

内腔倍频单共振光学参量振荡器输出特性分析

李 鹏, 高小霞, 顾玉宗*

河南大学物理与电子学院微系统物理研究所, 河南 开封 475004

摘要 连续波单共振光学参量振荡器(SRO)的阈值和稳定运转与共振信号光在谐振腔内传播一周所产生的损耗密切相关。考虑非线性晶体的线性吸收和内腔倍频(IFD)引入的非线性损耗,在平面波近似下建立了描述连续波IFD-SRO输出特性的理论模型,并给出了解析解;理论计算结果与实验结果较好地吻合。根据该结果,预测了532 nm绿光抽运的IFD-SRO在共振信号光波长为780 nm时的输出特性和1064 nm红外光抽运的IFD-SRO在共振信号光波长为1560 nm时的输出特性。该理论模型简单、易于计算,为优化设计连续波IFD-SRO提供了指导。

关键词 非线性光学; 参量过程; 单共振光学参量振荡器; 内腔倍频; 平面波近似; 输出特性

中图分类号 O437 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.091901

Analysis of Output Characteristics of Intracavity-Frequency-Doubled Singly Resonant Optical Parametric Oscillator

Li Peng, Gao Xiaoxia, Gu Yuzong

*Institute of Microsystem Physics, School of Physics and Electronics,
Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China*

Abstract The threshold and stable operation of a continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator (SRO) are closely related with the roundtrip loss of the resonant signal travelling in the resonant cavity. Under the plane-wave approximation, a theoretical model considering the linear absorption of the nonlinear crystal and the nonlinear loss introduced by intracavity-frequency-doubled (IFD) is proposed to describe the output characteristics of continuous-wave IFD-SRO. The analytical solution is also given. The theoretical calculation results are in good agreement with the experimental results. According to these results, the output characteristics of the 532 nm green laser pumped IFD-SRO with resonant signal at 780 nm and the 1064 nm infrared laser pumped IFD-SRO with resonant signal at 1560 nm are predicted. The model is simple and easy to calculate. It provides a guideline for optimizing the design of continuous-wave IFD-SRO.

Key words nonlinear optics; parametric processes; singly resonant optical parametric oscillator; intracavity-frequency-doubling; plane-wave approximation; output characteristics

OCIS codes 190.4410; 190.4360; 190.4975

1 引 言

连续波内腔倍频单共振光学参量振荡器(IFD-SRO)可以同时输出共振信号光、非共振闲置光和倍频信号光,输出激光的波长可以覆盖紫外到中红外波段^[1-5]。IFD-SRO具有系统简单、调谐范围宽及易调谐的特点^[6-12],但其运转特性(阈值和输出功率)受各种因素的影响,包括易于控制的影响因素(如非线性晶体的长度、抽运腰斑和谐振腔)和不易控制的影响因素(如非线性晶体对相互作用激光的线性吸收^[10-11]、绿光导致的红外吸收^[12]、非线性频率变换引入的损耗^[1-5],以及晶体的热效应^[10-11]等)。研究这些因素对IFD-SRO输出

收稿日期: 2017-03-14; 收到修改稿日期: 2017-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(61405109,61404045,U1404624)、河南省科技发展计划(144300510018,B2016056)、河南大学博士科研启动项目(CJ3050A24051)

作者简介: 李 鹏(1988—),男,博士,讲师,主要从事激光技术和非线性光学等方面的研究。E-mail: lipengnh@163.com

* 通信联系人。E-mail: yzgu@henu.edu.cn

特性的影响,对优化 IFD-SRO 的设计具有指导意义。然而,实验中各相互作用的激光为高斯光束,采用高斯光束近似的实际理论计算比较复杂^[13-14],采用平面波近似不仅可以简化计算,同时能得到较好的预测结果。

