

光纤激光泵浦的多波长中红外光参量振荡器

余光其¹, 王 鹏², 宋 伟¹, 刘奎永¹

(1. 中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125000;
2. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:介绍了一种光纤激光泵浦的三波长中红外光参量振荡器。在最大泵浦功率 70.7 W, 泵浦波长为 1 060、1 065、1 080 nm 的情况下, 实现了 8.7 W 的中红外闲频光输出, 斜效率达到 16%, 闲频光三个波长分别为 3 132、3 170、3 310 nm, 但产生的信号光只有一个波长为 1 604 nm。对实验结果进行了理论分析和实验测试, 得出在谐振腔内 1 060 nm 泵浦光发生了光参量振荡, 而 1 065、1 080 nm 泵浦光分别与 1 604 nm 信号光发生了差频过程, 同时还利用差频转换效率理论对 1 065、1 080 nm 差频产生的闲频光强度的差异进行了分析和解释。

关键词:非线性光学; 光参量振荡; 差频; 中红外激光; 光纤激光

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0404003

Fiber laser pumped multi-wavelength mid-infrared optical parametric oscillator

Yu Guangqi¹, Wang Peng², Song Wei¹, Liu Kuiyong¹

(1. The No. 92941 Army of PLA, Huludao 125000, China; 2. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A fiber laser pumped three-wavelength mid-infrared optical parametric oscillator was demonstrated. The pump source had three wavelengths which were 1 060 nm, 1 065 nm and 1 080 nm and the maximum pump power was 70.7 W. 8.7 W mid-infrared idler output was achieved under the maximum pump power, indicating a 16% slope efficiency. The idler wave had three wavelengths which were 3 132 nm, 3 170 nm and 3 310 nm but the signal wave just had one wavelength locating at 1 604 nm. The experiment result was analyzed in both theory and experiment, and came to a conclusion that in the optical resonator, the optical parametric oscillation happened to the 1 060 nm pump wave and the difference frequency generation happened between the 1 604 nm signal wave and the 1 065 nm, 1 080 nm pump waves separately. The intensity difference between idler waves generated by the difference frequency generation of 1 065 nm and 1 080 nm was also analyzed using the conversion efficiency theory of difference frequency generation.

Key words: nonlinear optics; optical parametric oscillation; difference frequency; mid-infrared laser; fiber laser

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-20

作者简介: 余光其(1990-), 男, 硕士, 主要从事新型激光器等方面的研究。Email: yuguangqi09@163.com

通讯作者: 王鹏(1991-), 男, 博士, 主要从事光参量振荡器方面的研究。Email: 1169723259@qq.com

0 引言

3~5 μm 中红外激光位于大气窗口区,在传播过程中损耗较小,所以在大气环境检测、光谱测量、医疗等诸多民用领域都具有广泛应用^[1-4]。同时 3~5 μm 中红外激光在军事领域方面,被广泛应用为光电对抗的激光光源^[5-6]。光参量振荡(Optical Parametric Oscillation, OPO) 是产生中红外激光的重要手段之一,人们已经对这种方法进行了深入研究^[7-10]。相比起单波长中红外激光而言,多波长中红外激光在一些领域更有着独特的作用,譬如多组分气体或单组分多谱线同步实时检测以及太赫兹波产生^[11-14]。目前,人们已经利用多种方法实现了多波长中红外输出的 OPO。Kawase 等人^[15]利用级联双周期结构的周期极化铌酸锂(PPLN)晶体实现了双波长中红外 OPO,晶体极化周期为 29.3、29.5 μm ,泵浦波长为 1 065 nm,实验得到了两个波长的信号光,分别为 1 529、1 546 nm。但这种方法的非线性转换效率会受到很大的限制,因为每一个非线性过程都只能在部分晶体中发生。Feng Ji 等人^[16]利用周期相位反转的周期极化 PPLN 晶体实现了双波长中红外 OPO,实验获得了 0.98 W 的中红外激光,波长为 3 824、3 731 nm。姜培培等人^[17]利用非周期光学超晶格(AOS)结构的 PPLN 晶体实现了双波长中红外 OPO,泵浦源为 1 065 nm 线偏脉冲激光,获得了 3.07 W 的中红外激光输出,波长为 3.3、3.8 μm ,转换效率为 11.4%。为了实现更多波长输出的中红外 OPO,Diane E. Smith

