$  为非线性晶体的二阶非线性系数;  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $A_p, \lambda_p$  分别为非线性晶体中抽运光场的振幅、波长;  $\lambda_s$  和  $n_s$  分别为非线性晶体中信号光场的波长和折射率;  $A_i$  为非线性晶体中闲频光场的振幅;  $r$  为径向坐标;  $m$  为抽运光和信号光腰斑的重叠度;  $P_{sp}$  为驻波腔内的抽运光功率;  $g_s$  为常数, 满足  $g_s^2 l^2 = \frac{32\pi^2 d_{\text{eff}}^2 l \xi_s P_{ss}}{n_p n_s \lambda_i^2 \lambda_p c \epsilon_0 (k-1)}$ ,  $\xi_s$  为信号光的聚焦因子,  $P_{ss}$  为驻波

腔内共振信号光功率,  $k=k_p/k_s$ ,  $k_p$ 、 $k_s$  分别为抽运光和信号光的波矢大小,  $c$  为真空中的光速;  $P'_{sp}$  为反向传输时穿过非线性晶体的抽运光功率, 表示为

$$P'_{sp} = P_{sp} \left[ 1 - 2 \int_0^{\infty} \exp(-2u) \sin^2[g_s l \exp(-mu)] du \right]. \quad (7)$$

驻波腔内信号光的振荡条件为

$$(T_{ss} + V_{ss})P_{ss} = \Delta P_{ss} + \Delta P'_{ss}, \quad (8)$$

式中:  $T_{ss}$  为  $M_2$  对信号光的透射率;  $V_{ss}$  为驻波腔内信号光循环一周所经历的其他损耗。SRO 的阈值附近,  $g_s$  很小, 由此得到驻波腔 SRO 的阈值抽运功率为

$$P_{sth} = \frac{(T_{ss} + V_{ss})(1+m)(k-1)n_p n_s \lambda_i^2 \lambda_s c \epsilon_0}{64\pi^2 d_{eff}^2 l \xi_s}. \quad (9)$$

根据边界条件, 驻波腔 SRO 输出的信号光和闲频光功率分别为

$$\begin{cases} P_{ss,out} = T_{ss} P_{ss} \\ P_{si,out} = \frac{\lambda_s}{\lambda_i} (T_{ss} + V_{ss}) P_{ss} \end{cases} \quad (10)$$

与驻波腔相比, 环形腔 SRO 中的抽运光单次穿过非线性晶体, 不需要考虑反向传输时的参量相互作用, 因此环形腔中信号光的功率增益<sup>[20]</sup>为

$$\Delta P_{rs} = 2 \frac{\lambda_p}{\lambda_s} P_{rp} \int_0^{\infty} \exp(-2u) \sin^2[g_r l \exp(-mu)] du, \quad (11)$$

式中:  $P_{rp}$  为环形腔内的抽运光功率;  $g_r$  为常数, 满足  $g_r^2 l^2 = \frac{32\pi^2 d_{eff}^2 \xi_s P_{rs}}{n_p n_s \lambda_i^2 \lambda_p c \epsilon_0 (k-1)}$ , 其中  $P_{rs}$  为环形腔内共振信号光功率。

环形腔内信号光的振荡条件为

$$\Delta P_{rs} = (T_{rs} + V_{rs})P_{rs}, \quad (12)$$

式中:  $T_{rs}$  为  $M_6$  对信号光的透射率;  $V_{rs}$  为环形腔内信号光循环一周所经历的其他损耗。阈值附近  $g_r$  很小, 由此得到环形腔 SRO 的阈值抽运功率为

$$P_{rth} = \frac{(T_{rs} + V_{rs})(1+m)(k-1)n_p n_s \lambda_i^2 \lambda_s c \epsilon_0}{32\pi^2 d_{eff}^2 l \xi_s}. \quad (13)$$

根据边界条件, 环形腔 SRO 输出的信号光和闲频光功率分别为

$$\begin{cases} P_{rs,out} = T_{rs} P_{rs} \\ P_{ri,out} = \frac{\lambda_s}{\lambda_i} (T_{rs} + V_{rs}) P_{rs} \end{cases} \quad (14)$$

可以利用式(9)、(10)、(13)、(14)以及实验参数分别计算驻波腔、环形腔 SRO 的阈值抽运功率及输出的信号光和闲频光的功率。

### 3 实验装置

图 5 为利用基于 MgO:PPLN 晶体的 SRO 获得连续单频红外激光输出的实验装置。抽运光源为自制的全固态连续单频 1.06  $\mu\text{m}$  激光器, 输出功率为 30 W、线宽为 200 kHz、1 min 内的频率漂移小于 5 MHz。抽运光首先经过半波片 1(HWP1)和光隔离器(OI)以防止

