

文章编号: 0253-2239(2009)03-0761-06

# PPLN 晶体差频中红外激光系统调谐特性研究

陈 东<sup>1</sup> 刘文清<sup>2</sup> 张玉钧<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)  
(<sup>2</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 室温工作的连续可调谐相干光源在痕量气体检测技术中有着重要应用价值, 光学非线性变换是获得室温运转中红外相干光源的有效途径, 是对传统激光技术的有效补充。研究了基于准相位匹配原理的差频激光系统的温度和信号光波长调谐特性, 从准相位匹配技术的一般位相匹配关系出发, 推导了 PPLN 晶体差频准相位匹配的温度和信号光波长匹配带宽解析表达式; 建立了基于 PPLN 晶体准相位匹配原理的宽调谐差频中红外激光系统, 实现了 3.2~3.7  $\mu\text{m}$  中红外相干光输出, 最大输出功率约为 1  $\mu\text{W}$ ; 对系统温度和信号光波长调谐特性进行实验研究, 并与理论结果进行了比较和分析。

**关键词** 差频振荡; 准相位匹配; 周期极化铌酸锂; 温度匹配带宽; 信号波长匹配带宽

中图分类号 O734 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0761

## Tuning Characteristic of PPLN Based Difference-Frequency-Generation Laser System

Chen Dong<sup>1</sup> Liu Wenqing<sup>2</sup> Zhang Yujun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Hefei, University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

<sup>2</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** The room-temperature continuous-wave tunable narrow band coherent light source in the mid-infrared region is valuable for trace gas sensing. Nonlinear optical difference-frequency generation (DFG) scheme has been used as a useful way to meet the requirement, and complementarity for traditional laser technology. The temperature and signal light wavelength tuning characteristics of quasi-phases-matching (QPM) based DFG system were theoretically studied, the analytical expressions of temperature and signal light wavelength tuning bandwidths of periodically poled LiNbO<sub>3</sub> (PPLN) were deduced based on the general theory of QPM. A widely tunable room-temperature mid-infrared laser source system based on QPM in PPLN crystal has been developed, and the mid-infrared coherent radiation is produced from 3.2 to 3.7  $\mu\text{m}$  with a maximum output power of about 1  $\mu\text{W}$ . The temperature and signal wavelength tuning characteristics of the system were experimentally studied, and the experimental results were compared and analyzed with the theory.

**Key words** difference frequency generation (DFG); quasi-phase-matching; periodically poled lithium niobate (PPLN); temperature tuning bandwidth; signal wavelength tuning bandwidth

## 1 引 言

中红外连续窄带可调谐激光光源在气体高灵敏光谱检测领域有着重要应用价值, 如大气环境监测、工业污染气体排放监控, 以及工业过程控制等, 因为大部分有机和无机气体小分子的基频强吸收带处于

这个光谱区, 吸收系数比近红外波段的吸收要强 2~3 个数量级<sup>[1]</sup>。利用非线性光学材料进行频率转换, 特别是差频 (DFG) 方法, 是获得室温下宽调谐、窄线宽特点的中红外相干光源的一种有效途径<sup>[2~5]</sup>。与铅盐半导体激光器、量子级联半导体激

收稿日期: 2008-08-29; 收到修改稿日期: 2008-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(50534050)和合肥工业大学科学发展基金(2007GDBJ2008)资助课题。

作者简介: 陈 东(1973—), 男, 博士, 副教授。主要从事光谱学与激光技术的研究。E-mail: chd1999@sohu.com

光器<sup>[5~8]</sup>等传统中红外激光光源相比,差频激光光源系统具有室温工作,输出光束质量好的优点。利用非线性晶体进行有效的频率变换时,必须满足相位匹配关系,准相位匹配(QPM)技术是通过在晶体中引入周期性的极化反转结构,补偿由折射率色散产生的波矢失配,通过调节周期性光栅的宽度实现波矢的相位匹配<sup>[9]</sup>。由于实际反转光栅周期制作精度的限制,需要根据各相互作用光波波长结合温度调谐实现转换效率的最大化。而在实际光谱应用中,连续输出波长调谐通常是必要的,因而需要对系统的非线性晶体工作温度及波长调谐特性有深入的认识。本文从准相位匹配技术的一般位相匹配关系出发,推导了PPLN晶体差频系统温度和信号光波长匹配带宽的近似解析表达式;建立了基于PPLN晶体准相位匹配原理的宽调谐差频中红外激光系统,对系统温度和信号光波长调谐特性进行了实验研究,并与理论结果进行了比较和分析。

