

文章编号: 0258-7025(2004)08-0897-06

连续调谐输出的多周期极化铌酸锂晶体 光学参量振荡器

张百钢^{1,2,3}, 姚建铨^{1,2,3}, 丁 欣^{1,2,3}, 徐德刚^{1,2,3},

张 浩^{1,3}, 禹国俊^{1,3}, 魏权夫^{1,3}, 王 鹏^{1,2,3}

¹ 天津大学精仪学院激光与光电子研究所,

² 南开大学、天津大学联合研究院, ³ 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072

摘要 对基于多周期极化铌酸锂晶体(PPLN)的信号光单谐振准相位匹配光学参量振荡器(QPM-OPO),进行了温度调谐的理论和实验研究。以激光二极管(LD)端面抽运的声光调 Q Nd:YVO₄全固态激光器为抽运源,获得了1369.7~1678.8 nm 无重叠波段连续可调谐输出。给出了1064 nm Nd:YVO₄激光器抽运下,由PPLN的极化周期和温度直接计算输出信号光波长的公式,以及由信号光波长和极化周期计算相应的晶体温度的公式。这样就可直接计算实现无重叠波段连续可调谐输出时不同极化周期所对应的温度调谐范围,而不必联立能量守恒和动量守恒公式,逐点进行尝试。另外,周期极化晶体的极化周期不可避免地较理想值有一定的偏移,且具有不均匀性,给出了利用实验获得的温度调谐曲线,对极化周期进行修正计算的方法。

关键词 非线性光学;准相位匹配;温度调谐;多周期极化铌酸锂晶体;光学参量振荡器

中图分类号 TN 248 **文献标识码** A

Continuously Tunable Optical Parametric Oscillator Based on Multi-Grating Periodically Poled Lithium Niobate

ZHANG Bai-gang^{1,2,3}, YAO Jian-quan^{1,2,3},

DING Xin^{1,2,3}, XU De-gang^{1,2,3}, ZHANG Hao^{1,3},

YU Guo-jun^{1,3}, WEI Quan-fu^{1,3}, WANG Peng^{1,2,3}

¹ Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument
and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University,

² Cooperated Institute of Nankai University and Tianjin University

³ Key Lab. of Optoelectric Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China

Abstract Theoretical and experimental study is presented on temperature-tuned signal-resonated quasi-phase-matched optical parametric oscillator (OPO) in multi-grating periodically poled lithium niobate (PPLN) pumped by an acousto-optically Q-switched cw-diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser. The continuously tunable signal output from 1369.7 nm to 1678.8 nm without wavelength overlap is demonstrated. The formula of calculating the signal wavelength as a function of the grating period and the temperature is given. The formula of calculating the temperature as a function of the signal wavelength and the grating period is also given. Based on those work, the relative temperature tuning ranges for each grating period to realize continuously tunable signal output without wavelength overlap can be calculated directly. So it does not need to solve simultaneous equations of energy and

收稿日期: 2003-04-23; **收到修改稿日期**: 2003-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(60278001), 教育部南开大学、天津大学科技合作基金, 博士点基金, 天津大学优秀博士学位论文基金([2001]01)和天津市科技发展计划资助项目。

作者简介: 张百钢(1977—), 男, 河南洛阳人, 天津大学博士研究生, 主要从事非线性光学频率变换及全固态激光技术等方面的研究工作。E-mail: zbgjh@163.com 或 zbgjh@eyou.com

momentum conservation through point-by-point computation. In addition, the uniform deviation of the grating period in the whole periodically poled crystal from the ideal length is usually inevitable, as well as the random variation in the length of the domain. The method of correction computation on grating period is given by using the temperature tuning curve got in the experiment.

Key words nonlinear optics; quasi-phase-matching (QPM); temperature-tuned; multi-grating periodically poled lithium niobate; optical parametric oscillator