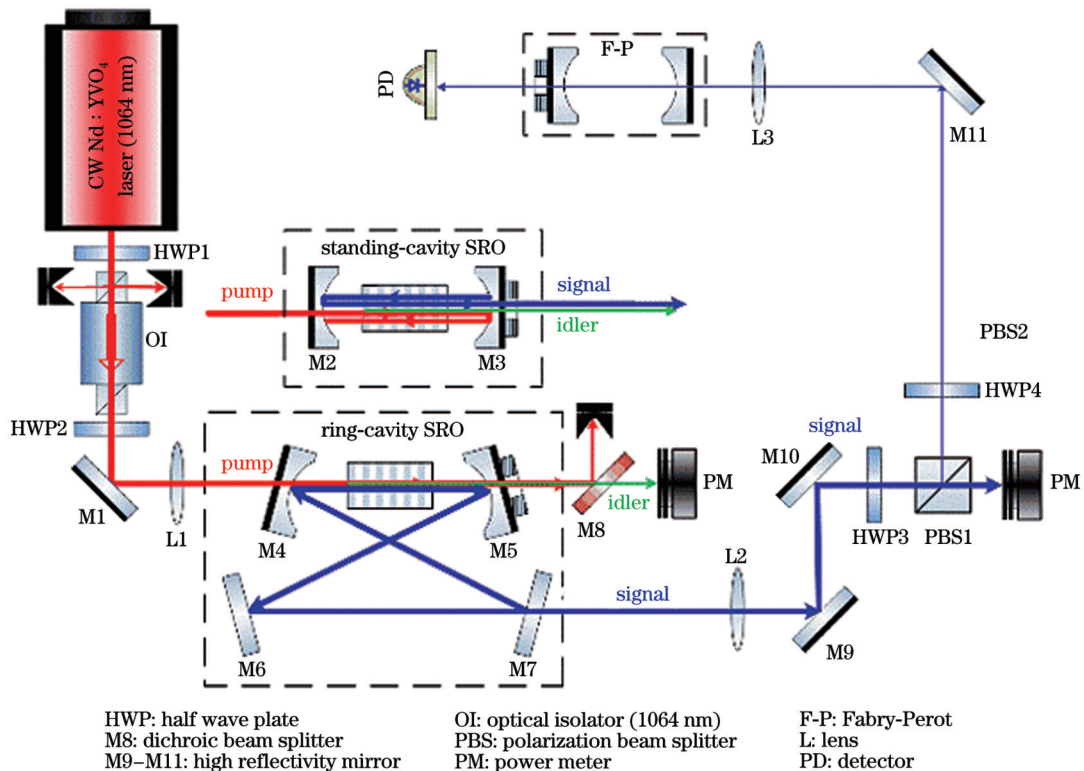


图 5 利用单共振光学参量振荡器产生连续单频红外激光的实验装置

Fig. 5 Experimental setup for generating continuous-wave single-frequency infrared laser by SRO

反射光入射到激光器中影响其正常运转,然后通过半波片 2(HWP2)控制抽运光进入 SRO 腔的偏振方向。实验测量得到光隔离器中抽运光的透射率为 88%。抽运光在注入到 SRO 腔之前,经过的光学元件对其功率都有一定程度的损耗,因此 SRO 腔前抽运光的功率最大为 25.5 W。驻波腔 SRO 的输入耦合镜 M2 的凹面镀有抽运光高透膜及闲频光和信号光高反膜(透射率  $T > 95\%$  @ 1.06  $\mu\text{m}$ , 反射率  $R > 99.8\%$  @ 1.5  $\mu\text{m}$  & 3.3  $\mu\text{m}$ ),平面镀有抽运光减反膜( $R < 0.2\%$  @ 1.06  $\mu\text{m}$ );输出耦合镜 M3 的凹面镀有抽运光高反膜、闲频光高透膜和信号光部分反射膜( $R > 99.8\%$  @ 1.06  $\mu\text{m}$ ,  $T > 95\%$  @ 3.3  $\mu\text{m}$ ,  $R = 97.5\%$  @ 1.5  $\mu\text{m}$ ),平面镀有信号光和闲频光减反膜( $R < 0.2\%$  @ 1.5  $\mu\text{m}$  & 3.3  $\mu\text{m}$ )。环形腔 SRO 的输入镜 M4 的凹面镀有抽运光高透膜及信号光和闲频光高反膜( $T > 95\%$  @ 1.06  $\mu\text{m}$ ,  $R > 99.8\%$  @ 1.5  $\mu\text{m}$  & 3.3  $\mu\text{m}$ ),平面镀有抽运光减反膜( $R < 0.2\%$  @ 1.06  $\mu\text{m}$ );平凹镜 M5 的凹面镀有信号光高反膜、闲频光高透膜( $R > 99.8\%$  @ 1.5  $\mu\text{m}$ ,  $T > 95\%$  @ 3.3  $\mu\text{m}$ ),平面镀有抽运光和闲频光减反膜( $T > 95\%$  @ 1.06  $\mu\text{m}$  & 3.3  $\mu\text{m}$ );平面镜 M6 的正面镀有信号光高反膜( $R > 99.8\%$  @ 1.5  $\mu\text{m}$ );平面镜 M7 的正面镀有信号光部分反射膜( $R = 97.5\%$  @ 1.5  $\mu\text{m}$ ),背面镀有信号光减反膜( $R < 0.2\%$  @ 1.5  $\mu\text{m}$ )。M3 和 M5 固定在压电陶瓷(PZT)上,通过驱动 PZT 控制和锁定 SRO 的腔长。腔内非线性晶体采用尺寸(厚度 $\times$ 宽度 $\times$ 长度)为 1 mm $\times$ 10 mm $\times$ 30 mm、掺杂氧化镁的质量分数为 5% 的 MgO:PPLN 晶体,晶体的端面均镀有抽运光、信号光和闲频光减反膜( $R < 0.5\%$  @ 1.06  $\mu\text{m}$  & 1.5  $\mu\text{m}$  & 3.3  $\mu\text{m}$ ),极化周期为 30.6  $\mu\text{m}$ 。利用控温精度为 0.01  $^{\circ}\text{C}$  的温度控制仪控制 MgO:PPLN 晶体的温度。用功率计测量 SRO 输出的信号光和闲频光的功率和功率波动,利用波长计测量信号光的波长及频率漂移。