## 2 理论分析

差频是光场在非线性晶体中发生的三波混频二阶非线性频率下转换过程,两个不同频率的入射光子在非线性晶体中通过二阶非线性混频过程产生新的光场。要实现有效的差频光输出,三波必须满足一定的相位匹配条件。利用周期极化晶体实现准相位匹配,需要对晶体的自发极化方向进行周期性调制,在有效非线性系数中引入了一个空间调制函数,即在晶体中每隔奇数倍的相干长度极性反转一次。准相位匹配条件可以表示为

$$\begin{aligned} 1/\lambda_i &= 1/\lambda_p - 1/\lambda_s, \\ \Delta k &= k_p - k_s - k_i - k_m = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$\lambda_j, k_j$  ( $j = p, s, i$ ) 分别为抽运、信号、空闲光波长和波矢量,  $\Delta k$  为相位失谐量,  $k_m = 2\pi m/\Lambda$  为周期性极化引入的附加相移,  $\Lambda$  为周期性反转畴的极化周期,  $m$  为准相位匹配阶数。一阶 QPM 的匹配极化反转周期为

$$\Lambda = \frac{2\pi}{k_p - k_s - k_i} \quad (2)$$

在高斯光束近似下,DFG 光功率可以表示为<sup>[2]</sup>

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{4\omega_i^2 k_s d_Q^2 L}{\epsilon_0 \pi c^3 n_p n_s n_i (1 + \mu)} \cdot P_p \cdot P_s \cdot \\ &h(\mu, \xi) \cdot \text{sinc}^2(\Delta k L / 2) \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $d_Q$  为有效非线性系数,  $\Delta k$  为三波在传播过程中的波矢相位失配量,  $n_j$  ( $j = p, s, i$ ) 是三波在晶体中的折射率,  $L$  为三波在晶体中的作用长度,  $h(\mu, \xi)$  为聚焦参数。由上式可以看到,最大 DFG 转换效率

正比于三波作用长度和有效非线性系数的平方。

周期极化铌酸锂(PPLN)由于具有优良的光电特性(高非线性系数),是研究最多、技术最成熟的一种周期极化光学晶体,在非线性光学频率变换技术中得到广泛采用<sup>[10~14]</sup>。LiNbO<sub>3</sub> 为负单轴晶体,空间点群为  $R_{3c}$ , 透光范围 0.4~5  $\mu\text{m}$ 。采用准相位匹配技术,可以利用它的最大非线性系数  $d_{33}$ , 属于  $e+e \rightarrow e$  匹配关系。在准相位匹配技术中一般通过选择适当的光栅周期结合温度调谐改变晶体的折射率以优化相位匹配条件,最佳匹配温度可以通过晶体折射率的塞耳迈耶尔方程来确定。对于 LiNbO<sub>3</sub> 晶体,  $e$  光折射率的塞耳迈耶尔方程可以表示为<sup>[15]</sup>

$$\begin{aligned} n_e^2 &= a_1 + b_1 f + \frac{a_2 + b_2 f}{\lambda^2 - (a_3 + b_3 f)^2} + \\ &\frac{a_4 + b_4 f}{\lambda^2 - a_5} + a_6 \lambda^2, \end{aligned} \quad (4)$$

$$f = (T - 24.5)(T - 570.82),$$

其中  $T$  为晶体温度,单位为  $^\circ\text{C}$ ,  $\lambda$  为光波波长,  $a_1 \sim a_6$  和  $b_1 \sim b_4$  为折射率参数,文献[15]中给出了各参数具体取值。考虑到晶体的热膨胀效应,可以利用热膨胀方程进行修正:

$$l = l_{25^\circ\text{C}} f(t) = l_{25^\circ\text{C}} [1 + \alpha(T - 25) + \beta(T - 25)^2], \quad (5)$$

其中热膨胀系数  $\alpha, \beta$  的取值分别为  $1.54 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$  和  $5.3 \times 10^{-9} \text{K}^{-2}$ 。