1 引 言

红外可调谐相干光源在许多方面有着广泛的用途,比如在光谱学、光化学、医学、非线性光学、大气研究、军事国防等研究领域内,都需要输出波长可调谐的红外波段激光。实现红外可调谐相干光源的一个有效方法是利用光学参量过程实现光学参量振荡器(OPO),其优点是波长覆盖范围宽、调谐范围大、调谐方便,且适于小型化和固体化。近些年迅速发展成熟起来的周期极化晶体的电场极化制作技术,引起了人们对准相位匹配光学参量振荡器(QPM-OPO)^[1~5]广泛的研究兴趣。利用周期极化晶体实现准相位匹配,其实质是对铌酸锂等铁电材料的自发极化方向进行周期性调制,以补偿相位失配,从而在整个周期极化晶体内实现高效的光学频率变换。由于极化周期与材料的内在特性无关,因此与双折射相位匹配(BPM)技术相比,准相位匹配没有波矢方向和偏振方向的限制;没有双折射效应(或很小)的晶体也可以实现相位匹配;理论上准相位匹配能够利用晶体的整个透光范围;此外,准相位匹配过程也不再要求垂直偏振光束,所以能够利用大的非线性系数。其非线性光学频率变换的转换效率较双折射相位匹配有显著提高。利用周期极化晶体实现准相位匹配光学参量振荡器,使得我们能够以激光二极管(LD)抽运的全固态激光器为抽运源,通过调谐周期极化晶体的温度^[1]或周期^[6],实现较大调谐范围的全固态光源。目前,实现准相位匹配光学参量振荡器的最常见的铁电材料是周期极化 LiNbO₃ 晶体(PPLN)^[7]。

本文报道了同时利用准相位匹配光学参量振荡器的温度调谐特性和周期调谐特性,以 LD 端面抽运的声光调 Q Nd:YVO₄ 全固态激光器为抽运源,在多周期 PPLN 上实现的 1369.7~1678.8 nm 无重叠波段的连续可调谐输出。

2 理论分析

2.1 准相位匹配的基本原理

在准相位匹配中,一般晶体在 z 轴方向极化,如果三波共线,波矢均沿晶体 x 轴,则相位失配量满足^[1]

$$\Delta k = 2\pi \left[\frac{n(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{n(\lambda_s, T)}{\lambda_s} - \frac{n(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{m}{\Lambda(T)} \right]$$

其中, $m(=1, 3, 5, \dots)$ 为准相位匹配阶数,一般取 $m=1$ 以获得较大的有效非线性系数; $\Lambda(T)$ 是温度为 T 时的极化周期,满足晶体的热膨胀方程^[8]; λ_p, λ_s 和 λ_i 分别是抽运光、信号光和空闲光的波长; $n(\lambda_p, T), n(\lambda_s, T)$ 和 $n(\lambda_i, T)$ 是温度为 T 时相应光的折射率,对 PPLN 来说由其色散方程^[9] 决定。为使参量过程有效发生,应满足能量守恒和动量守恒条件,即

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda_s} - \frac{1}{\lambda_i} = 0 \\ \frac{n(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{n(\lambda_s, T)}{\lambda_s} - \frac{n(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{m}{\Lambda(T)} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

可以看出,在抽运光波长不变的情况下,改变周期极化晶体的温度或周期,可以实现准相位匹配光学参量振荡器的波长调谐输出。

2.2 PPLN-OPO 调谐特性的拟合公式

由于(1)式没有给出某一波长抽运下, PPLN-OPO 在不同极化周期情况时信号光波长和温度的直接关系,因此由输出信号光波长的大小,并不能直接给出对应的温度值,而只能采取不断尝试的办法来寻找,不利于进行快速计算和理论分析。我们给出 1064 nm Nd:YVO₄ 激光器抽运下,由 PPLN 的极化周期和温度直接计算光学参量振荡器输出信号光波长,以及由光学参量振荡器输出信号光波长和极化周期计算相应的晶体温度的两个拟合公式。方法是先由精确公式(1)得到多组 (λ_s, Λ, T) 值,然后利用 Matlab 等数学软件包,通过编程进行最小二乘曲线拟合,确定拟合公式的系数。得到的 1064 nm Nd:YVO₄ 激光器抽运下 PPLN-OPO 调谐特性的两个拟合公式为

$$\lambda_s(\Lambda, T) = \frac{a_1 + a_2 \cdot \Lambda + a_3 \cdot \Lambda^2 + a_4 \cdot \Lambda \cdot T + a_5 \cdot T + a_6 \cdot T^2}{1 + b_1 \cdot \Lambda + b_2 \cdot \Lambda^2 + b_3 \cdot \Lambda \cdot T + b_4 \cdot T + b_5 \cdot T^2} \quad (2)$$

$$T(\lambda_s, \Lambda) = \frac{c_1 + c_2 \cdot \lambda_s + c_3 \cdot \lambda_s^2 + c_4 \cdot \lambda_s \cdot \Lambda + c_5 \cdot \Lambda + c_6 \cdot \Lambda^2}{1 + d_1 \cdot \lambda_s + d_2 \cdot \lambda_s^2 + d_3 \cdot \lambda_s \cdot \Lambda + d_4 \cdot \Lambda + d_5 \cdot \Lambda^2} \quad (3)$$