1995年,Moore等^[15]在平面波近似下研究了 IFD-SRO 的输出特性。1998年,Aytür等^[16]采用平面波理论分析了自倍频 OPO 的输出特性(单次穿过饱和和信号增益和光子转化效率)。尽管采用了平面波近似,这些理论仍然过于复杂,给理论预测 IFD-SRO 的输出特性带来很大的不便。随着周期极化晶体制备技术的完善和高功率单频激光器的发展,人们已经实现了连续波 IFD-SRO 的稳定运转。在绿光抽运 IFD-SRO 的研究方面,2008年,Samanta等^[1]采用长度为 5 mm 的硼酸铋(BiB_3O_6 , BiBO)对 532 nm 绿光抽运的 $\text{MgO}:\text{sPPLT-SRO}$ 中的共振信号光进行内腔倍频,实现了 425~489 nm 蓝光范围的调谐,此时包含倍频晶体时的 SRO 阈值为 4 W,抽运功率为 9 W 时可获得功率为 450 mW 的单频蓝光;同年,My等^[2]采用长度为 10 mm 的偏硼酸钡(BBO)晶体对 532 nm 绿光抽运的周期极化的掺氧化镁近化学计量比钽酸锂 SRO($\text{MgO}:\text{sPPLT-SRO}$)中的共振闲置光进行 IFD,实现了 585~678 nm 红橙光的调谐,包含倍频晶体时的 SRO 阈值为 4.5 W,抽运功率为 7.6 W 时通过实验获得了功率为 485 mW 的单频橙光;2014年,Aadhi等^[4]采用 5 mm 的 BiBO 对 532 nm 绿光抽运的 $\text{MgO}:\text{sPPLT-SRO}$ 中的共振信号光进行内腔倍频,实现了 355.4~418.2 nm 紫光的调谐,包含倍频晶体时的 SRO 阈值为 3.65 W,抽运功率为 8 W 时通过实验获得了功率为 770 mW、波长为 398.3 nm 的紫光;次年,他们采用 5 mm 的周期极化的磷酸氧钛钾(PPKTP)对 532 nm 绿光抽运的 $\text{MgO}:\text{sPPLT-SRO}$ 中的共振信号光进行 IFD,实现了 398.94.4~417.08 nm 紫外光的调谐,包含倍频晶体时的 SRO 阈值约为 3.14 W,抽运功率为 5 W 时通过实验获得了最高功率为 336 mW、波长为 398.94 nm 的紫光^[5],采用 PPKTP 进行 IFD 时可以杜绝由双折射晶体(如 BiBO)引入的走离效应,从而提高输出倍频紫光的光束质量。2012年,Devi等^[3]采用 30 mm 的 $\text{MgO}:\text{sPPLT}$ 对 1.064 μm 激光抽运的周期极化的掺氧化镁钽酸锂 SRO($\text{MgO}:\text{PPLN-SRO}$)中的共振信号光进行 IFD,实现了 775~806 nm 近红外激光的调谐,包含倍频晶体时的 SRO 阈值为 7.5 W,抽运功率为 27.4 W 时通过实验获得了功率为 3.7 W、波长为 793 nm 的激光。

本文考虑了非线性晶体对共振激光的吸收、腔镜和晶体表面的非理想镀膜引入的损耗以及共振光倍频导致的非线性损耗,采用平面波理论建立了描述 IFD-SRO 运转特性的理论模型,并给出了解析解,理论计算结果与实验结果较好地吻合。该研究为优化设计连续波 IFD-SRO 提供了指导。

2 基本原理

2.1 IFD-SRO 中的相位匹配特性

在 IFD-SRO 中,要求相互作用的激光既满足 OPO 过程的能量守恒和相位匹配条件,又满足信号光 SHG 过程的能量守恒和相位匹配条件。

OPO 过程中的能量守恒条件为

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad (1)$$

OPO 过程中相位匹配条件为

$$\Delta k_{\text{OPO}} = \frac{2\pi n(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{2\pi n(\lambda_s, T)}{\lambda_s} - \frac{2\pi n(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{2\pi m}{\Lambda_{\text{OPO}}} = 0, \quad (2)$$

SHG 过程中能量守恒条件为

$$\frac{1}{\lambda_{\text{SH}}} = \frac{2}{\lambda_s}, \quad (3)$$

SHG 过程中相位匹配条件为

$$\Delta k_{\text{SHG}} = \frac{2\pi n(\lambda_{\text{SH}}, T)}{\lambda_{\text{SH}}} - \frac{4\pi n(\lambda_s, T)}{\lambda_s} - \frac{2\pi q}{\Lambda_{\text{SHG}}} = 0, \quad (4)$$

式中 Δk_{OPO} 为 OPO 过程的相位失配量, Δk_{SHG} 为 SHG 过程的相位失配量,下标 p、s、i 和 SH 分别代表抽运光、共振信号光、非共振闲置光和倍频共振光, λ_j (j 可以为 p、s、i 和 SH) 表示相应的波长, $n(\lambda_j, T) = n_j$ 表

示波长为 λ_j 的激光在温度为 T 时非线性晶体中的折射率, Λ_{OPO} 和 Λ_{SHG} 分别为所采用的 OPO 晶体和 SHG 晶体的极化周期, m 和 q 为准相位匹配(QPM)阶数。通常选择一阶 QPM, 即 $m=q=1$ 。