### 2.1 PPLN 晶体温度匹配带宽

在准相位匹配技术中,由于晶体反转周期制作精度的限制和波长连续调谐的需要,一般是通过调整晶体工作温度来实现相位的最佳匹配和转换效率的最大化。因此,晶体的温度调谐特性和带宽是反映系统性能的重要指标。由(3)式可知,非线性差频产生效率正比于晶体的通光长度和抽运及信号光功率,通常采用归一化的差频转换效率来表示,即

$$\eta = \frac{P_i}{P_p P_s L} \propto \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k L}{2}\right). \quad (6)$$

根据差频三光子的波长确定光栅周期以后,通过调节晶体温度使相位失谐量  $\Delta k(\lambda, T) = 0$ , 此时有最大的转换效率。设匹配的中心温度是  $T_0$ , 光栅周期为

$$\begin{aligned} \Lambda_0(T_0) &= 1/[n_p(\lambda_p, T_0)/\lambda_p - \\ &n_s(\lambda_s, T_0)/\lambda_s - n_i(\lambda_i, T_0)/\lambda_i]. \end{aligned} \quad (7)$$

当温度偏离中心温度  $\delta T$ , 使得  $\Delta k = 2.783/L$  时,差频输出功率下降到最大值的 50%, 则温度调谐带宽为  $\Delta T = 2\delta T$ 。

由(7)式可得,当温度偏离匹配中心温度时有

$$\Delta k(T) = 2\pi[n_p(T)/\lambda_p - n_s(T)/\lambda_s - n_i(T)/\lambda_i - 1/\Lambda_0(T)] \neq 0,$$

上式对  $T$  求微分得

$$\frac{\partial}{\partial T}[\Delta k(T)] = 2\pi\left[\frac{1}{\lambda_p} \frac{\partial}{\partial T}n_p(T) - \frac{1}{\lambda_s} \frac{\partial}{\partial T}n_s(T) - \frac{1}{\lambda_i} \frac{\partial}{\partial T}n_i(T) + \frac{1}{\Lambda_0^2(T)} \frac{\partial}{\partial T}\Lambda_0(T)\right] \approx \frac{\delta[\Delta k(T)]}{\delta T},$$

整理后有

$$\Delta T = 2\delta T = \frac{2.783}{\pi L} \cdot \left[\frac{1}{\lambda_p} \frac{\partial}{\partial T}n_p(\lambda_p, T) - \frac{1}{\lambda_s} \frac{\partial}{\partial T}n_s(\lambda_s, T) - \frac{1}{\lambda_i} \frac{\partial}{\partial T}n_i(\lambda_i, T) + (\alpha + 2\beta) \cdot \frac{1}{\Lambda_0(T)}\right]^{-1}, \quad (8)$$

其中

$$\frac{\partial}{\partial T}n_j(\lambda_j, T) = \frac{1}{2n_j(\lambda_j, T)} \cdot \left\{ \frac{b_1(\lambda_j^2 - a_5^2) + b_4}{(\lambda_j^2 - a_5^2)} + \frac{b_2[\lambda_j^2 - (a_3 + b_3f)^2] + 2b_3(a_2 + b_2f)(a_3 + b_3f)}{[\lambda_j^2 - (a_3 + b_3f)^2]^2} \right\} \times (2T + 546.32). \quad (j = p, s, i)$$

### 2.2 PPLN 晶体波长匹配带宽

差频准相位匹配技术中可以通过改变抽运或信号激光波长以实现差频输出波长的调谐,由于温度调谐的响应速度很难满足在光谱技术中波长快速扫描需要,因此差频系统的波长调谐带宽特性也是决定其在光谱技术中应用价值的一个重要因素。这里用类似上节的方法分析差频系统的信号激光波长匹配特性。

$$\Delta k(\lambda_s) = 2\pi\left[\frac{n_i(\lambda_i)}{\lambda_p} - \frac{n_s(\lambda_s) - n_i(\lambda_i)}{\lambda_s} - \frac{1}{\Lambda_0}\right], \quad (9)$$

其中  $\lambda_i = \frac{\lambda_s \lambda_p}{\lambda_s - \lambda_p}$

(9)式对  $\lambda_s$  求微分得

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_s}[\Delta k(\lambda_s)] = 2\pi\left[\left(\frac{1}{\lambda_s} - \frac{1}{\lambda_p}\right) \frac{\partial n_i(\lambda_i)}{\partial \lambda_i} \frac{\partial \lambda_i}{\partial \lambda_s} - \frac{1}{\lambda_s} \frac{\partial n_s(\lambda_s)}{\partial \lambda_s} + \frac{n_s - n_i}{\lambda_s^2}\right] \approx \frac{\delta[\Delta k(\lambda_s)]}{\delta \lambda_s}$$