等人利用 PPLN 和磷锗锌(ZGP)双晶体实现了三波长输出的级联 OPO,泵浦激光经过 PPLN 晶体产生的第一个信号光被用作为第二个光参量过程的泵浦光,去泵浦 ZGP 晶体,实验获得的中红外波长为 3.66、3.9、4.6 μm 。以上方法都成功的产生了多波长中红外 OPO,但是都具有一定的局限性,譬如效率较低、结构复杂、晶体需要特殊定制等。

基于以上原因,文中利用三波长输出的光纤激光作为泵浦源,成功实现了三波长中红外 OPO,泵浦波长为 1 060、1 065、1 080 nm,最大输出功率为 70.7W。实验中搭建了四腔镜环形腔,采用 PPLN 晶体作为非线性晶体,最终得到了最大输出功率为 8.7 W 的中红外激光,三个波长分别为 3 132、3 170、3 310 nm,斜效率达到了 16%,但是出射的信号光只含有一个波长,为 1 604 nm。经过理论分析和实验验证,该信号光为 1 060 nm 泵浦光的光参量过程产生,同时产生了 3 132 nm 的中红外激光和 1 604 nm 信号光,而 3 170、3 310 nm 中红外激光是由 1 065、1 080 nm 泵浦激光分别与 1 604 nm 信号光差频产生的。在整个实验过程中,谐振腔内存在着光参量振荡和差频两个非线性过程,这对产生多波长中红外激光具有很大的借鉴作用。

1 实验装置

图 1 为三波长中红外光参量振荡器的结构示意图。泵浦源为级联结构的三波长光纤激光器,由三个线型腔 A、B 和 C 构成。腔 A 由一对中心波长

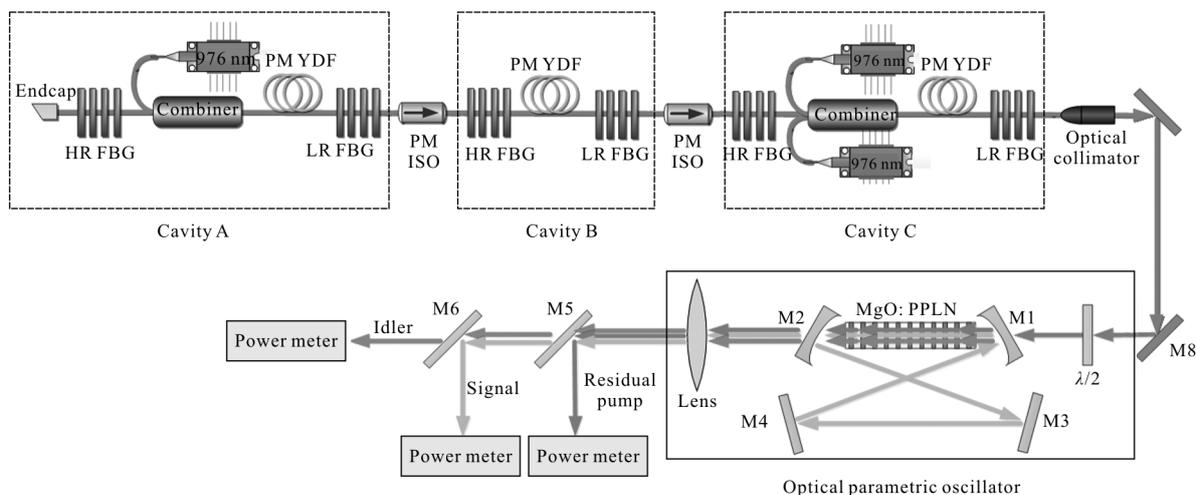


图 1 光纤激光泵浦的多波长中红外 OPO 实验装置图

Fig.1 Experiment device of the fiber-laser-pumped multi-wavelength mid-infrared OPO