其中 λ_s 和 Λ 的单位为 μm , T 的单位为 K, 各参数具体数值见表 1。

表 1 公式(2),(3)中各参数的数值

Table 1 Parameter values in equation (2) and (3)

	Value		Value		Value		Value
a_1	1.1750	b_1	-5.3872×10^{-2}	c_1	1.5111×10^3	d_1	-9.6502×10^{-1}
a_2	-6.109×10^{-2}	b_2	7.1911×10^{-4}	c_2	-1.4703×10^3	d_2	5.5507×10^{-2}
a_3	7.8226×10^{-4}	b_3	8.2740×10^{-6}	c_3	8.9234×10	d_3	1.8650×10^{-2}
a_4	9.4727×10^{-6}	b_4	-3.0276×10^{-4}	c_4	-1.6392×10^{-1}	d_4	-1.6234×10^{-2}
a_5	-3.6194×10^{-4}	b_5	1.4899×10^{-8}	c_5	-2.9108×10	d_5	-6.4015×10^{-5}
a_6	2.0636×10^{-8}			c_6	3.3583×10		

实验中,采用的是多周期 PPLN,室温下(下文中出现的极化周期均是指室温下)其周期的理想值为 $26.0 \sim 30.0 \mu\text{m}$, 间隔 $0.5 \mu\text{m}$, 以下用 Λ_i ($i = 0 \sim 8$) 来表示。利用(1)式进行计算,得到 1064 nm Nd:YVO₄ 激光器抽运下不同周期的 PPLN 所产生的信号光波长与晶体温度的关系,如图 1 中的实线所示;图 1 中用圆圈和圆点分别表示的是由拟合公式(2),(3)得到的温度调谐曲线。可见,在 $1.36 \sim 1.71 \mu\text{m}$ 的输出信号光波段内,由公式(2)和(3)所得的结果和由(1)式所得的结果吻合得很好。

2.3 温度调谐范围的确定

由上述计算可知,在 $100 \sim 250^\circ\text{C}$ 间调谐该多周

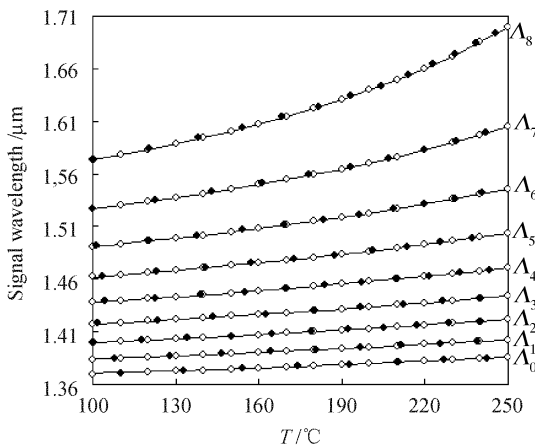


图 1 1064 nm 抽运下不同周期 PPLN-OPO 的温度调谐曲线

Fig. 1 PPLN-OPO signal wavelength as a function of the crystal temperature pumped by a 1064 nm laser

期 PPLN 的温度时,理论上可获得 $1369.9 \sim 1699.8 \text{ nm}$ 波段内任意波长的信号光输出。比如,在 $\Lambda_0 = 26.0 \mu\text{m}$ 处可获得 $1369.9 \sim 1385.7 \text{ nm}$ 波段输出;在 $\Lambda_1 = 26.5 \mu\text{m}$ 处可获得 $1384.0 \sim 1402.4 \text{ nm}$ 波段输出。显然,不同周期间可能会出现波长的调谐范围相互重叠的现象,而给实际应用带来不便。为实现无重叠波段的多周期 PPLN-OPO 的温度调谐(实际为周期和温度双调谐)输出,需要为每一个极化周期 Λ_i 确定一个工作温度范围 $[T_{i_l}, T_{i_m}]$, 使得与各个周期对应的输出信号光的波长范围 $[\lambda_{s,i_l}, \lambda_{s,i_m}]$ 能够没有重叠且互相连接,即