根据上述理论和 QPM 晶体 $\text{MgO}:\text{PPLN}$ 和 $\text{MgO}:\text{sPPLT}$ 的 Sellmeier 公式^[17], 可以得到 IFD-SRO 的调谐特性。图 1 所示为 IFD-SRO 的温度调谐特性和共振光倍频所需 SHG 晶体的极化周期。对于 532 nm (绿光) 激光抽运的 IFD-SRO [图 1(a)], 选择 OPO 晶体极化周期 $\Lambda_{\text{OPO}}=8.7 \mu\text{m}$ 的 $\text{MgO}:\text{sPPLT}$ ($m=1$)。当晶体温度从 74 °C 变化到 133 °C 时, 信号光波长从 795 nm 调谐到 780 nm, 闲置光波长从 1608 nm 调谐到 1674 nm。采用 3 阶 QPM 的 $\text{MgO}:\text{sPPLT}$ ($q=3$) 对共振光进行倍频时, 若控制 SHG 晶体的温度为 80 °C, 则倍频所需极化周期从 9.1 μm 变化到 8.5 μm ^[18-19]。对于 1064 nm (红外光) 激光抽运的 IFD-SRO [图 1(b)], 选择 OPO 晶体极化周期 $\Lambda_{\text{OPO}}=30.6 \mu\text{m}$ 的 $\text{MgO}:\text{PPLN}$ ($m=1$), 当晶体温度从 61 °C 变化到 132 °C 时, 信号光波长从 1560 nm 调谐到 1590 nm, 闲置光波长从 3347 nm 调谐到 3215 nm, 采用一阶 QPM 的 $\text{MgO}:\text{PPLN}$ ($q=1$) 对共振光进行倍频时, 若控制 SHG 晶体温度为 80 °C, 则倍频所需极化周期从 19.48 μm 变化到 20.31 μm 。上述结果表明扇形极化周期结构的 QPM 晶体更适合作为此处的 SHG 晶体^[3]。

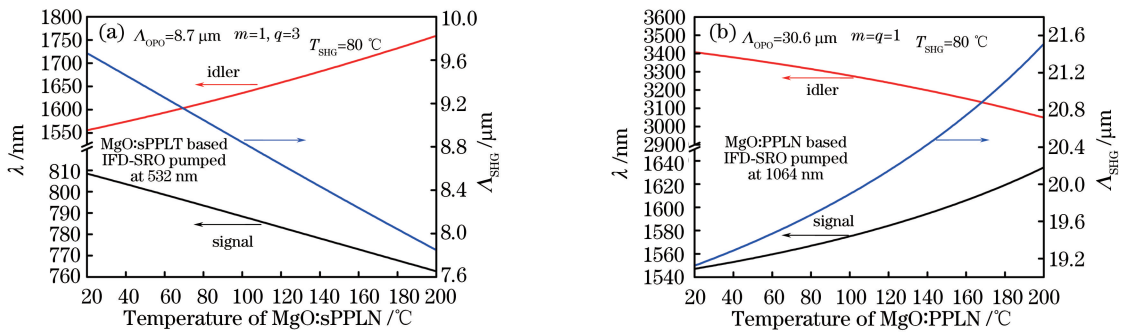


图 1 IFD-SRO 的温度调谐特性和共振光倍频所需 SHG 晶体的极化周期。(a) 抽运激光为 532 nm 绿光; (b) 抽运激光为 1064 nm 红外光

Fig. 1 Temperature tunability property of IFD-SRO and required poled period of SHG crystal for resonant light frequency-doubling. (a) Pumped at 532 nm green laser; (b) pumped at 1064 nm infrared laser

2.2 平面波近似下的理论模型

采用慢变振幅近似, 假设光波沿 z 轴传播, 可得到简化后的耦合波方程。在平面波近似下进行分析, 仅考虑抽运光、共振信号光、闲置光和倍频共振光的线性吸收和共振光的倍频转化。图 2 所示 IFD-SRO 中相互作用激光的耦合波方程为

$$\frac{dA_p}{dz} = -\frac{\alpha_{\text{OPO,p}}}{2}A_p + i\kappa_{\text{OPO,p}}A_sA_i \exp(-i\Delta k_{\text{OPO}}z), \quad (5)$$

$$\frac{dA_s}{dz} = -\frac{\alpha_{\text{OPO,s}} + \alpha_{\text{SHG,s}}}{2}A_s + i\kappa_{\text{SHG,s}}A_{\text{SH}}A_s^* \exp(i\Delta k_{\text{SHG}}z) + i\kappa_{\text{OPO,s}}A_pA_i^* \exp(i\Delta k_{\text{OPO}}z), \quad (6)$$

$$\frac{dA_i}{dz} = -\frac{\alpha_{\text{OPO,i}}}{2}A_i + i\kappa_{\text{OPO,i}}A_pA_s^* \exp(i\Delta k_{\text{OPO}}z), \quad (7)$$

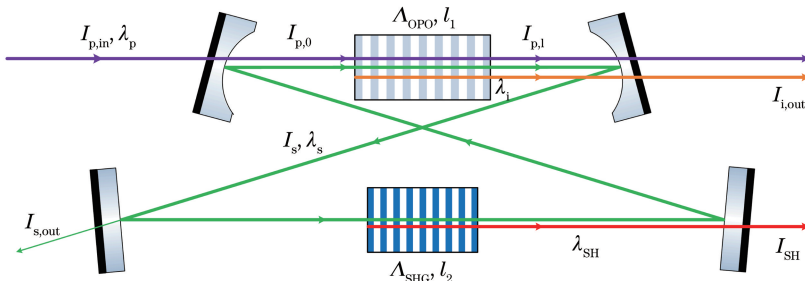


图 2 IFD-SRO 示意图

Fig. 2 Diagram of IFD-SRO

$$\frac{dA_{SH}}{dz} = -\frac{\alpha_{SHG,SH}}{2}A_{SH} + i\frac{\kappa_{SHG,SH}}{2}A_s^2 \exp(-i\Delta k_{SHG}z), \quad (8)$$