为 1 065 nm 的光纤光栅,一个合束器,16 m 长的保偏掺铥光纤构成,泵浦源为一个中心波长 976 nm,最大连续输出功率 20 W 的 LD。腔 B 结构与腔 A 类似,不同之处是高低反光栅的中心波长为 1 080 nm,且腔 B 不具有泵浦源。腔 C 的高低反光栅的中心波长为 1060 nm,泵浦源为两个中心波长 976 nm、最大连续输出功率为 80 W 的 LD。三个光纤谐振腔之间都采用保偏隔离器连接(PM ISO)。腔 A 产生的 1 065 nm 激光经由 PM ISO 后传入到腔 B 中,部分 1 065 nm 激光在腔 B 内发生振荡,被掺铥光纤吸收,最终转变为 1 080 nm 激光。因此从腔 B 中出射的激光具有两个波长:1 065 nm 和 1 080 nm。腔 B 出射的双波长激光经由 PM ISO 后传入到腔 C 中。腔 C 的两个 LD 泵浦源提供的能量一部分用于腔内振荡,产生 1 060 nm 激光,另一部分用于 1 065 nm 和 1 080 nm 激光的放大,因此最终从腔 C 出射的激光具有三个波长:1 065、1 060、1 080 nm。光纤泵浦源出射的三波长激光经过一个光纤准直器后,经由两个镀金全反射镜入射到光参量振荡器系统中。泵浦激光首先经过一个半波片再入射到谐振腔中,半波片用来调节偏振方向以保证入射到谐振腔内的泵浦光为竖直方向的 *e* 偏振光,从而可以利用非线性晶体的最大有效非线性系数,并且消除走离效应。实验所搭建的谐振腔为四腔镜环形腔,由两个曲率半径为 150 mm 的凹面镜 M1、M2 和两个平面镜 M3、M4 构成。四面腔镜均镀有 1~1.1 μm 波段和 3~4 μm 波段的增透膜,从而保证谐振腔内信号光单谐振。M1、M3 和 M4 镀有 1.4~1.7 μm 波段的高反膜,M2 为输出耦合镜,镀有 1.4~1.7 μm 波段的部分透射膜,透射率约为 5%。实验采用的非线性晶体为 PPLN 晶体,极化周期为 31.05 μm,规格为 50 mm×10 mm×1 mm,晶体两端均镀有三光波段的增透膜。从谐振腔出射的激光经过一个准直镜准直之后,被 M5 和 M6 两面滤波镜分光,M5 可以分离出剩余泵浦光,M6 可以分离出信号光,最后利用三个 Thorlabs 功率计测量分离出的三束激光的功率。

2 实验结果与分析

实验中首先对三波长光纤激光泵浦源进行了功率和光谱测试。为了保证泵浦源中 PM ISO 的安全,

腔 A 的 LD 输出总功率设置为 9.5 W,经测得腔 A 输出的 1 065 nm 激光功率为 1.7 W,通过 PM ISO 后变为 1.53 W,而通过腔 B 的 PM ISO 后,功率变成了 597 mW。从腔 B 出射的双波长激光进入到腔 C 之后,令腔 C 的两个 LD 输出功率达到最大,测得输出激光功率为 70.7 W,可以算出泵浦-输出转换效率为 43.8%。利用光谱分析仪(ANDO, AQ6370D)测试了泵浦激光的光谱,并给出了在最大输出功率下的光谱图像,如图 2 所示。从图 2 可以看出,输出的泵浦激光有三个波长,分别为 1 060、1 065、1 080 nm,可以算出三个波长激光的 3 dB 带宽分别为 0.58、0.318、0.158 nm。由于实验条件的限制,无法将三个波长泵浦激光分离开来,但可以采用积分的方法,将测得的光谱数据进行积分,以积分得到的结果代表实际的功率。经过计算得到三个波长的泵浦激光功率比为 8.85:1:2.26,因此在总功率为 70.7 W 的泵浦光中,1 060 nm 激光功率最大,约为 51.65 W,1065 nm 激光功率最小,仅为 5.84 W,而 1 080 nm 激光功率为 13.2 W。