整理后有

$$\Delta \lambda_s = 2\delta \lambda_s = \frac{2.783}{\pi L} \cdot \left[\left(\frac{1}{\lambda_s} - \frac{1}{\lambda_p}\right) \frac{\partial n_i(\lambda_i)}{\partial \lambda_i} \frac{\partial \lambda_i}{\partial \lambda_s} - \frac{1}{\lambda_s} \frac{\partial n_s(\lambda_s)}{\partial \lambda_s} + \frac{n_s - n_i}{\lambda_s^2}\right]^{-1}, \quad (10)$$

其中

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_j}n_j(\lambda_j, T) = -\frac{\lambda_j}{n_j(\lambda_j, T)} \cdot \left\{ \frac{(\lambda_j^2 - a_5^2)(a_2 + b_2f) + [\lambda_j^2 - (a_3 + b_3f)^2]^2(a_4 + b_4f)}{[\lambda_j^2 - (a_3 + b_3f)^2]^2(\lambda_j^2 - a_5^2)^2} + a_6 \right\}, \quad (j = s, i)$$

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \lambda_s} = -\frac{\lambda_p^2}{(\lambda_s - \lambda_p)^2}$$

PPLN 晶体差频激光系统抽运光波长匹配带宽可以由同样的方法得到。图 1 和图 2 所示分别为由 (8) 式和 (10) 式计算得到的不同信号光波长时 PPLN 晶体温度匹配带宽与工作温度的关系和不同

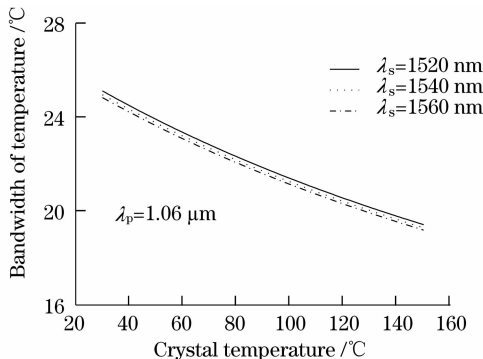


图 1 PPLN 晶体 DFG 温度匹配带宽  
Fig. 1 Relation between temperature accepted bandwidth and temperature

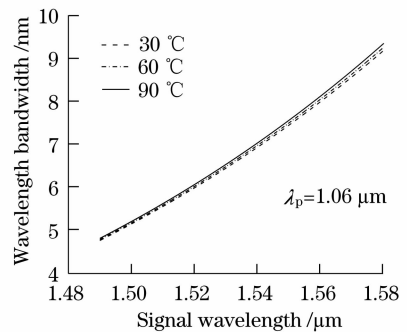


图 2 PPLN 晶体 DFG 信号光波长匹配带宽  
Fig. 2 Relation between wavelength accepted bandwidth and signal wavelength

工作温度时信号光波长匹配带宽与信号光波长的关系,抽运光波长取为  $1.06 \mu\text{m}$ ,光波在晶体中的作用长度取为  $1 \text{ cm}$ 。