$$\lambda_{s,i_l} = \lambda_{s,(i-1)_m} \quad (i = 1 \sim 8) \quad (4)$$

LiNbO₃ 晶体中由于杂质能级的存在,其光折变性能很容易受到温度的影响。一般实验中的工作温度应保证不低于 100°C , 并尽量保持较高的温度,以减少光折变损伤^[6,10]。因此,为获得较大的波长调谐范围和减少光折变损伤,应取 $T_{0_l} = 100^\circ\text{C}$; 而 T_{i_m} 可取为晶体温度控制器正常工作时能够达到的最大温度值,本实验中,温度控制器的工作范围为室温 $\sim 250^\circ\text{C}$, 所以令 $T_{i_m} = 250^\circ\text{C}$ ($i = 0 \sim 8$)。确定 T_{i_l} ($i = 1 \sim 8$) 的过程有两步,首先通过(1)式计算得到或者由实验测得 $T_{(i-1)_m} = 250^\circ\text{C}$ 时 $\lambda_{s,(i-1)_m}$ 的大小,由(4)式可知此数值也代表了 λ_{s,i_l} 的大小,然后由 λ_{s,i_l} 的大小确定 T_{i_l} 的值。这样,最终得到无重叠波段连续调谐输出时,每一个极化周期 Λ_i 所对应的工作温度范围 $[T_{i_l}, T_{i_m}]$ 。

由(2)式和(4)式,有

$$\lambda_{s,i_l} = \frac{a_1 + a_2 \cdot \Lambda_i + a_3 \cdot \Lambda_i^2 + a_4 \cdot \Lambda_i \cdot T_{i_l} + a_5 \cdot T_{i_l} + a_6 \cdot T_{i_l}^2}{1 + b_1 \cdot \Lambda_i + b_2 \cdot \Lambda_i^2 + b_3 \cdot \Lambda_i \cdot T_{i_l} + b_4 \cdot T_{i_l} + b_5 \cdot T_{i_l}^2} = \lambda_{s,(i-1)_m} \quad (5)$$

据此可以由 $\lambda_{s,(i-1)m}$ 求出 T_{ij} 。更简便的方法是由(3)式和(4)式直接得到

$$T_{ij} = T(\lambda_{s,i}, \Delta_i) = \frac{c_1 + c_2 \cdot \lambda_{s,(i-1)m} + c_3 \cdot \lambda_{s,(i-1)m}^2 + c_4 \cdot \lambda_{s,(i-1)m} \cdot \Delta_i + c_5 \cdot \Delta_i + c_6 \cdot \Delta_i^2}{1 + d_1 \cdot \lambda_{s,(i-1)m} + d_2 \cdot \lambda_{s,(i-1)m}^2 + d_3 \cdot \lambda_{s,(i-1)m} \cdot \Delta_i + d_4 \cdot \Delta_i + d_5 \cdot \Delta_i^2} \quad (6)$$

下面将通过与实验值的比较,来验证公式(5)和(6)的有效性。

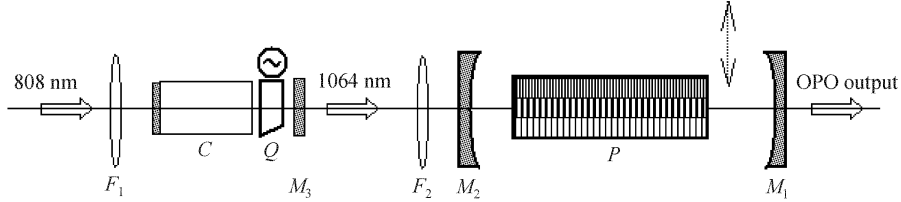


图2 1064 nm 抽运的多周期 PPLN-OPO 的实验装置简图

F_1 : 808 nm 耦合系统; F_2 : 1064 nm 耦合系统; C: Nd:YVO₄晶体; Q: 声光 Q 开关;
P: PPLN 晶体及其温度控制器; M_1, M_2 : OPO 的谐振腔镜; M_3 : 1064 nm 输出镜

Fig. 2 Experimental configuration of the OPO based on multi-grating PPLN

F_1 : 808 nm coupling system; F_2 : 1064 nm coupling system; C: Nd:YVO₄; Q: Q switch;

