

# 百纳秒脉宽中红外激光输出特性

谭嘉城, 陶翰飞, 汪海波, 孙开元, 姚俊, 岱钦

(沈阳理工大学 理学院, 沈阳 110159)

**摘要:** 为研究百纳秒脉宽光参量振荡器的中红外波段闲频光输出特性, 首先理论分析基频光输出参量和谐振腔长度对输出闲频光脉冲宽度的影响, 然后通过实验研究不同脉宽下激光器的振荡阈值和转换效率的变化以及激光器的最优运行参量。对百纳秒脉宽 MgO:PPLN 光参量振荡中红外激光器的实验研究结果表明: 以百纳秒脉冲宽度的 Nd:YAG 固体激光器为基频光泵浦源, 在 PPLN 晶体温度为 25 °C、基频光能量为 29~34 mJ 时, 达到最佳超阈值倍数; 通过温度调谐及改变谐振腔长度, 获得波长调谐范围为 3.17~3.33  $\mu\text{m}$ 、脉宽可调范围为 74.05~113.5 ns、中心波长为 3.33  $\mu\text{m}$  的中红外激光输出, 最高转换效率为 7.9%。

**关键词:** 光参量振荡器; 中红外激光; 脉冲宽度; 转换效率

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2025.02.014

## Characteristics of Mid-infrared Laser with Hundred-nanosecond Pulse Width

TAN Jiacheng, TAO Hanfei, WANG Haibo, SUN Kaiyuan, YAO Jun, DAI Qin

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** To study the output characteristics of idler light in the mid-infrared by hundred-nanosecond pulse width optical parametric oscillator (OPO), firstly, theoretical analysis is conducted on the influence of fundamental light output parameters and cavity length on the pulse width of idler light. Then, by experiment, the changes in the oscillation threshold and conversion efficiency of the laser under different pulse widths, as well as the optimal parameters of the laser, are studied. The research on the hundred-nanosecond pulse width MgO:PPLN OPO mid-infrared laser has showed: using the Nd:YAG solid-state laser with hundred-nanosecond pulse width as the fundamental light pump source at 25 °C of PPLN and the fundamental light power stage of 29~34 mJ, the pump reaches optimal over-threshold multiple. By temperature tuning and changing the length of the resonant cavity, a mid-infrared laser output with a wavelength tuning range of 3.17~3.33  $\mu\text{m}$ , a pulse width adjustable range of 74.05~113.5 ns, and a center wavelength of 3.33  $\mu\text{m}$  was obtained, with a maximum conversion efficiency of 7.9%.

**Key words:** optical parametric oscillator; mid-infrared laser; pulse width; conversion efficiency

3~5  $\mu\text{m}$  中红外激光位于大气窗口波段, 且许多原子和分子的吸收峰也处于该波段, 因而具有重要的应用价值和发展前景<sup>[1-3]</sup>。目前通过光

参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO) 获取中红外激光已成为一种有效的手段<sup>[4-6]</sup>, 国内外诸多学者对中红外激光的输出特性进行了深入

研究。

Yang 等<sup>[7]</sup>基于非共线相位匹配的碲酸钛氧钾(KTA)晶体,将 OPO 谐振腔设计为四镜环形腔,通过改变基频光的入射角度输出了可调脉宽范围为 13.81 ~ 18.37 ns、波长调谐范围为 1 535.56 ~ 1 676.73 nm 的红外光,理论分析了信号光和闲频光输出特性随基频光入射角度的变化规律,并据此调节中红外激光的输出特性;Sacks 等<sup>[8]</sup>通过改变基频光脉冲形状,将脉宽为 100 ns 的高斯脉冲调整为脉宽为 300 ns 的矩形脉冲,脉冲宽度的调节范围达到 200 ns,并证实了在 1 064 ~ 4 000 nm 的闲频光转换中,矩形脉冲能显著提高转换效率;Xu 等<sup>[9]</sup>采用光参量振荡与光参量放大级联的方式,使用两块周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体,将 OPO 系统中产生的功率为 116 mW、脉宽为 4.9 ns 的闲频光进行参量放大,最终获得了功率为 966 mW、脉宽为 5.3 ns、转换效率达到 11.5% 的中红外激光。