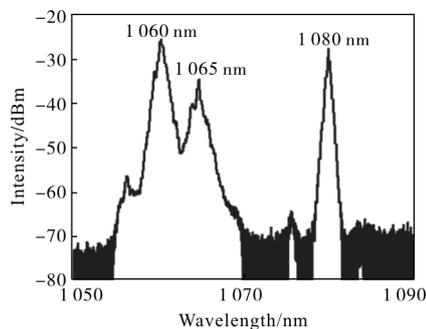


图 2 泵浦激光在最大输出功率下测得的光谱
Fig.2 Measured spectrum of the pump laser with the maximum output power

三波长泵浦激光入射到谐振腔之后,在晶体中发生非线性作用,产生了信号光和闲频光。分别利用光谱分析仪(ANDO, AQ6370D)和波长计(Bristol, 721 B)对最大泵浦功率下产生的信号光和闲频光的光谱进行测量,结果如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,在最大泵浦功率条件下,产生的信号光只有一个波长,为 1 604 nm,并且光谱顶端线宽很窄,底部逐渐展宽,经计算其 3 dB 带宽为 0.068 nm,小于三个泵浦波长的 3 dB 带宽。而从图 3(b)可以看出,在最大泵浦功率条件下,产生的闲频光有三个波长,分别

为 3 132、3 170、3 310 nm, 且 3 132 nm 闲频光强度最大, 3 170 nm 闲频光强度最小。

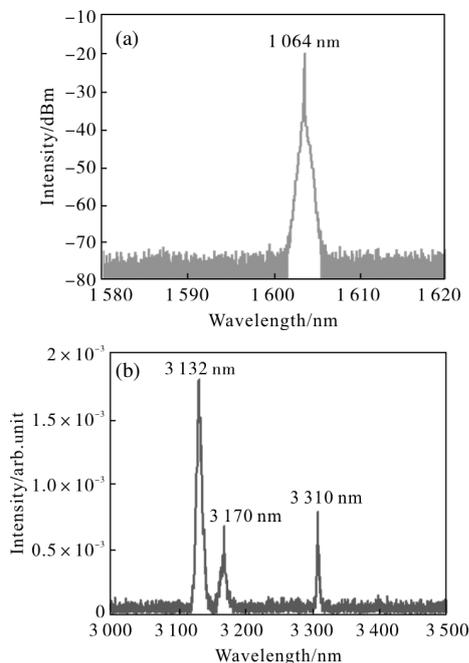


图 3 最大泵浦功率下测得的信号光和闲频光光谱
Fig.3 Measured spectrum of the signal and idler light waves with the maximum output power

在光参量过程中, 泵浦光、信号光和闲频光须同时满足两个守恒条件: 能量守恒条件和动量守恒条件, 两者简化后的公式可表示为:

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

$$\frac{n_e(\lambda_p, T)}{\lambda_p} = \frac{n_e(\lambda_s, T)}{\lambda_s} + \frac{n_e(\lambda_i, T)}{\lambda_i} + \frac{1}{\Lambda} \quad (2)$$

式中: $\lambda_m(m=p,s,i)$ 分别为泵浦光、信号光和闲频光的波长; Λ 为非线性晶体的极化周期; $n_e(\lambda_m, T)$ 为波长 λ_m 的垂直偏振 e 光在温度 T 的非线性晶体中折射率, 可以由 Sellmeier 方程得到^[18]:

$$n_e^2(\lambda, T) = a_1 + b_1 f(T) + \frac{a_2 + b_2 f(T)}{\lambda^2 - a_3} + \frac{a_4 + b_3 f(T)}{\lambda^2 - a_5} - a_6 \lambda^2$$

$$f(T) = (T - 24.5)(T + 570.82) \quad (3)$$

公式(3)中参数具体值如表 1 所示。

因此可以根据 Sellmeier 方程对 PPLN 晶体的调谐过程进行仿真计算。该实验中, 在入射泵浦激光具有三个波长的情况下, 产生的信号光只有一个波长, 而闲频光有三个波长, 这说明谐振腔内存在着三个非线性过程, 每一个非线性过程产生一个波长的

表 1 PPLN 晶体 e 光折射率 Sellmeier 方程系数
Tab.1 Parameters of the Sellmeier equation of the extraordinary refractive index in PPLN crystal