P: PPLN and its heating oven; M_1, M_2 : PPLN-OPO input and output mirrors; M_3 : 1064 nm output mirror

3 实验研究

3.1 实验装置

图2为实验装置示意图。PPLN-OPO的抽运源为808 nm LD抽运的声光调Q Nd:YVO₄全固态激光器。Nd:YVO₄晶体中Nd离子的掺杂浓度为0.5%,尺寸为3 mm×3 mm×5 mm,输入端镀808 nm高透膜,1064 nm高反膜,1064 nm输出镜 M_3 的透过率为10%。声光Q开关的重复频率为19 kHz。LD带有温度控制和冷却系统,Nd:YVO₄晶体采用恒温水循环器进行水冷。Nd:YVO₄激光器的1064 nm输出光作为PPLN-OPO的抽运光,经过耦合系统 F_2 ,被整形、聚焦到PPLN晶体的中心位置,形成直径为100 μm 左右的光斑。

多周期PPLN晶体在 z 轴方向极化,周期大小如前所述,厚度为0.5 mm,沿 x 轴方向长度为50 mm,整个晶体置于一个可以手动平移的温控光学平台上。温度控制器采用pt100作为温度传感器,工作范围为室温~250 $^{\circ}\text{C}$ 。PPLN-OPO谐振腔长为80 mm,输入端凹面镜 M_2 的曲率半径为300 mm,输出端凹面镜 M_1 的曲率半径为80 mm。输入镜和输出镜的透过率曲线如图3所示。由于 M_1 和 M_2 的基质材料对3~4 μm 波段的红外光高吸收,因此,此OPO为信号光单谐振。

3.2 极化周期的修正

通过周期和温度双调谐,测量了不同极化周期处,多周期PPLN-OPO输出信号光波长的变化范

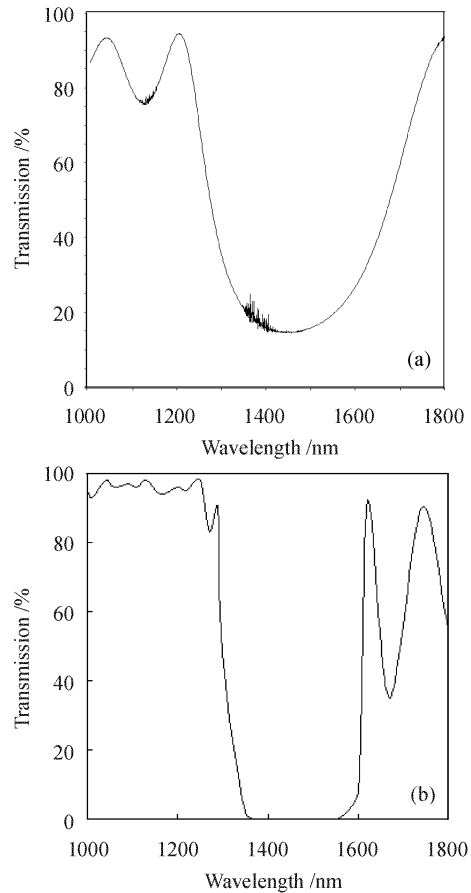


图3 PPLN-OPO 谐振腔镜输出镜 M_1 (a), 输入镜 M_2 (b) 的透过率曲线

Fig. 3 Transmission curves of the PPLN-OPO output mirror M_1 (a) and input mirror M_2 (b)

围。图 4 中的圆圈表示的是温度在 100~250℃ 间调谐时, $\Lambda_0 = 26.0 \mu\text{m}$ 和 $\Lambda_8 = 30.0 \mu\text{m}$ 的实验温度调谐曲线, 虚线表示的是温度在 100~250℃ 间调谐时, $\Lambda_0 = 26.0 \mu\text{m}$ 和 $\Lambda_8 = 30.0 \mu\text{m}$ 的理论温度调谐曲线。可见, 实验值和理论值存在着较大的差别。造成这种现象的主要原因是周期极化晶体的极化周期不可避免地较理想值有一定的偏差, 且具有