式中 A_j 为振幅, $\alpha_{OPO,j}$ 和 $\alpha_{SHG,j}$ 分别为 OPO 晶体和 SHG 晶体对光波 j 的线性吸收系数, $\kappa_{OPO,j} = \omega_j d_{\text{effOPO}} / (n_j c)$ 为 OPO 过程的耦合因子, $\kappa_{SHG,j} = \omega_j d_{\text{effSHG}} / (n_j c)$ 为 SHG 过程的耦合因子, d_{effOPO} 和 d_{effSHG} 分别为 OPO 晶体和 SHG 晶体的有效非线性系数, c 为真空中光速, ω_j 为 λ_j 的激光频率。图 2 中, l_1 和 l_2 分别为 OPO 晶体和 SHG 晶体的长度, $I_{p,0}$ 为抽运光的光强, $I_{p,1}$ 为 OPO 晶体末端抽运光的光强(即未转化的抽运光强), $I_{s,\text{out}}$ 、 $I_{i,\text{out}}$ 、 I_{SH} 分别为输出共振信号光的光强、输出闲置光的光强和输出倍频共振光的光强, I_s 为共振信号光的光强, $I_{p,\text{in}}$ 为输入抽运光的光强。在本研究中,为了方便计算,进行一定的简化,即令 $\alpha_{OPO,p} = \alpha_{OPO,i} = \alpha_{SHG,SH} = 0$, 并且满足完全相位匹配 $\Delta k_{OPO} = 0, \Delta k_{SHG} = 0$ 。

2.2.1 阈值

当忽略阈值处的抽运倒空,则晶体内抽运光场电场强度 A_p 恒定。如图 2 所示, SRO 中只有信号光共振,若信号光在 SRO 腔内传播一周的损耗较小,则 A_s 在 SRO 腔中保持恒定。闲置光场 A_i 和倍频光场 A_{SH} 在晶体线性增长。信号光场在环形腔内传播一周的光场增量为

$$\frac{\delta A_s}{A_s} = -\frac{\alpha_{OPO,s} l_1}{2} - \frac{\alpha_{SHG,s} l_2}{2} - \frac{T_s}{2} - \frac{V_s}{2} - \frac{\kappa_{SHG,SH} \kappa_{SH,s} |A_s|^2 l_2^2}{4} + \frac{\kappa_{OPO,s} \kappa_{OPO,i} |A_p|^2 l_1^2}{2}, \quad (9)$$

式中 T_s 为共振信号光的输出耦合透射率, V_s 为共振光在腔内传播一周时由腔镜和晶体表面的非理想镀膜导致的光功率损耗, δA_s 为共振信号场的变化。 $\kappa_{OPO,s} \kappa_{OPO,i} |A_p|^2 l_1^2 / 2$ 为信号光场的增益。信号光的损耗包括晶体的线性吸收损耗 $(\alpha_{OPO,s} l_1 + \alpha_{SHG,s} l_2) / 2$ 、输出耦合损耗 $T_s / 2$ 、腔镜和晶体表面的非理想镀膜损耗(散射和 Fresnel 损耗) $V_s / 2$ 以及倍频过程引入的非线性损耗 $\kappa_{SHG,SH} \kappa_{SH,s} |A_s|^2 l_2^2 / 4$ 。

考虑到阈值附近内腔信号场很小,忽略(9)式右侧第 5 项非线性损耗的影响。信号光强在环形腔内传播一周的增量为

$$\frac{\delta I_s}{I_s} = \kappa_{OPO,s} \kappa_{OPO,i} A_p^2 l_1^2 - \alpha_{OPO,s} l_1 - \alpha_{SHG,s} l_2 - T_s - V_s = 2\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \kappa_{OPO,s} \kappa_{OPO,i} l_1^2 I_p / n_p - \alpha_{OPO,s} l_1 - \alpha_{SHG,s} l_2 - T_s - V_s = \gamma_1 l_1^2 I_p - \alpha_{OPO,s} l_1 - \alpha_{SHG,s} l_2 - T_s - V_s, \quad (10)$$

式中 $\gamma_1 = (2\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \kappa_{OPO,s} \kappa_{OPO,i}) / n_p$ 为阈值因子,其中 μ_0 和 ϵ_0 分别为真空磁导率和真空介电常数。令(10)式两侧为零,对应抽运光的光强即为 IFD-SRO 的阈值 I_{th} , 即

$$I_{th} = (T_s + V_s + \alpha_{OPO,s} l_1 + \alpha_{SHG,s} l_2) / (\gamma_1 l_1^2). \quad (11)$$