本文以百纳秒级脉冲宽度的 Nd:YAG 固体激光器作为基频光泵浦源,首先理论分析光参量振荡系统中谐振腔长度和基频光特性对中红外闲频光脉冲宽度以及光-光转换效率的影响,再通过实验研究不同脉宽下振荡阈值和转换效率的变化及激光器最优运行参量,以得到脉冲宽度可调、波长可调谐的高转换效率中红外激光输出。

## 1 中红外激光输出特性的理论分析

### 1.1 中红外激光脉冲宽度分析

脉冲基频光经非线性频率变换能产生不同波长的脉冲式参量光,输出的参量光具有一定的频谱宽度。脉冲波包中不同的频率分量在晶体中会以不同的速度传输,非线性晶体的色散在光脉冲的传输中起关键作用,受群速度色散影响的高斯脉冲表达式为<sup>[10]</sup>

$$U(z, T) = \frac{T_0}{(T_0^2 - i\beta_2 z)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{T^2}{2(T_0^2 - i\beta_2 z)} \right] \quad (1)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left( 2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right) \quad (2)$$

式中: $U$  为高斯脉冲的振幅; $z$  为传输距离; $T$  为高斯脉冲在经过传输距离  $z$  后的脉冲宽度; $T_0$  为高斯脉冲的初始脉冲宽度; $i$  为虚数单位; $\beta_2$  是与频率有关的群速度色散参量; $c$  为真空光速; $\omega$  为频率; $n$  为折射率。

由式(1)可知,群速度色散参量  $\beta_2$  通过影响高斯脉冲在传输过程中的相位(指数函数部分)改变其脉冲形状,脉冲宽度随传输距离的变化而变化。脉冲宽度与总传输距离的关系为<sup>[10]</sup>

$$T(z) = T_0 [1 + (z/L_D)^2]^{1/2} \quad (3)$$

式中  $L_D$  为非线性色散长度,其值与群速度色散和初始脉冲宽度有关。

图 1 为初始脉冲宽度为 100 ns、中心波长为 33  $\mu\text{m}$  闲频光高斯脉冲的脉冲宽度(以  $T/T_0$  表示)和脉冲振幅(以归一化强度表示)随  $z/L_D$  变化的关系曲线。由图 1 可看出,闲频光的脉冲宽度随着  $z/L_D$  的减小而减小。在光参量振荡实验中,非线性晶体的长度等效为非线性色散长度,在一次脉冲持续时间内,参量光在腔内往返次数随着谐振腔距离的增加而减少,经过非线性晶体的次数( $z/L_D$ )也会随之减少,因此导致闲频光脉冲宽度减小。

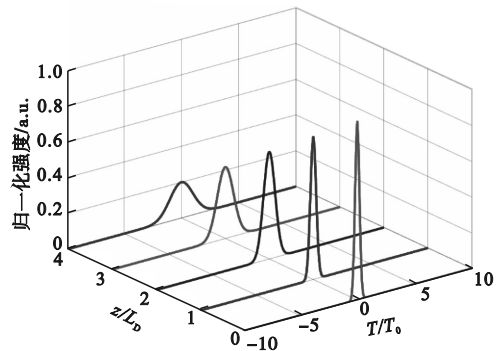


图 1 高斯脉冲变化曲线

Fig.1 Curves of Gaussian pulse

### 1.2 激光器振荡阈值与转换效率分析

通过改变谐振腔长度可有效调节中红外激光的脉冲宽度,但腔长改变也会引起振荡阈值变化,对转换效率产生影响。光参量的起振阈值表达式为

$$J_0 = \frac{2.25}{k g_s l_0^2} \frac{\tau}{(1+\gamma)^2} \left[ \frac{L}{2c\tau} \ln \left( \frac{P_n}{P_0} \right) + 2\alpha l + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 4 \right]^2 \quad (4)$$

$$k = \frac{2\omega_s \omega_i d_{\text{eff}}}{n_p n_s n_i c^3 \epsilon_0} = \frac{2d_{\text{eff}}}{n_p n_s n_i c \epsilon_0 \lambda_s \lambda_i} \quad (5)$$

式中: $J_0$  为光参量的起振阈值; $k$  为与折射率有关的相互作用系数; $g_s$  为与信号光和基频光光斑比有关的系数; $\omega_s$  和  $\omega_i$  分别为信号光和闲频光频率;其他变量说明详见表 1。由式(4)可知,光参量的起振阈值  $J_0$  与谐振腔长度  $L$  成正相关关系,增加谐振腔长度会导致振荡阈值增加。