由上述分析可以得到,PPLN 晶体差频系统温度和波长匹配带宽均与光波在晶体中的作用长度成反比;温度匹配带宽随晶体工作温度升高而减小,且

随着波长增加而减小;而信号光波长调谐带宽随着波长的变长单调增加,且随温度升高略有减小。

### 3 实验装置

实验系统采用宽调谐外腔式半导体激光器

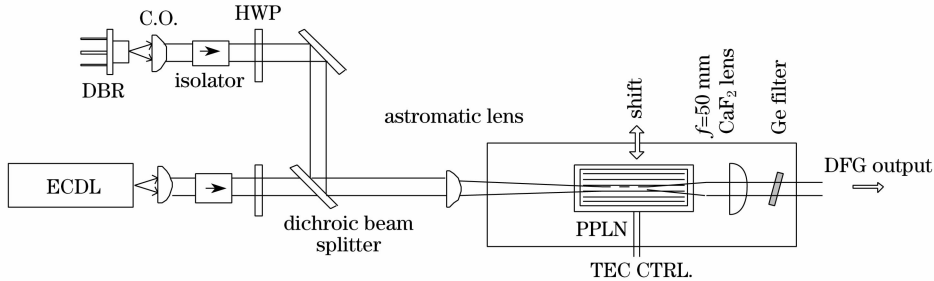


图 3 DFG 系统组成原理图

Fig. 3 Schematic of the mid-IR DFG system

DFG 抽运激光采用中心波长为  $1.06 \mu\text{m}$  的 DBR 半导体激光器,输出功率为  $135 \text{ mW}$ ,线宽小于  $3 \text{ MHz}$ ;信号激光采用光通信波段宽调谐的外腔半导体激光器 (ECDL),输出波长范围是  $1.49 \sim 1.58 \mu\text{m}$ ,无跳模连续波长调谐范围大于  $30 \text{ GHz}$ ,中心波长最大输出功率为  $50 \text{ mW}$ ,线宽小于  $2 \text{ MHz}$ 。为了利用 PPLN 晶体最大非线性系数,激光输出光束首先利用  $1/2$  波片调整偏振方向以满足在 PPLN 晶体内  $e+e \rightarrow e$  型相位匹配关系。系统使用的非线性晶体为  $50 \text{ mm} \times 8.2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的  $\text{MgO}$  掺杂多周期光栅结构 PPLN 晶体,光栅周期为  $28.5 \sim 31.5 \mu\text{m}$ ,相邻光栅周期增加为  $0.5 \mu\text{m}$ ,通光面对输入和输出三波段增透镀膜。晶体固定在有温控装置的加热炉中以设置适当的工作温度,晶体位置可以在水平方向平移,以选择适当的光栅周期。信号和抽运激光经双色镀膜的分光镜合束后由焦距为  $10 \text{ mm}$  的消色差胶合镜聚焦在晶体的通光面上,差频产生光束由  $f=50 \text{ mm}$  的  $\text{CaF}_2$  透镜收集,非线性转换剩余的近红外抽运光和信号光用 Ge 滤波片去除。

### 4 实验研究

非线性差频转换输出波长特性完全由输入抽运光和信号光波长特性决定,采用宽调谐窄线宽的 ECDL 和窄线宽连续调谐 DBR 半导体激光器的组合是有利的,一方面能够保证 DFG 激光满足高分辨光谱检测所需要的窄线宽要求,同时能够实现宽波长范围的无跳模连续调谐差频中红外相干光输出,两台激光器的调谐特性可以相互补充。系统综合两种激光器的优点,DFG 输出波长的粗调利用 ECDL

(external-cavity diode laser, ECDL) 和无跳模连续调谐 DBR 半导体激光器作为系统的抽运源,结合高品质 PPLN 多光栅周期非线性光学晶体,实现中红外光谱区窄线宽连续调谐相干光输出。图 3 所示为系统原理图。

宽调谐特性,通过手动改变 ECDL 光栅方向实现 DFG 输出波长的大范围调谐;而 DFG 输出波长的精确调整则是利用 DFB 激光器无跳模连续调谐特性,通过设置适当的激光器工作温度和电流,实现激光输出波长的连续调谐,满足 DFG 过程的波长匹配关系。图 4 所示为通过手动调整 ECDL 的输出波长实现的在几个中红外波长处的差频输出,从图中可以看到,系统输出波长范围达到  $3.2 \sim 3.7 \mu\text{m}$ ,最大输出功率约  $1 \mu\text{W}$  ( $3.3 \mu\text{m}$ )。在这个光谱区可以实现对于多种气体的高灵敏红外光谱检测,包括  $\text{H}_2\text{CO}$  ( $3.53 \mu\text{m}$ ),  $\text{CH}_4$  ( $3.30 \mu\text{m}$ ),  $\text{HCl}$  ( $3.39 \mu\text{m}$ ) 等重要大气污染成分<sup>[16]</sup>。