2.2.2 输出特性

定义转化的抽运光强 $I_{p,\text{dep}}$ 与总抽运光强 $I_{p,\text{in}}$ 之比为抽运倒空 η_{dep} , 即

$$\eta_{\text{dep}} = I_{p,\text{dep}} / I_{p,\text{in}} = (I_{p,0} - I_{p,1}) / I_{p,\text{in}} = \sin^2 \left(\sqrt{\frac{2\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \kappa_{OPO,p} \kappa_{OPO,i} I_s}{n_s} l_1} \right) = \sin^2 (\sqrt{\gamma_2 l_1^2 I_s}), \quad (12)$$

式中 $\gamma_2 = 2\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \kappa_{OPO,p} \kappa_{OPO,i} / n_s$ 。

根据 Manley-Rowe 关系, 则有

$$I_{p,\text{dep}} = I_s \frac{\omega_p}{\omega_s} \left(T_s + V_s + \alpha_{OPO,s} l_1 + \alpha_{SHG,s} l_2 + \frac{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \kappa_{SHG,s} \kappa_{SHG,SH} I_s}{n_s} l_2^2 \right) = I_s \frac{\omega_p}{\omega_s} (T_s + V_s + \alpha_{OPO,s} l_1 + \alpha_{SHG,s} l_2 + \gamma_3 l_2^2 I_s), \quad (13)$$

式中 $\gamma_3 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \kappa_{SHG,2s} \kappa_{SHG,SH} / n_s$ 为倍频转化因子。

联立(12)、(13)式,记抽运比率 $N = I_{p,\text{in}} / I_{th}$, 对于每一个抽运光强 $I_{p,\text{in}}$ (抽运比率 N), 都能求出一个内腔信号场 I_s 和抽运倒空 η_{dep} 。

SRO 输出非共振闲置光的光强为

$$I_{i,\text{out}} = \frac{\omega_i}{\omega_p} I_{p,\text{in}} \eta_{\text{dep}}, \quad (14)$$

式中 ω_i 为闲置光频率, ω_p 为抽运光频率。

SRO 输出共振信号光的光强为

$$I_{i,\text{out}} = I_s T_s \quad (15)$$

输出的倍频共振信号光的光强为

$$I_{\text{SH}} = \gamma_3 l_2^2 I_s^2 \quad (16)$$

3 理论计算

根据上述关于 IFD-SRO 的理论分析,对文献[1-4]的实验结果进行了理论拟合,理论计算中的光强 I_j 与实际功率 P_j 之间的关系为

$$P_j = \pi I_j \omega_j^2, \quad (17)$$

式中 ω_j 为相互作用激光的腰斑,平面波近似下 ω_j 相同,调节该参数,使理论计算结果与实验结果相吻合。在所有的拟合中,选择 T_s 的变化范围为 $0.05\% \sim 0.1\%$, MgO:PPLN 对红外光的吸收系数为 $8 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$, MgO:sPPLT 对红外光的吸收系数为 $8.4 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$, BiBO/BBO 对红外光的吸收系数为 $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ 。考虑每片腔镜带来的损耗为 0.5% ,对于四镜环形腔,选择 $V_s = 2\%$;对于六镜环形腔,选择 $V_s = 3\%$ 。此外,为了更好地拟合实验中的倍频和非共振闲置光的输出功率,在拟合过程中考虑了输出损耗(输出耦合镜的非理想透射)和非理想抽运倒空的影响。实验中输出耦合镜的镀膜通常为宽带镀膜,其对闲置光和倍频信号光的输出耦合透射率往往小于 1,这使得非线性过程产生的激光并不能完全输出到腔外。由于理论拟合过程中采用平面波近似来代替实际实验情形(实际相互作用激光为高斯光束),因此采用高斯光束进行计算时,无法达到理想的抽运倒空^[14]。

理论拟合结果如图 3 所示,可以看出,输出功率的拟合结果与实验结果较好地吻合,绿线表示的抽运倒空与实验结果存在一定差异,但是其变化趋势与实验结果的变化趋势一致。这是由于实际相互作用的激光为高斯光束,且在高抽运功率下非线性晶体对相互作用激光的吸收带来了严重热效应。理论拟合过程中的一些参数(如 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 和 ω_j)的值由表 1 给出。