Parameter	Value
a_1	5.319 725
a_2	0.091 472 85
a_3	0.316 500 8
a_4	100.202 8
a_5	11.376 39
a_6	0.014 970 46
b_1	$4.753 469 \times 10^{-7}$
b_2	$3.310 965 \times 10^{-8}$
b_3	$2.760 513 \times 10^{-5}$

闲频光, 但只有一个非线性过程是光参量振荡过程, 其余两个非线性过程是差频过程。为了验证上述结论, 首先利用 Sellmeier 方程对三个波长单独泵浦的情况进行了仿真计算, 仿真环境设置为室温 25 °C, 非线性晶体极化周期 31.05 μm , 泵浦波长从 1.05 μm 变化至 1.09 μm , 模拟结果如图 4 所示。从图 4 可以看出当 1 060、1 065、1 080 nm 泵浦激光单独发生光参量振荡过程时, 所产生的信号光波长分别是 1 603、1 598、1 591 nm, 所产生的闲频光波长分别是 3 129、3 195、3 362 nm。与实验结果图 3 相对照, 可以发现实验所产生的 1 604 nm 信号光与 3 132 nm 闲频光是 1 060 nm 泵浦光在谐振腔内发生光参量振荡所产生的, 而 1 065 nm 和 1 080 nm 泵浦光没

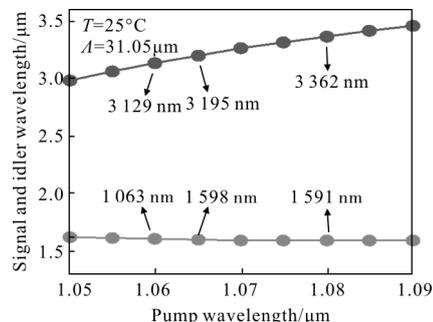


图 4 室温 25 °C、极化周期 31.05 μm 条件下 PPLN 晶体波长调谐仿真

Fig.4 Wavelength tuning simulation of the PPLN crystal under the conditions in which the room temperature is 25 °C and the grating period is 31.05 μm

有发生光参量振荡,但分别与 1 604 nm 信号光发生了差频过程,1 065 nm 泵浦光与 1 604 nm 信号光差频产生了 3 170 nm 闲频光,1 080 nm 泵浦光与 1 604 nm 信号光差频产生了 3 310 nm 闲频光,这两个差频过程也满足能量守恒定律。所以在整个实验过程中存在着一个光参量振荡过程和两个差频过程。由于晶体的热效应和工艺缺陷,理论仿真结果与试验结果存在微小的差异。

为了进一步验证上述结论,只让腔 C 的两个 LD 运转,腔 A 和腔 B 不工作,这样就可以得到 1 060 nm 单波长激光,为了与多波长泵浦下 1 060 nm 激光功率相当,控制 LD 功率使得 1 060 nm 单波长激光输出功率为 50 W,测得了实际情况下 1 060 nm 单独泵浦时产生的信号光和闲频光波长,如图 5 所示(由于使用的

是串联结构,无法实现 1 065、1 080 nm 单波长激光输出,在今后实验中将会得到改进)。从图中可以看出 1 060 nm 单独泵浦 OPO 并且泵浦功率为 50 W 时,产生的信号光和闲频光波长分别为 1 602、3 143 nm,与多波长泵浦条件下得到的信号光和闲频光波长很接近,与仿真结果也相差很小,这进一步证明了在多波长泵浦条件下,1 060 nm 泵浦光发生了光参量振荡过程,而 1 065 nm 和 1 080 nm 泵浦光发生了差频过程。在多波长泵浦条件下,随着泵浦总功率的增大,1 060 nm 泵浦光首先达到 OPO 阈值,发生光参量振荡,产生信号光和闲频光;而 1 065、1 080 nm 泵浦光功率较小,无法实现振荡,但是在谐振腔内有着高功率的信号光,虽然 1 065、1 080 nm 泵浦光与 1 604 nm 信号光之间存在相位失配,但高功率信号光会在一定程度上弥补由于相位失配导致的低转换效率,所以 1 065、1 080 nm 泵浦光与 1 604 nm 信号光发生差频作用,产生了两个新波长的闲频光。差频过程进一步消耗了 1 065、1 080 nm 泵浦光的能量,使其一直处于阈值以下,所以在整个实验过程中只有 1 060 nm 泵浦光发生了光参量振荡,而 1 065、1 080 nm 泵浦光由于功率较低,只能与 1 060 nm 泵浦光产生的信号光发生差频过程。