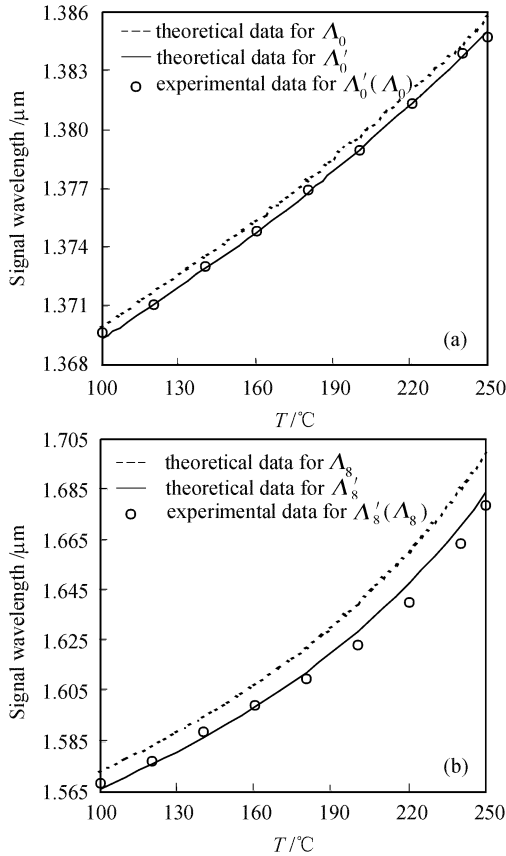


图 4 1064 nm Nd:YVO₄ 激光器抽运下 PPLN-OPO 的温度调谐曲线

Fig. 4 PPLN-OPO signal wavelength as a function of the crystal temperature pumped by 1064 nm Nd:YVO₄ laser

- (a) $\Lambda'_0 = 25.98 \mu\text{m}$ ($\Lambda_0 = 26 \mu\text{m}$);
 (b) $\Lambda'_8 = 29.94 \mu\text{m}$ ($\Lambda_8 = 30 \mu\text{m}$)

不均匀性。因此, 需要对极化周期的大小进行修正。修正的方法是, 先测量极化周期为 Λ_i 时, 某两个温度处(比如 100℃ 和 250℃)输出信号光的波长, 再由 (1) 式得到室温下与二者对应的两个极化周期的理想值, 然后取它们的平均值 Λ'_i 作为 Λ_i 的修正极化周期。最终得到的修正结果是: $\Lambda'_0 = 25.98 \mu\text{m}$, $\Lambda'_1 = 26.49 \mu\text{m}$, $\Lambda'_2 = 26.97 \mu\text{m}$, $\Lambda'_3 = 27.47 \mu\text{m}$, $\Lambda'_4 = 27.97 \mu\text{m}$, $\Lambda'_5 = 28.46 \mu\text{m}$, $\Lambda'_6 = 28.95 \mu\text{m}$, $\Lambda'_7 = 29.44 \mu\text{m}$ 和 $\Lambda'_8 = 29.94 \mu\text{m}$ 。图 4 中的实线表示

的是温度在 100~250℃ 间调谐时, $\Lambda'_0 = 25.98 \mu\text{m}$ 和 $\Lambda'_8 = 29.94 \mu\text{m}$ 的理论温度调谐曲线。显然, 极化周期修正后, 其温度调谐特性与实验结果符合得较好。

3.3 无重叠波段的多周期 PPLN-OPO 的连续调谐

在获得的极化周期修正值 Λ'_i 的基础上, 把实验测得的 250℃ 时不同极化周期处 λ_s 的值, 即 $\lambda_{s,(i-1)m}$ ($i = 1 \sim 8$) 代入到 (5) 式和 (6) 式中, 计算出无重叠波段的多周期 PPLN-OPO 的连续调谐输出时, 每一个极化周期 Λ'_i 对应的工作温度下限 T_{ii} 。为了验证公式 (5) 和 (6) 的有效性, 实验测量了 T_{ii} 的大小, 以进行对比, 结果见表 2。可见, 理论计算的结果和实验结果符合得很好。考虑到极化周期存在偏差和不均匀性, 温度控制器的精度有限, 以及测量误差等因素的影响, 认为理论和实验结果间的差别是完全可以忍受的。因此, (5) 式和 (6) 式是由 $\lambda_{s,(i-1)m}$ 确定 T_{ii} 大小的有效公式, 而 (6) 式尤为简便、直接。

表 2 T_{ii} ($i = 1 \sim 8$) 的计算结果和实验结果

Table 2 Experimental and calculated data of T_{ii} ($i = 1 \sim 8$)