图2所示为光参量振荡阈值与信号光和基频光光斑比的关系曲线,计算参数的选取详见表1。由图2可见,信号光和基频光光斑比越大,振荡阈值越小。以长脉宽的激光作为基频光,同时减小基频光的光斑面积,可实现在调节参量光脉宽的同时保证较低的激光振荡阈值。

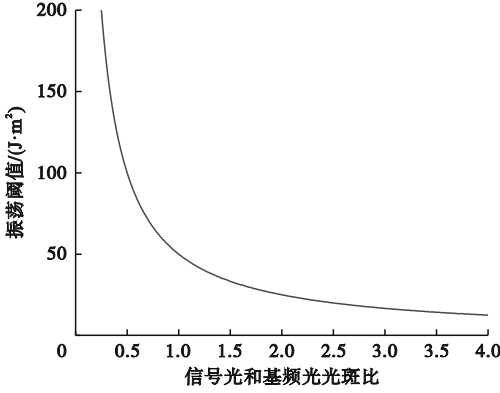


图2 振荡阈值与信号光和基频光光斑比的关系曲线  
Fig. 2 Relationship curve between oscillation threshold and the spot ratio of signal and fundamental light

表1 计算参数取值

Table 1 Simulation parameter values

参数	数值
基频光波长 $\lambda_p/\mu\text{m}$	1.06
信号光波长 $\lambda_s/\mu\text{m}$	1.56
闲频光波长 $\lambda_i/\mu\text{m}$	3.33
基频光折射率 $n_p$	2.15
信号光折射率 $n_s$	2.13
闲频光折射率 $n_i$	2.06
非线性系数 $d_{\text{eff}}/(\text{pm}\cdot\text{V}^{-1})$	27.4
基频光前后向振幅比 $\gamma$	1.0
谐振腔长度 $L/\text{mm}$	80
非线性晶体长度 $l/\text{mm}$	50
超晶格材料长度 $l_0/\text{mm}$	50
输出镜对信号光反射率 $R/\%$	85
基频光脉冲宽度 $\tau/\text{ns}$	100
真空介电常数 $\epsilon_0/(\text{F}\cdot\text{m}^{-1})$	$8.85 \times 10^{-12}$
泵浦与信号噪声比 $P_n/P_0$	$1 \times 10^{14}$
晶体吸收系数 $\alpha/\text{cm}^{-1}$	0.08

基频光能量达到振荡阈值后参量光开始振荡,以信号光谐振为例,即在光参量振荡过程中腔内信号光光强  $I_s$  为一稳定值,亦即  $I_s = I_s(0) = I_s(l)$ ,  $I_s(0)$  和  $I_s(l)$  分别表示腔内初始信号光光强和经过长度为  $l$  的晶体后信号光光强。在此稳态情况下,经过晶体长度  $l$  后,闲频光光强  $I_i(l)$  和

基频光光强  $I_p(l)$  的计算式分别为<sup>[11]</sup>

$$I_i(l) = \frac{\omega_i}{\omega_p} \left[ \frac{g^2 - (\Delta k/2)^2}{g^2} \right] I_p(0) \sin^2(gl) \quad (6)$$

$$I_p(l) = [\cos^2(gl) + (\Delta k/2)^2 \sin^2(gl)] I_p(0) \quad (7)$$

$$g = \left[ \frac{\mu_0 c}{2n_s} \sigma_i \sigma_p I_s + (\Delta k/2)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$\sigma_j = \frac{\omega_j}{n_j c} d_{\text{eff}} \quad (j = i, p) \quad (9)$$

式中:  $g$  为与信号光光强有关的增益系数;  $\Delta k$  为相位失配值;  $I_p(0)$  为初始基频光光强;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $\omega_p$  为基频光频率;  $\sigma_i$  和  $\sigma_p$  分别为闲频光和基频光的介质电导率。

根据曼利-罗关系<sup>[12]</sup>, 信号光光强增量  $\Delta I_s$  与闲频光光强  $I_i(l)$  和频率间的关系为

$$\Delta I_s = \frac{\omega_s}{\omega_i} I_i(l) \quad (10)$$

将式(6)代入式(10)进一步得到

$$\Delta I_s = \frac{\omega_s}{\omega_p} \left[ 1 - \left( \frac{\Delta k}{2g} \right)^2 \right] I_p(0) \sin^2(gl) \quad (11)$$