实验中还对产生的多波长中红外激光功率进行了测量,其随着泵浦光总功率变化曲线如图 6 所示。从图中可以看出当泵浦功率达到最大 70.7 W 时,输出的总闲频光功率为 8.6 W,斜效率约为 16%,图中并没有显示出功率饱和现象,说明继续增大泵浦光功率,闲频光功率还可以进一步增大。由于实验条件限制,没有合适的滤波镜将三个波长的闲频光进行分离,所以采用了和泵浦光相似的光谱积分的方法计算了三个波长闲频光的功率比。经计算得在最大输出条件下,3 132、3 170、3 310 nm 闲频光的功率比为 6.43:2:1,这说明在最大输出功率 8.6 W 中,3 132 nm 闲频光约为 5.86 W,3 170 nm 闲频光约为 1.82 W,而 3 310 nm 闲频光只有 0.91 W。

该实验所实现的转换效率较低,主要是因为在整个实验中发生了一个光参量振荡过程和两个差频过程,光参量振荡过程是满足相位匹配条件的,转换效率较高,而差频过程是不满足相位匹配条件的,由于相位失配量的存在,转换效率比起光参量

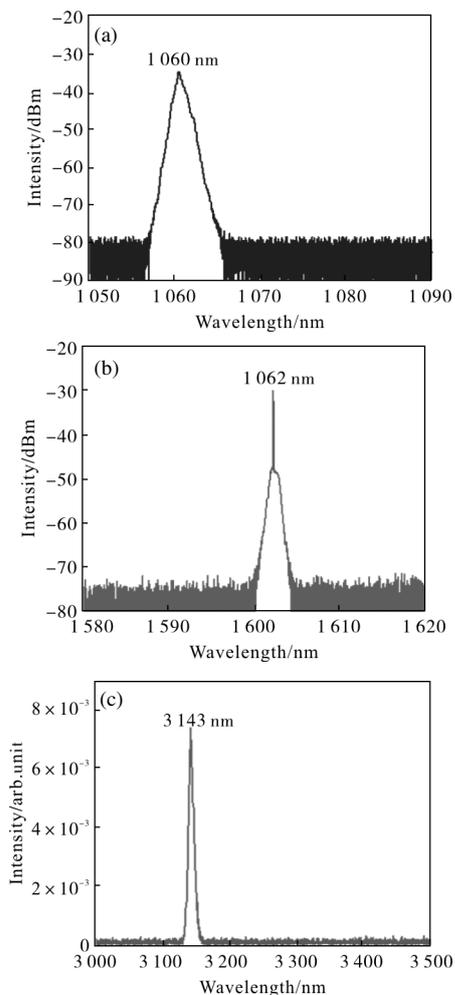


图 5 1 060 nm 激光泵浦条件下测得的泵浦光,信号光和闲频光光谱

Fig.5 Measured spectra of the pump, signal and idler waves when the pump wavelength is 1 060 nm

振荡来会低得多，所以整体上总的转换效率会较低。在后期实验中可以通过改变晶体周期或者设计特殊晶体，使得三个波长的泵浦激光能够同时起振，实现光参量振荡，这样相位失配量为零或者很小，从而转换效率较高，可期转换效率可以达到 20% 左右。

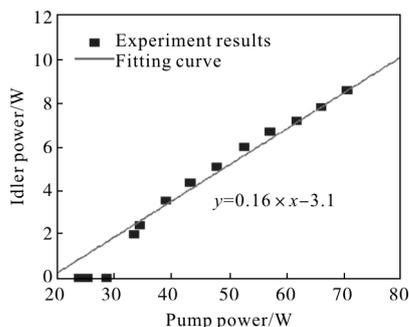


图 6 闲频光总输出功率随泵浦光功率变化曲线

Fig.6 Total idler output power for various pump power

从图 2 和图 6 可以看出，虽然在总的泵浦光中 1 080 nm 激光功率大于 1 065 nm 激光功率，约为其两倍，但是 1 065 nm 差频产生的闲频光功率却比 1 080 nm 差频产生的闲频光功率大，约为其两倍，说明差频光功率与单一泵浦光功率并不一定成正比关系。差频过程的转换效率可以表示为^[19]：