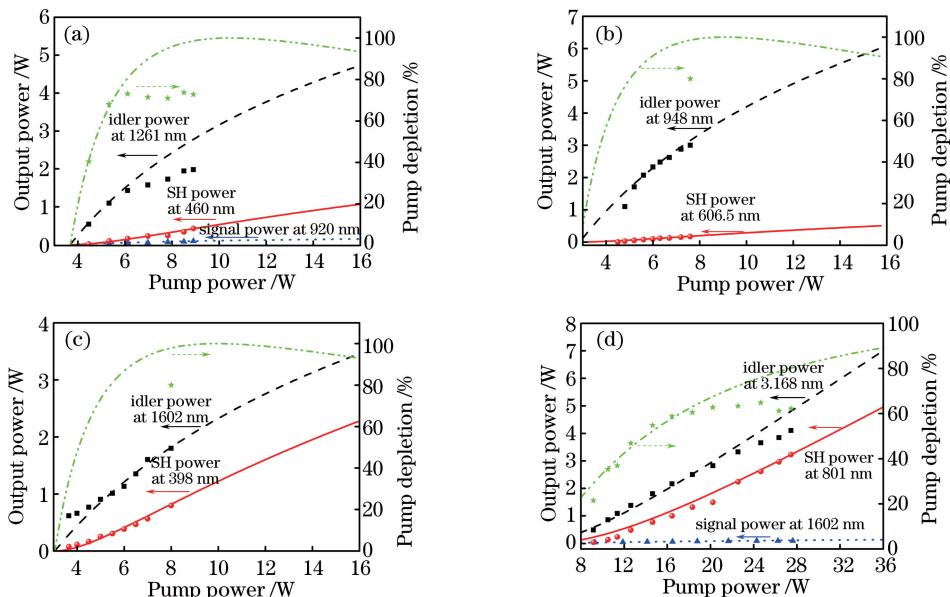


图 3 不同 IFD-SRO 的输出特性理论拟合。

(a)文献[1];(b)文献[2];(c)文献[4];(d)文献[3]

Fig. 3 Theoretical fitting for output characteristics of different IFD-SROs.

(a) Reference [1]; (b) reference [2]; (c) reference [4]; (d) reference [3]

表1 理论拟合中的部分参数

Table 1 Some parameters in theoretical fitting

Ref. No	$w_j/\mu\text{m}$	$\gamma_1/(10^{-6} \text{ W}^{-1})$	$\gamma_2/(10^{-6} \text{ W}^{-1})$	$\gamma_3/(10^{-8} \text{ W}^{-1})$
[1]	220	1.063	1.838	9.792
[2]	195	1.072	2.445	5.840
[4]	160	0.929	1.447	10.790
[3]	240	0.609	0.917	19.460

4 分析与讨论

由于 γ_1/γ_2 与抽运波长和共振信号光波长有关,对于 532 nm 激光抽运的不同 MgO:sPPLT-SRO, γ_1/γ_2 与 SRO 中共振激光的波长成反比,与图 3(a)~(c)的实验相对应的 γ_1/γ_2 分别为 0.578, 0.438, 0.642, 这与实验中共振光波长分别为 920, 1213, 796 nm 相对应。 γ_3 反映倍频耦合强度的大小,文献[1]、[4]的实验中所用的 SHG 晶体都是 BiBO,它们的 γ_3 比较接近,文献[4]实验中的共振光波长(796 nm)比文献[1]实验中的共振光波长(920 nm)短,拟合其实验数据时所选的 γ_3 更大;考虑到 BBO 的非线性系数($2.0 \text{ pm} \cdot \text{V}^{-1}$)比 BiBO 的非线性系数($3.61 \text{ pm} \cdot \text{V}^{-1}$)小^[20]且文献[2]实验中的共振光波长(1213 nm)更长,拟合文献[2]的实验结果时所用的 γ_3 比拟合文献[1]的实验结果时所用的 γ_3 小。文献[3]中的实验针对 1064 nm 激光抽运的基于 MgO:PPLN 的 IFD-SRO,其 γ_1 和 γ_2 要比其他三组略小,由于 MgO:sPPLT 的有效非线性系数($10 \text{ pm} \cdot \text{V}^{-1}$)很大,其 γ_3 较大。

图 4 为根据上述拟合参数计算得到的满足图 1 QPM 条件的 IFD-SRO 输出特性。图中细线表示倍频光功率,其纵坐标为左侧轴;粗线表示非共振闲置光的输出,其纵坐标为右侧轴。图 4(a)所示为绿光抽运的基于 MgO:sPPLT 的 IFD-SRO 输出特性,计算中选择 $\lambda_s=780 \text{ nm}$ 、 $\gamma_1=1.0 \times 10^{-6} \text{ W}^{-1}$ 、 $\gamma_2=1.5 \times 10^{-6} \text{ W}^{-1}$ 、 $\gamma_3=1.0 \times 10^{-7} \text{ W}^{-1}$ 和 $w_j=200 \mu\text{m}$ 。可以看出,当抽运功率为 8 W 时,采用长度为 10 mm 的 SHG 晶体可以获得较高的倍频光和闲置光功率输出;当抽运功率为 16 W 时,采用长度为 15 mm 的 SHG 晶体时可以输出更高的倍频光和闲置光功率。对于图 4(b)所示的 1064 nm 激光抽运的基于 MgO:PPLN 的 IFD-SRO 输出特性,计算中选择 $\lambda_s=1560 \text{ nm}$ 、 $\gamma_1=6.1 \times 10^{-7} \text{ W}^{-1}$ 、 $\gamma_2=9.2 \times 10^{-7} \text{ W}^{-1}$ 、 $\gamma_3=4.9 \times 10^{-7} \text{ W}^{-1}$ 和 $w_j=240 \mu\text{m}$ 。当抽运功率为 20 W 时,采用长度为 10 mm 的 SHG 晶体可以获得最高的倍频光和闲置光功率;当抽运功率为 40 W 时,采用长度为 20 mm 的 SHG 晶体可以获得更高的倍频光和闲置光输出。可见,当给定抽运功率时,存在最佳的 SHG 晶体长度,使输出倍频光和闲置光功率最高。虽然实际 IFD-SRO 的输出功率低于此处计算值,但是这些结果仍然为设计 IFD-SRO 提供了重要参考。