定义光-光转换效率  $\eta$  表达式为

$$\eta = [\Delta I_s + I_i(l)] / I_p(0) \quad (12)$$

在准相位匹配模式下相位失配值  $\Delta k = 0$ , 且基频光、信号光、闲频光光强遵守能量守恒关系, 将式(6)和式(11)代入式(12), 可得到光-光转换效率为

$$\eta = \frac{\omega_s}{\omega_p} \sin^2(gl) + \frac{\omega_i}{\omega_p} \sin^2(gl) = \sin^2(gl) \quad (13)$$

单谐振过程前、后腔镜的反射率  $R_1$ 、 $R_2$  对信号光光强增量的影响表示为

$$\Delta I_s = I_s(1 - R_1 R_2) \quad (14)$$

在  $\Delta k = 0$  时, 因信号光在一次振荡过程中仅获得单次增益, 同时假定前、后腔镜对信号光的反射率均大于 95%, 则可近似认为  $1 + \sqrt{R_1 R_2} = 2$ , 联立式(8)、式(9)及式(11)和式(14), 可得到注入的基频光光强为

$$I_p(0) = \frac{4n_p n_i n_p c (1 - \sqrt{R_1 R_2})}{\mu_0 \omega_s \omega_i l^2 d_{\text{eff}}^2} \frac{(gl)^2}{\sin^2(gl)} \quad (15)$$

根据文献[13], 信号光的起振光强  $I_{\text{th}}^s$  与腔镜反射率的关系可表达为

$$I_{\text{th}}^s = \frac{4n_p n_s n_i c (1 - \sqrt{R_1 R_2})}{\mu_0 \omega_s \omega_i d_{\text{eff}}^2 l^2 \sqrt{R_1 R_2}} \quad (16)$$

定义超阈值倍数  $N = I_p(0) / I_{\text{th}}^s$ , 将式(15)、式(16)代入该定义式, 得到光-光转换效率  $\eta$  与超阈值倍数  $N$  的关系式为

$$\eta = \sin^2(gl) = \sqrt{R_1 R_2} (gl)^2 / N \quad (17)$$

由式(17)可知,影响光-光转换效率的因素主要有前、后腔镜的反射率  $R_1$ 、 $R_2$  和超阈值倍数  $N$ 。在 OPO 系统中,前、后腔镜反射率为定值,因此可通过改变超阈值倍数  $N$  获得高光-光转换效率。令  $R_1 = 100\%$ ,  $R_2 = 85\%$ , 当  $gl$  为 1.32 ~ 1.57 时,转换效率  $\eta$  大于 80%, 此时超阈值倍数  $N$  为 1.94 ~ 2.23, 该区间即为获得高光-光转换效率的最佳超阈值倍数区间。

根据上述理论分析,通过增加谐振腔长度降低输出的中红外激光脉冲宽度时,光参量起振阈值也会增加,导致光-光转换效率下降。为此,可增大信号光和基频光的光斑比并控制注入的基频光能量,达到最佳超阈值倍数区间,以获得较高的中红外激光转换效率。

## 2 激光实验

### 2.1 激光实验装置

OPO 实验光路图如图 3 所示。使用波长为 1 064 nm、重复频率为 1 Hz、脉冲宽度达百纳秒级的 Nd:YAG 固体激光器作为基频光泵浦源;半波片和偏振片用于改变基频光的偏振方向,光隔离器用于保护光路;非线性晶体采用 MgO:PPLN 晶体,尺寸为 1 mm × 10 mm × 50 mm,极化周期为 30.1  $\mu\text{m}$ ;为将高峰值功率的基频光耦合进 PPLN 晶体内且避免损伤晶体,设计了由两个透镜和一个狭缝组成的光束整形系统,基频光光束经过整形后,获得长 6.0 mm、宽 0.5 mm 的椭圆激光光束,以此提高基频光耦合效率<sup>[14]</sup>。

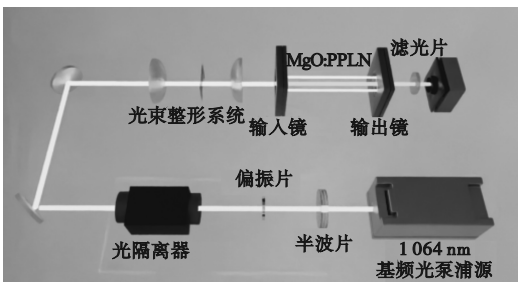


图3 实验光路图

Fig.3 Experimental optical path

光参量振荡系统采用直腔结构,输入镜和输出镜均为平面镜,其中输入镜镀 1 064 nm 高透膜、1 220 ~ 1 660 nm 近红外波段高反膜,输出镜镀 1 064 nm 高透膜、1 250 ~ 1 530 nm 近红外波段高反膜、3 000 ~ 8 000 nm 中红外波段高透膜。输