## 4 实验结果

当控制 MgO:PPLN 晶体的温度为 40  $^{\circ}\text{C}$  时, SRO 输出的信号光和闲频光波长分别为 1.553  $\mu\text{m}$  和 3.378  $\mu\text{m}$ 。驻波腔 SRO 输出的信号光和闲频光功率随抽运光功率变化的数据如图 6 中的三角形和方块所示,驻波腔 SRO 的阈值抽运功率为 3.2 W。当抽运光功率为 14.2 W 时,驻波腔 SRO 输出的信号光和闲频光功率分别为 5.2 W 和 2.2 W,光光转换效率为 52.1%。环形腔 SRO 输出的信号光和闲频光功率随抽运光功率变化的数据如图 6 中的星形和实心圆所示,环形腔 SRO 的阈值抽运功率为 7.2 W。当抽运光功率为 25 W 时,环形腔 SRO 输出的信号光和闲频光功率分别为 8.1 W 和 3.6 W,光光转换效率为 46.8%。图 6 中的实线从上到下分别为利用式(9)、(10)、(13)和(14)以及下述实验参数理论计算得到的驻波腔和环

形腔 SRO 输出的信号光、闲频光功率随抽运光功率的变化曲线。理论计算中所用的实验参数为:  $d_{\text{eff}} = 15.9 \text{ pm}\cdot\text{V}^{-1}$ ,  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ A}\cdot\text{s}\cdot(\text{V}\cdot\text{m})^{-1}$ ,  $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $T_{\text{ss}} = T_{\text{rs}} = 2.5\%$ ,  $V_{\text{ss}} = 1.5\%$ ,  $V_{\text{rs}} = 2.1\%$ ,  $\lambda_p = 1.06 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_s = 1.553 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_i = 3.378 \mu\text{m}$ ,  $n_p = 2.15$ ,  $n_s = 2.13$ ,  $n_i = 2.08$ 。可以看出,在现有的抽运光功率下,环形腔 SRO 输出光功率的实测值和理论预测基本一致。当抽运光功率小于 15 W 时,驻波腔 SRO 输出光功率的实测值和理论预测基本一致;但当抽运光功率大于 15 W 时,驻波腔 SRO 输出光功率的实测值随抽运光功率的增大而减小,与理论预测结果的偏差较大。根据式(1)可知,当非线性晶体的长度及晶体内信号光的腰斑、折射率保持不变时,非线性晶体的热透镜效应与内腔共振的信号光功率有关。当抽运光功率为 15 W 时,驻波腔 SRO 内共振的信号光功率为 260 W,此时非线性晶体的热透镜焦距为 14 mm,对应的驻波腔 SRO 的稳定性参数为 0.98。继续增加抽运光功率,驻波腔 SRO 的稳定性参数将大于 1, SRO 不能稳定运转,导致 SRO 输出功率不再继续增加。当抽运光功率为 25 W 时,环形腔 SRO 内共振的信号光功率为 370 W,此时非线性晶体的热透镜焦距为 10 mm,环形腔 SRO 仍可以稳定运转。因此,在整个抽运光调节范围内,环形腔 SRO 输出光功率的实测值随抽运光功率的增大而增大。由图 6 所示的 SRO 输出功率特性曲线可以看出:驻波腔 SRO 的阈值抽运功率低于环形腔 SRO 的阈值抽运功率;当抽运光功率小于 15 W 时,驻波腔 SRO 的输出功率特性要优于环形腔 SRO 的输出功率特性;但当抽运光功率大于 15 W 时,环形腔 SRO 的输出功率特性要优于驻波腔 SRO 的输出功率特性。为获得更高的信号光和闲频光输出功率,环