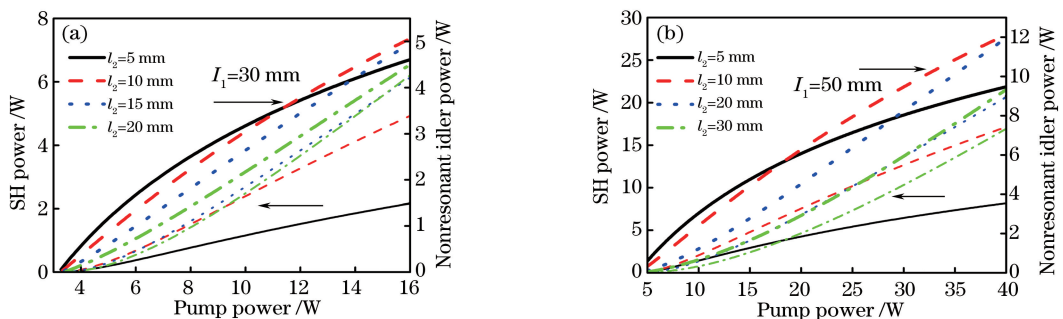


图 4 IFD-SRO 输出特性理论预测。(a) 532 nm 激光抽运的基于 MgO:sPPLT 的 IFD-SRO;
(b) 1064 nm 激光抽运的基于 MgO:PPLN 的 IFD-SRO

Fig. 4 Theoretical prediction for output characteristics of IFD-SRO. (a) MgO:sPPLT based IFD-SRO pumped by laser at 532 nm; (b) MgO:PPLN based IFD-SRO pumped by laser at 1064 nm

5 结论

在平面波近似下建立了描述连续波 IFD-SRO 输出特性的理论模型,并采用该理论模型对一些实验结果

进行了拟合,得出了一些重要拟合参数(γ_1 、 γ_2 、 γ_3 和 ω_j),这些参数为理论预测其他 IFD-SRO 的输出特性提供了参考。对于 532 nm 绿光抽运、780~795 nm 红外光共振且以 MgO:sPPLT 为非线性晶体的 IFD-SRO,选择单极化周期($\Delta_{\text{OPO}} = 8.7 \mu\text{m}$)的一阶 QPM 晶体作为 OPO 晶体、选择扇形极化周期(Δ_{OPO} 的变化范围为 8.5~9.1 μm)的 3 阶 QPM 晶体作为 SHG 晶体可以产生 390~397.5 nm 可调谐紫光;当抽运功率为 8 W 时,采用长度为 10 mm 的 SHG 晶体可以获得较高倍频光和闲置光功率输出。对于 1064 nm 红外激光抽运、1560~1590 nm 红外光共振且以 MgO:PPLN 为非线性晶体的 IFD-SRO,选择单极化周期($\Delta_{\text{OPO}} = 30.6 \mu\text{m}$)的一阶 OPO 晶体作为 SRO 晶体、选择扇形极化周期(Δ_{OPO} 的变化范围为 19.5~20.3 μm)的一阶 QPM 晶体作为 SHG 晶体可以产生 780~795 nm 可调谐近红外激光;当抽运功率为 40 W 时,采用长度为 20 mm 的 SHG 晶体可以获得更高的倍频和中红外闲置光输出。该理论模型简单、计算方便,为优化设计各种连续波 IFD-SRO 提供了重要指导。