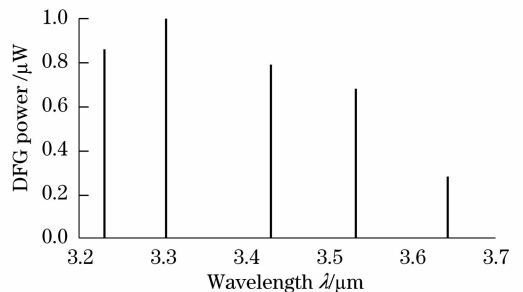


图 4 DFG 系统输出波长范围

Fig. 4 DFG output wavelength tuning range

#### 4.1 温度调谐特性

实验测定了系统的温度调谐特性。实验时设置的抽运光和信号光波长分别为  $1.06 \mu\text{m}$  和  $1.56 \mu\text{m}$  (DFG 波长:  $3.3 \mu\text{m}$ ),选择  $30 \mu\text{m}$  极化光栅通道,由 PPLN 晶体相位匹配关系计算得到的最佳匹配温度为  $72.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在中心温度两侧选取了一组晶体工作温度,并记录相应的 DFG 输出功率,并利用函数

$\eta \propto \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta kL}{2}\right)$  进行了拟合,结果如图 5 所示。

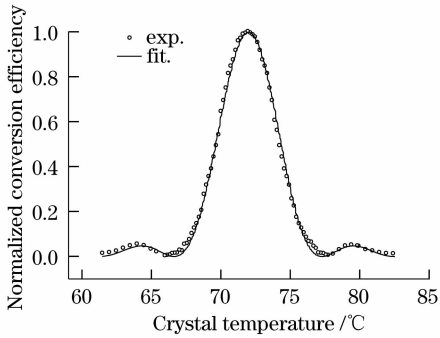


图 5 DFG 系统温度调谐特性

Fig. 5 Temperature tuning characteristic of the DFG system

由拟合得到的系统温度匹配带宽为  $4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 由于晶体的温度控制精度为  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 这个带宽足以满足系统匹配的需要。另外, 由理论计算得到的系统温度匹配带宽为  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 实际带宽是理论值的 1.2 倍。由于 PPLN 晶体的温度匹配带宽与光波作用长度成正比, 由拟合结果得到的光波在晶体实际作用距离为  $4.25\text{ cm}$ , 晶体长度的标称值为  $5\text{ cm}$ , 这表明实际晶体长度的实际利用效率约为  $85\%$ 。

#### 4.2 信号光波长调谐特性

实验中进一步研究了系统的波长匹配带宽, 由理论计算得到的系统在  $1.06\text{ }\mu\text{m}$  和  $1.56\text{ }\mu\text{m}$  输入波长时抽运和信号激光波长匹配带宽分别为  $4.4\text{ nm}$  和  $1.7\text{ nm}$ , 由于抽运激光的波长调谐范围有限, 同时为了防止较低温度时激光器的出光窗口上水汽凝结, 实验时的波长范围只有  $1.5\text{ nm}$ , 在这个波长范围改变波长时, DFG 转换效率基本没有变化, 这也表明系统具有较宽的抽运激光波长匹配带宽。主要研究了信号光的波长匹配带宽特征, 波长调谐结合了手动和电压调谐方式, 并对 ECDL 输出功率的变化进行了修正。

图 6 所示为实验测定结果和  $\text{sinc}^2\left(\frac{\Delta kL}{2}\right)$  函数拟合, 由拟合得到的信号光波长匹配带宽值为  $2.1\text{ nm}$ , 也约是  $5\text{ cm}$  光波作用距离时理论值  $1.7\text{ nm}$  的 1.2 倍, 拟合得到的光波在晶体实际作用距离为  $4.06\text{ cm}$ , 与温度带宽测定结果一致。这表明, 虽然增加晶体长度理论上能够提高差频转换的效率, 但对光学系统的设计提出了更高要求。

## 5 小 结

DFG 相干光源是对传统中红外激光光源的有

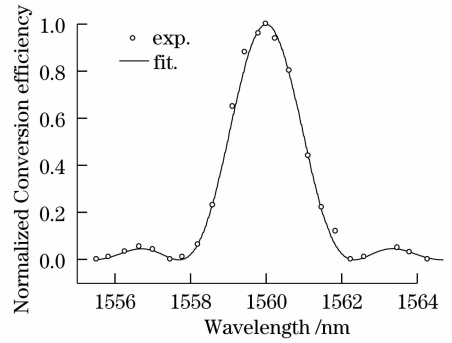


图 6 DFG 系统信号光波长调谐特性

Fig. 6 Signal-laser wavelength tuning characteristic of the DFG system

效补充, 在大气痕量气体的高灵敏检测技术中有着重要的应用价值, 而系统的温度和波长调谐特性是反映系统性能的重要指标。研究了基于准相位匹配原理的差频系统温度和信号光波长调谐特性, 从准相位匹配技术的一般位相匹配关系出发, 推导了 PPLN 晶体差频匹配的温度和信号光波长匹配带宽的近似解析表达式。建立了基于 PPLN 晶体的差频中红外激光光源系统, 开展系统温度和波长调谐特性的实验研究, 得到了系统的温度和信号光波长匹配带宽参数, 实验结果与理论分析结果基本一致, 但拟合带宽均大于理论值, 这表明实际晶体的整个通光长度没有被充分利用, 光束质量和光学系统结构有待进一步改进和优化。