$$\eta_{\text{DFG}} = \frac{|I_i|}{|I_p||I_s|} = \frac{8\pi^2 L^2 d_{\text{eff}}^2}{n_i n_p n_s \lambda_i c \epsilon_0} \left[\frac{\sin\left(-\frac{\Delta k L}{2}\right)}{\left(-\frac{\Delta k L}{2}\right)} \right]^2 \quad (4)$$

从上式可以看出差频过程产生的闲频光功率不仅与泵浦光和信号光的乘积有关，还与三光间的相位失配量有关。因此，根据上式对 1 065、1 080 nm 泵浦光分别与 1 604 nm 信号光差频转换效率随着晶体长度的变化进行仿真计算，结果如图 7 所示。从图中可以看出 1 065、1 080 nm 泵浦光的差频转换效率在晶体中都呈正弦分布，在晶体末端即 50 mm 处，1 065 nm 泵浦光的转换效率约为 1 080 nm 泵浦光转换效率的五倍，参与两者差频的腔内信号光强度很大，可以认为一致，而 1 080 nm 泵浦光强度约为 1 065 nm 泵浦光强度两倍，则按照仿真计算可知 1 065 nm 泵浦光差频产生的闲频光功率为 1 080 nm 泵浦光差频产生的闲频光功率的两倍左右，与实验结果相当，表明经典的差频转换效率理论对此种多波长过程中的差频也具有一定的理论意义。

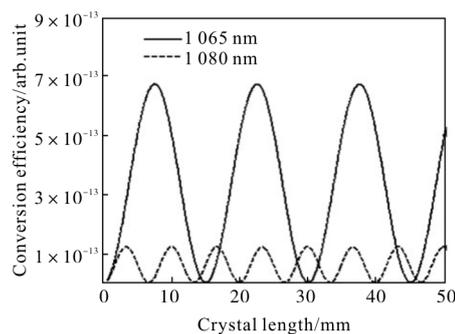


图 7 1 065、1 080 nm 泵浦光与 1 604 nm 信号光差频转换效率仿真

Fig.7 Simulation of the DFG conversion efficiency between the 1 604 nm signal wave and the 1 065 nm, 1 080 nm pump waves separately

3 结 论

报道了光纤激光泵浦的三波长中红外光参量振荡器，泵浦源为串联结构的三波长光纤激光器，输出波长为 1 060、1 065、1 080 nm，最大输出功率为 70.7 W，采用极化周期为 31.05 μm 的 PPLN 晶体作为非线性晶体，在最大泵浦功率条件下获得了 8.6 W 的中红外闲频光输出，斜效率达到了 16%，获得的中红外闲频光具有三个波长，分别为 3 132、3 170、3 310 nm，但只产生了 1 604 nm 单波长信号光。利用准相位匹配理论对实验结果进行了理论分析，得出 3 132 nm 闲频光是 1 060 nm 泵浦光发生光参量振荡产生的，同时产生了 1 604 nm 信号光，而 3 170、3310 nm 闲频光是 1 065、1 080 nm 泵浦光分别与 1 604 nm 信号光差频产生的，即在实验过程中发生了光参量振荡和差频两种非线性过程。此后利用 1 060 nm 泵浦光单独泵浦谐振腔进一步验证了该结论，同时利用经典差频转换效率理论对 3 170 和 3 310 nm 两个差频光强度的差异进行了理论解释，发现理论计算结果和实际情况吻合得较好。通过优化泵浦源结构，并提高泵浦功率，有望实现更多波长和波长可控的中红外光参量振荡器。

参 考 文 献：

- [1] Chen Zicong, Gao Zhihui, Cao Zhi, et al. Research on CO₂ gas concentration test system based on mid-infrared LED[J]. *Laser and Infrared*, 2012, 42(11): 1255-1258. (in Chinese)
陈子聪, 高致慧, 曹志, 等. 基于中红外 LED 的 CO₂ 气体