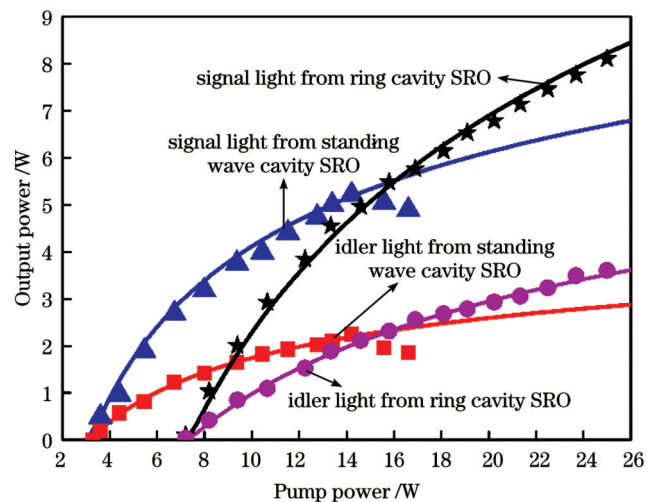


图 6 SRO 输出信号光和闲频光的功率随抽运光功率的变化 (点为实验数据, 线为理论预测结果)

Fig. 6 Output power of signal and idler light from SRO versus pump power (point is experimental data and curve is theoretical prediction result)

形腔 SRO 是比较好的选择。

通过控制 SRO 腔内 MgO:PPLN 晶体的温度可以获得波长可调谐的信号光和闲频光输出。当 MgO:PPLN 晶体的温度从 30 °C 调节到 65 °C 时, SRO 输出的信号光波长可从 1550.03 nm 调谐到 1561.38 nm, 调谐范围达 13.35 nm, 对应的闲频光波长可从 3394.7 nm 调谐到 3340.13 nm, 调谐范围达 54.57 nm。此外, 由于红外激光的光束质量对其应用具有重要的影响, 当 MgO:PPLN 晶体的温度为 40 °C 时, SRO 输出的信号光和闲频光波长分别为 1.553  $\mu\text{m}$  和 3.378  $\mu\text{m}$ 。在上述 SRO 运转条件下, 利用光束质量分析仪测量了信号光的光束质量。实测的驻波腔 SRO 输出的信号光在水平方向上的光束质量因子  $M_x^2 = 1.23$ , 在垂直方向上的光束质量因子  $M_y^2 = 1.12$ 。环形腔 SRO 输出的信号光在水平方向上的光束质量因子  $M_x^2 = 1.31$ , 在垂直方向上的光束质量因子  $M_y^2 = 1.13$ 。由于环形腔 SRO 中的振荡激光相对于腔镜有一定的入射角, 故输出信号光在水平方向上的光束质量因子略大于驻波腔 SRO 输出信号光的光束质量因子; 环形腔和驻波腔 SRO 输出的信号光在垂直方向上的光束质量因子基本相同。由于光束质量分析仪的波长测量范围为 1.44~1.60  $\mu\text{m}$ , 实验中没有分析测量闲频光的光束

质量。

当抽运光功率为 14 W 时, 利用自由光谱区范围为 150 MHz、精细度为 380 的分析腔以及数字示波器测量记录了 SRO 输出信号光的线宽。实测的驻波腔和环形腔 SRO 输出信号光的线宽分别为 0.58 MHz 和 0.43 MHz, 该测量值受到分析腔分辨率的限制。根据信号光的线宽以及信号光和闲频光的波长可以估算得到驻波腔和环形腔 SRO 输出闲频光的线宽分别小于 2.74 MHz 和 2.03 MHz。可以看出, 环形腔 SRO 输出下转换光的线宽优于驻波腔 SRO 输出的下转换光的线宽。

为进一步研究 SRO 输出激光的稳定性, 利用功率计测量了信号光和闲频光的长期功率波动, 并用波长计测量了信号光的长期频率漂移(由于波长计的限制, 闲频光的频率无法直接测量)。当 MgO:PPLN 晶体的温度为 40 °C, 抽运光功率分别为 13.5 W 和 15.0 W 时, 驻波腔和环形腔 SRO 输出的信号光和闲频光功率均分别为 5.0 W 和 2.0 W。图 7 为实测的 2 h 内信号光和闲频光的功率随时间的变化曲线, 驻波腔 SRO 输出信号光和闲频光的功率波动分别优于  $\pm 2.76\%$  和  $\pm 2.53\%$ , 环形腔 SRO 输出信号光和闲频光的功率波动分别优于  $\pm 1.24\%$  和  $\pm 1.19\%$ 。