出镜后端放置能透过中红外光而可见光和近红外光均被截止的平面滤光片。

### 2.2 实验结果及分析

设定晶体温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ , 谐振腔腔长  $L = 65$  mm 时闲频光输出能量、转换效率和脉冲宽度随基频光能量变化的关系曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出,当基频光能量从 22 mJ 增至 26 mJ, 光-光转换斜效率最大。这是因为在达到振荡阈值后,基频光会全部转换为参量光,无能量空转,故闲频光能量随泵浦能量的增加而迅速升高。当基频光能量达到 29 ~ 34 mJ (超阈值倍数  $N$  为 1.9 ~ 2.2) 时,光-光转换效率稳定至 7.8% ~ 7.9% 区间内,在最大光-光转换效率区间内,闲频光仍具有较宽的脉冲宽度调节范围。

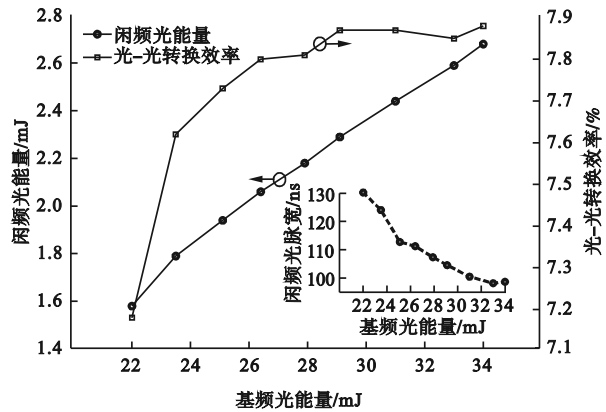


图4 不同基频光能量下的闲频光能量、转换效率和脉宽  
Fig.4 Idler power, conversion efficiency and pulse width curves with different fundamental power

设定晶体温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ , 改变光参量振荡器中两个腔镜的距离(腔长分别为 65、70、80 mm), 闲频光的脉冲宽度和光-光转换效率随腔长的变化关系如图 5 所示。由图 5 可见,基频光能量相同时,闲频光的脉冲宽度和转换效率均随谐振腔腔长的增加而减小。在脉冲持续时间内,闲频光在谐振腔内往返传播的次数随着腔长增加而减少,经过 PPLN 的次数也随之减少,故导致闲频光脉冲宽度减小;谐振腔腔长增加造成振荡阈值增加,导致闲频光转换效率降低。不同腔长模式下的最高转换效率相差约 2.2%, 闲频光的脉冲宽度调节范围约为 40 ns。

图 6 为超阈值倍数  $N$  为 2.1、达到最大光-光转换效率区间时,不同腔长下闲频光脉冲宽度实测图。由图 6 可见,随着谐振腔腔长从 65 mm 增加至 80 mm, 闲频光的脉冲宽度从 113.5 ns 减小至 74.05 ns。

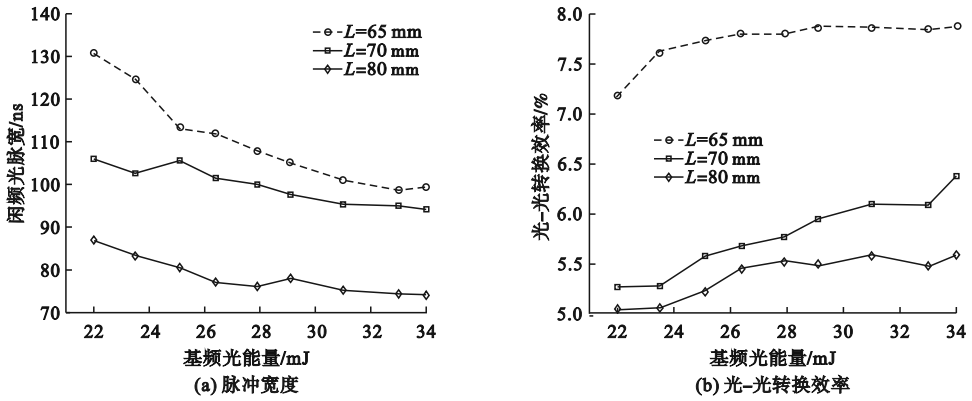


图5 不同腔长下的闲频光脉宽与转换效率

Fig. 5 Idler pulse width and conversion efficiency curves with different cavity length