## 参 考 文 献

- Werle P, Slemr F, Maurer K *et al.*. Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2002, **37**:101~114
- Cornelia F, Markus W, Sigrist. Mid-IR difference frequency generation[J]. *Topics. Appl. Phys.* 2003, **89**: 97~143
- Chen W, Mouret G, Boucher D *et al.*. Mid-infrared trace gas detection using continuous-wave difference frequency generation in periodically poled RbTiOAsO<sub>4</sub>[J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **72**: 873~876
- Richter D, Fried A, Wert B P *et al.*. Development of a tunable mid-IR difference frequency laser source for highly sensitive airborne trace gas detection[J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**: 281~288
- Li Xiaoqin, Jiang Jian, Wang Zhishan *et al.*. Widely tunable continuous wave mid-IR difference-frequency generation source with fiber laser and amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10):1807~1811  
李晓芹, 蒋建, 王执山等. 光纤型宽带可调谐连续波差频产生中红外激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10):1807~1811
- Fried A, Henry B, Wert B *et al.*. Laboratory, ground-based, and airborne tunable diode laser systems; performance characteristics and applications in atmospheric studies[J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**:317~330
- Gmachi C, Straub A, Colombelli R *et al.*. Single-mode, tunable distributed-feedback and multiple wavelength quantum cascade lasers[J]. *IEEE Quant. Electron.*, 2002, **38**(6):569~581

- 8 Armin L. Quantum cascade lasers, systems, and applications in Europe[C]. *SPIE*, 2005, **5732**: 122~133
- 9 Yao Jianquan. Development of nonlinear optical frequency conversion and quasi-phase matching technology[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2002, **31**(3): 201~207  
姚建铨. 非线性光学频率变换及准相位匹配技术[J]. *工晶体学报*, 2002, **31**(3): 201~207
- 10 Liang Xiaoyan, Hou Wei, Lü Junhua *et al.*. All-solid-state pumped tunable PPLN optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1148~1149  
梁晓燕, 侯 玮, 吕军华 等. 全固态激光器抽运的 PPLN 光参变振荡[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1148~1149
- 11 Wang Tao, Yao Jianquan, Yu Daoyin *et al.*. Research on the generation of FWM going with PPLN- OPO[J]. *Chin. J. Laser*, 2004, **31**(3): 284~288  
王 涛, 姚建铨, 郁道银 等. 在 PPLN-OPO 中伴生四波混频的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 284~288
- 12 Deng Ying, Zhu Qihua, Zeng Xiaoming *et al.*. Angle optimization for ultra-short mid-infrared non-collinear phase matching optical parametric amplification in MgO: LiNbO<sub>3</sub> crystal[J]. *Chin. J. Laser*, 2007, **34**(7): 915~919  
邓 颖, 朱启华, 曾小明 等. MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体中超短中红外非共线相位匹配光参量放大过程角度的优化选择[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 915~919
- 13 Yao Jianguo, Xue Liangping, Yan Boxia *et al.*. Optical parametric oscillator based on periodically poled MgO: LiNbO<sub>3</sub> crystal[J]. *Chin. J. Laser*, 2007, **34**(2): 209~213  
姚江宏, 薛亮平, 颜博霞 等. 周期极化掺镁铌酸锂晶体的光学参量振荡[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 209~213
- 14 Zhang Xingbao, Yao Baoquan, Wang Yuezhu *et al.*. Middle-infrared intracavity periodically poled MgO: LiNbO<sub>3</sub> optical parametric oscillator. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 426~427
- 15 Jundt D. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction,  $n_e$ , in congruent lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20): 1553~1555
- 16 Tittel F K, Richter D, Fried A. Mid-Infrared laser applications in spectroscopy[J]. *Topics. Appl. Phys.*, 2003, **89**: 445~516