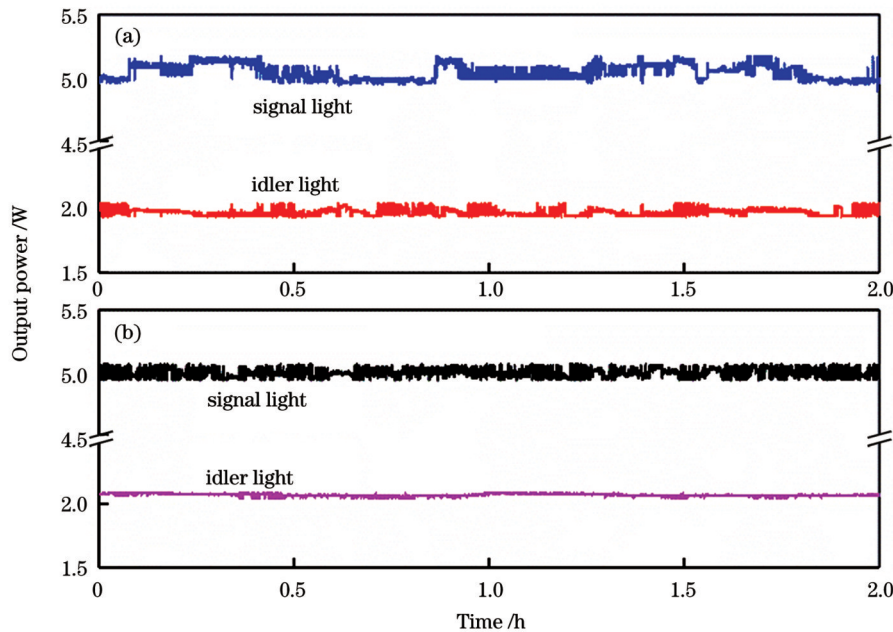


图 7 SRO 自由运转时信号光和闲频光的功率随时间的变化。(a) 驻波腔 SRO; (b) 环形腔 SRO

Fig. 7 Power of signal and idler light versus time when SRO is free running. (a) Standing wave cavity SRO; (b) ring cavity SRO

波长计测量记录的 2 h 内驻波腔和环形腔 SRO 输出信号光的长期频率漂移如图 8 所示, 分别优于  $\pm 40$  MHz 和  $\pm 28$  MHz。可以看出, 在 SRO 输出信号光和闲频光功率相同的情况下, 环形腔 SRO 输出激光的功率和频率稳定性均优于驻波腔 SRO。

最后实验研究了在高功率抽运条件下环形腔 SRO 的输出特性。当 MgO:PPLN 晶体温度为

40 °C、抽运光功率为 25.0 W 时, 环形腔 SRO 输出的信号光和闲频光功率分别为 8.1 W 和 3.6 W。图 9 (a)、(b) 分别为实测的 2 h 内信号光、闲频光的功率随时间的变化曲线和信号光的长期频率漂移曲线。信号光和闲频光的功率波动分别优于  $\pm 1.91\%$  和  $\pm 1.88\%$ , 信号光的频率漂移优于  $\pm 48$  MHz。

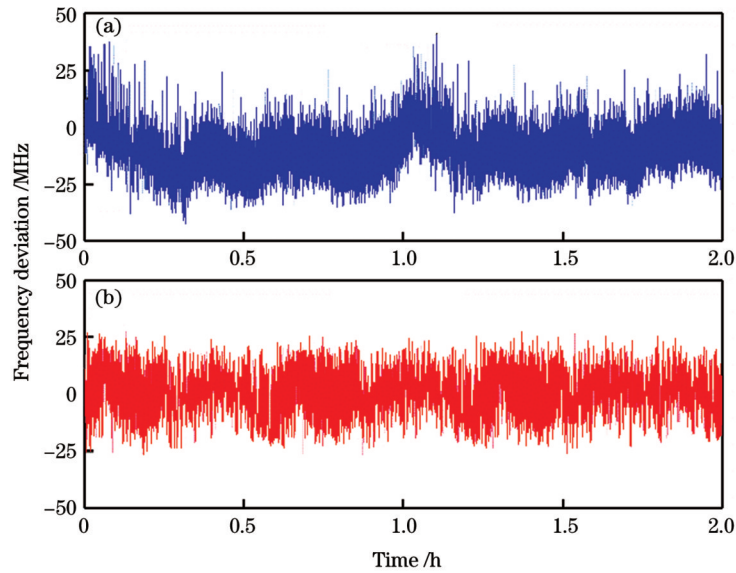


图 8 SRO 自由运转时信号光的频率漂移曲线。(a)驻波腔 SRO;(b)环形腔 SRO

Fig. 8 Frequency drift curve of signal light when SRO is free running. (a) Standing wave cavity SRO; (b) ring cavity SRO