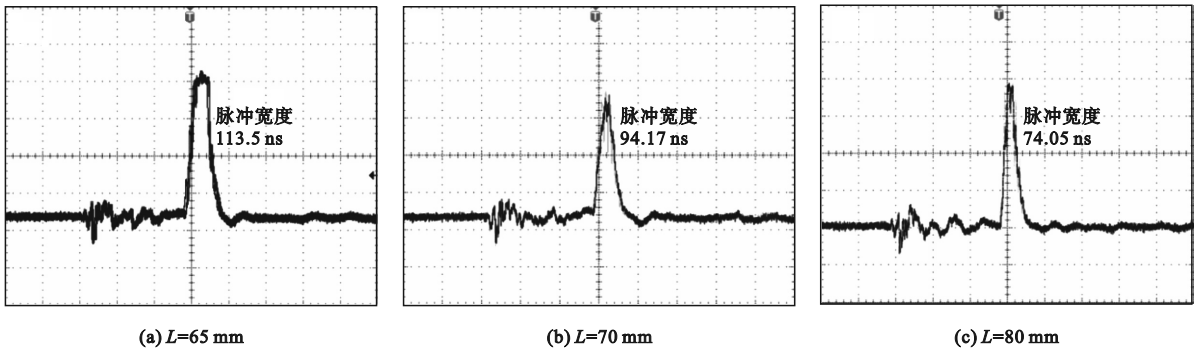


图6 不同腔长下闲频光脉宽实测图

Fig. 6 Idler light pulse width measurement pictures with different cavity length

使用红外光谱仪 (Ocean Optics, NIRQuest 型) 对信号光的中心波长进行测量, 并计算闲频光的中心波长, 结果如图 7 所示。当晶体温度分别为 25、60、90 °C 时, 测得信号光的中心波长分别为 1 562. 482、1 581. 965、1 594. 949 nm, 根据闲频光波长计算公式  $1/\lambda_i = 1/\lambda_p - 1/\lambda_s$ , 求出闲频光的中心波长分别为 3 333. 333、3 232. 813、3 176. 624 nm。

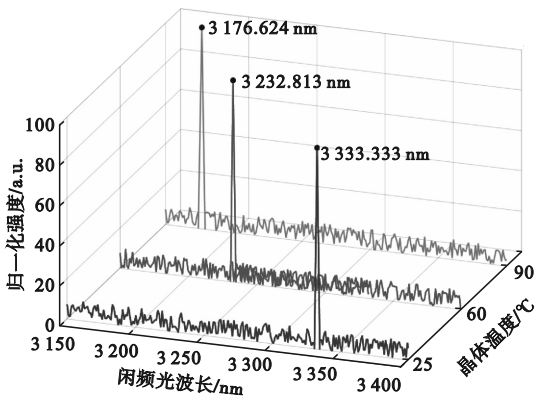


图7 不同晶体温度下闲频光中心波长

Fig. 7 Idler light central wavelength at different crystal temperatures

### 3 结论

以百纳秒脉冲宽度的 Nd: YAG 固体激光器作为基频光泵浦源, 以 MgO: PPLN 为非线性晶体, 通过光参量振荡产生中红外激光。理论分析了闲频光脉冲宽度和转换效率与基频光特性和谐振腔长度的变化关系; 实验研究了不同脉冲宽度下闲频光的振荡阈值和转换效率的变化关系以及最佳运行参量。通过改变谐振腔腔长、基频光光斑面积和形状、基频光能量以及晶体温度, 最终得到了波长调谐范围为 3. 17 ~ 3. 33 μm、脉冲宽度可调范围为 74. 05 ~ 113. 5 ns、最高转换效率为 7. 9% 的中红外激光输出。

#### 参考文献 (References):

[ 1 ] 蒋星辰, 程德华, 崔建丰, 等. 高转换效率 1.47 μm PPLN 光参量振荡器 [J]. 沈阳理工大学学报, 2023, 42 (2) : 56 - 60. JIANG X C, CHENG D H, CUI J F, et al. 1.47 μm PPLN optical parametric oscillator with high conversion efficiency [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2023, 42 (2) : 56 - 60. (in Chinese)