	Experimental data / °C	Calculated data by using equation (5) / °C	Calculated data by using equation (6) / °C
T_{1i}	114	112.4	111.3
T_{2i}	121	122.6	122.3
T_{3i}	125	127.0	127.2
T_{4i}	133	132.8	133.3
T_{5i}	138	138.4	138.7
T_{6i}	143	143.4	143.3
T_{7i}	148	148.9	148.5
T_{8i}	154	154.1	154.0

无重叠波段连续调谐输出的实验结果是: $\Lambda'_0 \sim \Lambda'_8$ 对应的工作温度范围分别是 [100℃, 250℃], [114℃, 250℃], [121℃, 250℃], [125℃, 250℃], [133℃, 250℃], [138℃, 250℃], [143℃, 250℃], [148℃, 250℃] 和 [154℃, 250℃]; 相应的输出信号光波长的调谐范围是 [1369.7 ~ 1384.7 nm], [1384.7 ~ 1401.4 nm], [1401.4 ~ 1420.2 nm], [1420.2 ~ 1442.1 nm], [1442.1 ~ 1468.0 nm], [1468.0 ~ 1499.5 nm], [1499.5 ~ 1539.8 nm], [1539.8 ~ 1594.8 nm] 和 [1594.8 ~ 1678.8 nm]。

在极化周期 $\Lambda'_6 = 28.95 \mu\text{m}$ 处, 温度为 140℃ 时, 由 540 mW 的 1064 nm 抽运光(脉冲宽度 ~ 80 ns)共产生了 65 mW 的信号光。由于脉冲宽度较大, 且宽带膜层的设计和制作有一定的难度, 特别是

实验中 OPO 输入镜没有实现对 1369.7~1678.8 nm 信号光的全波段高反,而输出镜对此波段内不同波长的透过率差别也很大,因此,转换效率未达到最佳。

4 结 论

报道了以 LD 端面抽运的声光调 Q Nd:YVO₄ 全固态激光器为抽运源,在多周期 PPLN 上实现的 1369.7~1678.8 nm 无重叠波段的连续可调谐输出。其实质是周期和温度双调谐的信号光单谐振准相位匹配光学参量振荡器。给出了 1064 nm Nd:YVO₄ 激光器抽运下,由 PPLN 的极化周期和温度直接计算信号光波长的拟合公式,以及由信号光波长和极化周期计算相应的晶体温度的拟合公式。在此基础上获得了无重叠波段可调谐输出时,不同极化周期所对应的温度调谐范围的求解公式。进行了极化周期的修正计算。实验结果与理论分析的计算结果基本吻合。

致谢 对提供周期极化铌酸锂晶体的 HCP 公司(台湾)特表感谢。

参 考 文 献

- 1 L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer *et al.*. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(11):2102~2116
- 2 O. B. Jensen, T. Skettrup, O. B. Petersen *et al.*. Diode-pumped intracavity optical parametric oscillator in pulsed and continuous-wave operation [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2002, **4**(2):190~193
- 3 D. T. Reid, Z. Penman, M. Ebrahimzadeh *et al.*. Broadly tunable infrared femtosecond optical parametric oscillator based on periodically poled RbTiOAsO₄ [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(18):1397~1399
- 4 A. Garashi, A. Arie, A. Skliar *et al.*. Continuous-wave optical parametric oscillator based on periodically poled KTiOPO₄[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(22):1739~1741
- 5 M. Peltz, U. Bäder, A. Borsutzky *et al.*. Optical parametric oscillators for high pulse energy and high average power operation based on large aperture periodically poled KTP and RTA [J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **73**(7):663~670
- 6 Liang Xiaoyan, Hou Wei, Lü Junhua *et al.*. Low-threshold and wide tunable PPLN optical parametric oscillator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):10~12
梁晓燕,侯 玮,吕军华等. 低阈值宽调谐 PPLN 光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1):10~12
- 7 M. Yamada, N. Nada, M. Saitoh *et al.*. First-order quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide periodically poled by applying an external field for efficient field blue second-harmonic generation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(5):435~436
- 8 Y. S. Kim, R. T. Smith. Thermal expansion of lithium tantalite and lithium niobate single crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 1969, **40**(11):4637~4641
- 9 D. H. Jundt. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n_e , in congruent lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20):1553~1555
- 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 光参量振荡[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9):1148~1149