参 考 文 献

- [1] Samanta G K, Ebrahim-Zadeh M. Continuous-wave, single-frequency, solid-state blue source for the 425-489 nm spectral range[J]. Optics Letters, 2008, 33 (11): 1228-1230.
- [2] My T H, Drag C, Bretenaker F. Single-frequency and tunable operation of a continuous intracavity-frequency-doubled singly resonant optical parametric oscillator[J]. Optics Letters, 2008, 33(13): 1455-1457.
- [3] Devi K, Kumar S C, Ebrahim-Zadeh M. High-power, continuous-wave, single-frequency, all-periodically-poled, near-infrared source[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5049-5051.
- [4] Aadhi A, Chaitanya N A, Singh R P, *et al.* High-power, continuous-wave, solid-state, single-frequency, tunable source for the ultraviolet[J]. Optics Letters, 2014, 39(12): 3410-3413.
- [5] Aadhi A, Chaitanya N A, Jabir M V, *et al.* All-periodically poled, high-power, continuous-wave, single-frequency tunable UV source single-frequency tunable UV source[J]. Optics Letters, 2015, 40(1): 33-36.
- [6] Yao Wenming, Tan Huiming, Tian Yubing, *et al.* Continuously board-waveband tunable all-solid-state CW optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(8): 2021-2026.
姚文明, 檀慧明, 田玉冰, 等. 宽波段连续调谐全固态 CW PPMgLN 光学参量振荡器[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25 (8): 2021-2026.
- [7] Li Peng, Ma Yayun, Nie Dandan, *et al.* Continuous-wave single-frequency 1.5 μm laser generated by a singly resonant optical parametric oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802008.
李 鹏, 马亚云, 聂丹丹, 等. 利用单共振光学参量振荡器产生 1.5 μm 连续单频激光[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802008.
- [8] Xing Tinglun, Wang Li, Hu Shuwu, *et al.* Cavity-linewidth narrowing of 3 μm low threshold MGO:PPLN-OPO by volume Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(1): 0101006.
邢廷伦, 王 礼, 胡舒武, 等. 3 μm 低阈值 MgO:PPLN-OPO 布拉格体光栅腔谱宽压窄研究[J]. 中国激光, 2017, 44 (1): 0101006.
- [9] Li Bingxuan, Xu Shan, Wei Yong, *et al.* Tunable continuous-wave Nd:YVO₄/MgO:PPLN optical parametric oscillator generating mid-infrared laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(10): 1152-1157.
李丙轩, 许 珊, 魏 勇, 等. 可调谐 Nd:YVO₄/MgO:PPLN 连续中红外光学参量振荡器[J]. 光子学报, 2013, 42 (10): 1152-1157.
- [10] Liu Lei, Wang Xiaobo, Li Xiao, *et al.* Thermal-induced dephasing in mid-infrared continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 24-28.
刘 磊, 汪晓波, 李 霄, 等. 中红外连续波单谐振光学参量振荡器热致相位失配[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24 (1): 24-28.
- [11] Yao Wenming, Tan Huiming, Wang Fan, *et al.* Extra-cavity, all-solid continuous wave optical parametric oscillator and stimulated Raman scattering in PPMgLN[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1202008.
姚文明, 檀慧明, 王 帆, 等. 外腔全固态连续波 PPMgLN 光学参量振荡器与受激拉曼散射[J]. 中国激光, 2012, 39 (12): 1202008.
- [12] Batchko R G, Weise D R, Plettner T, *et al.* Continuous-wave 532-nm-pumped singly resonant optical parametric

- oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(3): 168-170.
- [13] Deng Chengxian, Li Zhengjia, Zhu Changhong. Intracavity continuous-wave optical parametric oscillator: Gaussian beam theory[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(6): 791-797.
邓诚先, 李正佳, 朱长虹. 内腔连续波光学参量振荡器: 高斯光束理论[J]. *中国激光*, 2005, 32(6): 791-797.
- [14] Li P, Li Y J, Feng J X, *et al.* Theoretical and experimental investigation of the singly resonant optical parametric oscillator under double-pass pumping[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(14): 4374-4379.
- [15] Moore G T, Koch K, Cheung E C. Optical parametric oscillation with intracavity second-harmonic generation[J]. *Optics Communications*, 1995, 113(4/5/6): 463-470.
- [16] Aytür O, Dikmelik Y. Plane-wave theory of self-doubling optical parametric oscillators[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(3): 447-458.
- [17] Manjooran S, Zhao H, Lima I T, *et al.* Phase-matching properties of PPKTP, MgO:PPSLT and MgO:PPcLN for ultrafast optical parametric oscillation in the visible and near-infrared ranges with green pump[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(8): 1325-1330.
- [18] Lu H D, Wei J, Wei Y X, *et al.* Generation of high-power single-frequency 397.5 nm laser with long lifetime and perfect beam quality in an external enhancement-cavity with MgO-doped PPSLT[J]. *Optics Express*, 2016, 24 (21): 23726-23734.
- [19] Hu X P, Xu P, Zhu S N. Engineered quasi-phase-matching for laser techniques[J]. *Photonics Research*, 2013, 1(4): 171-185.
- [20] Wen X, Han Y S, Wang J M. Comparison and characterization of efficient frequency doubling at 397.5 nm with PPKTP, LBO and BiBO crystals[J]. *Laser Physics*, 2016, 26(4): 045401.