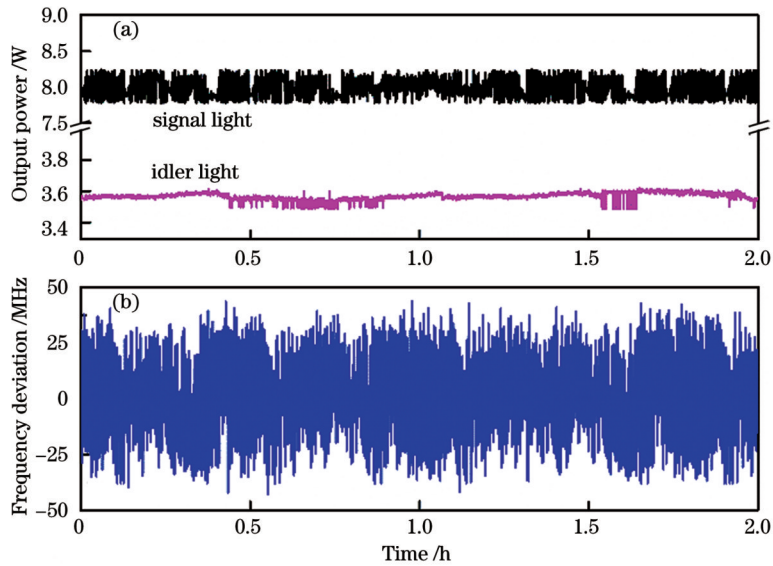


图 9 环形腔 SRO 自由运转时信号光和闲频光的功率以及信号光的频率随时间的变化曲线。(a)信号光和闲频光的功率随时间的变化;(b)信号光的频率随时间的变化

Fig. 9 Output power of signal and idler light and frequency of signal light versus time when ring cavity SRO is free running. (a) Power of signal and idler light versus time; (b) frequency of signal light versus time

## 5 结 论

为了获得稳定运转的高功率红外激光输出,在高抽运功率下研究了 SRO 的腔型对其输出特性的影响。首先从理论上分析了驻波腔和环形腔结构下 SRO 腔长以及非线性晶体的热透镜效应对谐振腔稳定性的影响,发现环形腔 SRO 在谐振腔参数变化较大的范围内均可稳定运转。进一步理论分析了 SRO 的阈值抽运功率以及输出激光功率随抽运光功率的变化规律。其次实验搭建了基于 MgO:PPLN 晶体的两镜驻波腔和四镜环形腔 SRO。当 MgO:PPLN 晶体的温度从 30 °C 调节到 65 °C 时, SRO 输出的信号光波长可从

1550.03 nm 调谐到 1561.38 nm,对应的闲频光波长可从 3394.7 nm 调谐到 3340.13 nm。驻波腔 SRO 的阈值抽运功率为 3.2 W,当抽运光功率为 14.2 W 时,信号光和闲频光功率分别为 5.2 W 和 2.2 W,光光转换效率为 52.1%。当抽运光功率小于 15 W 时,驻波腔 SRO 输出光功率的实测值和理论预测基本一致;但当抽运光功率大于 15 W 时,驻波腔 SRO 输出光功率的实测值随抽运光功率的增大而减小,与理论预测偏差较大。这是由于随着抽运功率的增大,非线性晶体的热透镜效应导致驻波腔 SRO 不能稳定运转。环形腔 SRO 的阈值抽运功率为 7.2 W,当抽运光功率为 25 W 时,信号光和闲频光功率分别为 8.1 W 和 3.6 W,光光转换效

率为 46.8%。环形腔 SRO 输出光功率的实测值和理论预测基本一致。驻波腔 SRO 输出信号光和闲频光在 2 h 内的功率波动分别优于  $\pm 2.76\%$  和  $\pm 2.53\%$ , 环形腔 SRO 输出信号光和闲频光在 2 h 内的功率波动分别优于  $\pm 1.24\%$  和  $\pm 1.19\%$ 、信号光的长期频率漂移分别优于  $\pm 40$  MHz 及  $\pm 28$  MHz。研究结果表明, 为获得更高的信号光和闲频光输出功率及运转稳定性, 环形腔 SRO 是比较好的选择。