- 浓度检测系统研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(11): 1255-1258.
- [2] Zhang Yonggang, Gu Yi, Li Yaoyao, et al. Mid-infrared semiconductor light sources, detectors and its applications[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2011, 40 (10): 1846-1850. (in Chinese)
张永刚, 顾溢, 李耀耀, 等. 中红外半导体光源和探测器件及其应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1846-1850.
- [3] Li Li, Wang Yiding, Li Shuwei. Application of infrared gas detection technology to safe production and transportation in natural gas industry[J]. *Natural Gas Ind*, 2011, 31(1): 96-103. (in Chinese)
李黎, 王一丁, 李树维. 红外气体检测技术在天然气安全生产中的应用[J]. 天然气工业, 2011, 31(1): 96-103.
- [4] Zhang Lan, Zhang Qingyue, Nan Qun, et al. Application of mid-infrared spectrum in non-invasive blood glucose measurement[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, 6(2): 81-84. (in Chinese)
张兰, 张清悦, 南群, 等. 中红外光谱法在无创血糖检测技术中的应用[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(2): 81-84.
- [5] Wang Jianxun, Zhang Dongyang. Analysis of the IR active jamming technology [J]. *Guidance and Fuze*, 2003, 24(2): 46-50. (in Chinese)
王建勋, 张东洋. 红外有源干扰技术分析 [J]. 制导与引信, 2003, 24(2): 46-50.
- [6] Titterton D H. A review of the development of optical counter measure[C]//SPIE, 2004, 5615: 1-15.
- [7] Ross P G, Klein M E, Walde T, et al. Fiber-laser-pumped continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(6):418-420.
- [8] Kumar S C, Ebrahim-Zadeh M. High-power, fiber-laser-pumped, picosecond optical parametric oscillator based on MgO: sPPLT[J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26660-26665.
- [9] Kumar S C, Esteban-Martin A, Ebrahim-Zadeh M. Interferometric output coupling of ring optical oscillator[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1068-1070.
- [10] Kumar S C, Ebrahim-Zadeh M. High-power, continuous-wave, mid-infrared optical parametric oscillator based on MgO: sPPLT[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2578-2580.
- [11] Jin Yuwei, Cristescu S M, Harren F J M, et al. Two-crystal mid-infrared optical parametric oscillator for absorption and dispersion dual-comb spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3270-3273.
- [12] Kawase K, Hatanaka T, Takahashi H, et al. Tunable terahertz-wave generation from DAS T crystal by dual signal wave parametric oscillation of periodically poled lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(23): 1714-1716.
- [13] Klingbeil A E, Porter J M, Jeffries J B, et al. Two-wavelength mid-IR absorption diagnostic for simultaneous measurement of temperature and hydrocarbon fuel concentration [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 821-829.
- [14] Klingbeil A E, Jeffries J B J, Davisio D F, et al. Two-wavelength mid-IR diagnostic for temperature and ndodecane concentration in an aerosol shock tube [J]. *Applied Physics B*, 2008, 93(2): 627-638.
- [15] Kawase K, Hatanaka T, Takahashi H, et al. Tunable terahertz-wave generation from DAST crystal by dual signal-wave parametric oscillation of periodically poled lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(23): 1714-1716.
- [16] Ji F, Lu R, Li B, et al. Mid-infrared tunable dual-wavelength generation based on a quasi-phase-matched optical parametric oscillator [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(1): 126-128.
- [17] Jiang Peipei, Chen Tao, Yang Dingzhong, et al. A fiber laser pumped dual-wavelength mid-infrared optical parametric oscillator based on aperiodically poled magnesium oxide doped lithium niobate[J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 10(11): 115405.
- [18] Li Qianwen. Mid-infrared continuous wave optical parametric oscillator[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 20-24. (in Chinese)
李倩文. 中红外连续运转光学参量振荡器[D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 20-24.
- [19] Qin Xuefei. The investigation of mid-infrared difference frequency generation based on PPLN crystal [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2013: 15-16. (in Chinese)
秦雪飞. 基于 PPLN 晶体的中红外差频激光技术研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2013: 15-16.