### 参 考 文 献

- [1] Karstad K, Stefanov A, Wegmuller M, et al. Detection of mid-IR radiation by sum frequency generation for free space optical communication[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(3/4/5): 537-544.
- [2] Peltola J, Vainio M, Hieta T, et al. High sensitivity trace gas detection by cantilever-enhanced photoacoustic spectroscopy using a mid-infrared continuous-wave optical parametric oscillator[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 10240-10250.
- [3] Siciliani de Cumis M, Viciani S, Borri S, et al. Widely-tunable mid-infrared fiber-coupled quartz-enhanced photoacoustic sensor for environmental monitoring[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28222-28231.
- [4] Pandey R, Dingari N C, Spegazzini N, et al. Emerging trends in optical sensing of glycemic markers for diabetes monitoring[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2015, 64: 100-108.
- [5] Goddard L L, Bank S R, Wistey M A, et al. Recombination, gain, band structure, efficiency, and reliability of 1.5- $\mu\text{m}$  GaInNAsSb/GaAs lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(8): 083101.
- [6] Shen D Y, Sahu J K, Clarkson W A. Highly efficient Er, Yb-doped fiber laser with 188 W free-running and  $>100$  W tunable output power[J]. *Optics Express*, 2005, 13(13): 4916-4921.
- [7] Taccheo S, Svelto C, Laporta P, et al. Experimental analysis and theoretical modeling of a diode-pumped Er: Yb: glass microchip laser[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(8): 889-891.
- [8] Hanna D C, Mussett S G, Pacheco M T T, et al. A synchronously pumped waveguide  $\text{CH}_4$  Raman laser at 1.54  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Communications*, 1988, 65(4): 279-282.
- [9] Liu C C, Guo X M, Bai Z L, et al. High-efficiency continuously tunable single-frequency doubly resonant optical parametric oscillator[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(10): 1477-1481.
- [10] Liu J L, Li Y M, Liu Q, et al. Continuous-wave, single-frequency intracavity singly resonant optical parametric oscillator at 1.5- $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(3): 244-245.
- [11] Liu J L, Liu Q, Li H, et al. Low noise, continuous-wave single-frequency 1.5- $\mu\text{m}$  laser generated by a singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(11): 114215.
- [12] Lin S T, Lin Y Y, Huang Y C, et al. Observation of thermal-induced optical guiding and bistability in a mid-IR continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(20): 2338-2340.
- [13] Bosenberg W R, Drobshoff A, Alexander J I, et al. 93% pump depletion, 3.5-W continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(17): 1336-1338.
- [14] Henderson A, Stafford R. Low threshold, singly-resonant CW OPO pumped by an all-fiber pump source[J]. *Optics Express*, 2006, 14(2): 767-772.
- [15] 姜洪波, 沈利洋, 赵志刚, 等. 连续波光参量振荡器最优转换效率的实验研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1001011.
- [15] Jiang H B, Shen L F, Zhao Z G, et al. Optimal conversion efficiency of continuous-wave optical parametric oscillator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1001011.
- [16] Bae I H, Do Lim S, Yoo J K, et al. Development of a mid-infrared CW optical parametric oscillator based on fan-out grating MgO:PPLN pumped at 1064 nm[J]. *Current Optics and Photonics*, 2019, 3(1): 33-39.
- [17] Wang K, Gao M Y, Yu S H, et al. A compact and high efficiency intracavity OPO based on periodically poled lithium niobate[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 5079.
- [18] 王海龙, 杨慧琦, 苏静, 等. 基于单共振光学参量振荡器实现近红外到中红外激光输出的实验研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(18): 1801005.
- [18] Wang H L, Yang H Q, Su J, et al. Experimental study of near-infrared to mid-infrared laser output based on single resonant optical parametric oscillator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 1801005.
- [19] Vainio M, Peltola J, Persijn S, et al. Thermal effects in singly resonant continuous-wave optical parametric oscillators[J]. *Applied Physics B*, 2009, 94(3): 411-427.
- [20] Guha S. Focusing dependence of the efficiency of a singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Applied Physics B*, 1998, 66(6): 663-675.

## Study on Output Characteristics of High-Power Singly Resonant Optical Parametric Oscillator

Nie Dandan<sup>1</sup>, Qi Meng<sup>2</sup>, Li Yuanji<sup>2,3</sup>, Feng Jinxia<sup>2,3</sup>, Zhang Kuanshou<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China;

<sup>3</sup>Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China

### Abstract

**Objective** 1.5–1.8  $\mu\text{m}$  and 3–5  $\mu\text{m}$  infrared lasers are widely used in free-space optical communication, trace gas monitoring, environmental pollution monitoring, and biomedicine. Infrared lasers can be obtained using quantum cascade, fiber, solid-state, and



Raman lasers. Compared with these methods, an optical parametric oscillator (OPO) can be used to achieve an infrared laser with a wider tuning range, higher power, and more stable operation. Based on the resonance of the pump, signal, and idler laser in the OPO cavity, the OPO can be referred to as singly resonant OPO (SRO), doubly resonant OPO (DRO), or triply resonant OPO (TRO). Compared with DRO and TRO, SRO requires only that the signal (or idler) light resonates in the cavity, has a relatively simple design, and no external servo system locking is required to obtain a stable, high-power output. Therefore, the output characteristics of a high-power SRO are investigated in this study.

**Methods** First, a theoretical analysis is conducted on the influence of the SRO cavity length and nonlinear crystal thermal lens effect on the stability of the resonant cavity under standing-wave and ring-cavity structures. To ensure a stable operation of the SRO within significant changes in the resonant cavity parameters, the cavity length corresponding to  $|A+D|/2=0$  is selected when the SRO is designed, that is, the standing wave cavity length is 54 mm, and the ring cavity length is 516 mm. According to the focusing factor selected for the SRO cavity, the waist spot of the signal light at the center of the MgO:PPLN crystal is calculated to be 59.5  $\mu\text{m}$ . Subsequently, based on the design of the SRO resonant cavity structure, the laser output characteristics of different SRO cavity types are theoretically analyzed. The theoretical analysis reveals that the pump light in the standing-wave cavity SRO passes through the nonlinear crystal twice; therefore the power gain of the signal light during forward and backward transmission must be considered simultaneously, whereas the pump light in the ring-cavity SRO passes through the nonlinear crystal in a single pass, and the parametric interaction during backward transmission is not considered. The threshold pump power and output power of the signal and idler light from the standing-wave cavity and ring-cavity SROs are calculated. Finally, the two mirror standing-wave cavity SROs and four mirror ring-cavity SROs based on the MgO:PPLN crystal pumped by a high-power continuous-wave single frequency 1.06  $\mu\text{m}$  laser are constructed, and the relationship between the output power of the signal and idler light with the pump power, as well as the power fluctuation and frequency drift of the signal and idler light are studied.

**Results and Discussions** By controlling the temperature of MgO:PPLN from 30  $^{\circ}\text{C}$  to 65  $^{\circ}\text{C}$ , the signal wavelength can be tuned from 1550.03 nm to 1561.38 nm, and the corresponding idler wavelength can be tuned from 3394.7 nm to 3340.13 nm. When the temperature of the MgO:PPLN crystal is controlled as 40  $^{\circ}\text{C}$ , the signal and idler wavelengths of the SRO are 1.553  $\mu\text{m}$  and 3.378  $\mu\text{m}$ , respectively. The threshold pump power of the standing-wave cavity SRO is 3.2 W, and at a pump power of 14.2 W, the signal and idler powers are 5.2 W and 2.2 W, respectively. The threshold pump power of the ring-cavity SRO is 7.2 W, and at the pump power of 25 W, the signal and idler powers are 8.1 W and 3.6 W, respectively. The measured value of the ring-cavity SRO output power is in good agreement with the theoretical prediction result (Fig. 6). When the pump power is less than 15 W, the measured standing-wave cavity SRO output power agrees well with the theoretical prediction result; however, when the pump power is greater than 15 W, the measured standing-wave cavity SRO output power deviates significantly from the theoretical prediction result (Fig. 6). According to the theoretical analysis, when the pump power is 15 W, the resonant signal power in the standing-wave cavity SRO is 260 W. The thermal lens focal length of the nonlinear crystal is 14 mm, and the corresponding stability parameter of the standing-wave cavity SRO is 0.98. An increase in the pump power results in the stability parameter of the standing-wave cavity SRO to be greater than 1; the SRO cannot operate stably, and the output power of the SRO decreases. To obtain a higher output power from the signal and idler lasers, the ring-cavity SRO is a better choice. In addition, when the signal and idler output powers from the standing-wave cavity and ring-cavity SROs are 5.0 W and 2.0 W, respectively, the power fluctuations in the signal and idler light by the standing-wave cavity SRO within 2 h are better than  $\pm 2.76\%$  and  $\pm 2.53\%$ , and the power fluctuations in the signal and idler light by the ring-cavity SRO within 2 h are better than  $\pm 1.24\%$  and  $\pm 1.19\%$ , respectively. The long term frequency drift of the signal is better than  $\pm 40$  MHz and  $\pm 28$  MHz, respectively.

**Conclusions** The influence of the SRO cavity type on the output characteristics at high pump power is investigated in this study. First, a theoretical analysis is conducted on the influence of the SRO cavity length and nonlinear crystal thermal lens effect on the stability of the resonant cavity under the standing-wave cavity and ring-cavity structures. Notably, the ring-cavity SRO can operate stably within significant changes in the resonant cavity parameters. The output characteristics of the SRO are also theoretically analyzed. Second, a two-mirror standing-wave cavity and a four-mirror ring-cavity SROs based on a MgO:PPLN crystal are experimentally constructed. At a pump power of 14.2 W, the signal and idler output powers from the standing-wave cavity SRO are 5.2 W and 2.2 W, respectively. At a pump power of 25 W, the signal and idler output powers from the ring-cavity SRO are 8.1 W and 3.6 W, respectively. The measured value of the ring-cavity SRO output power agrees well with the theoretical prediction result. The power fluctuations in the signal and idler light from the standing-wave cavity SRO within 2 h are better than  $\pm 2.76\%$  and  $\pm 2.53\%$ , and the power fluctuations in the signal and idler by the ring-cavity SRO within 2 h are better than  $\pm 1.24\%$  and  $\pm 1.19\%$ , respectively. The long term frequency drift of signal light from the standing-wave cavity and ring-cavity SROs are better than  $\pm 40$  MHz and  $\pm 28$  MHz, respectively. The research results indicate that to obtain a higher output power from the signal and idler lasers, the ring-cavity SRO is a good choice.

**Key words** nonlinear optics; singly resonant optical parametric oscillator; continuous-wave single-frequency infrared laser; high power; ring cavity