

连续可调谐 OPO 及其在 Cs_2 分子频率调制 光谱中的应用*

王海波 翟泽辉 马 艳 王少凯 郗江瑞† 谢常德 彭堃堃

(山西大学光电研究所,量子光学与光量子器件国家重点实验室,太原 030006)

(2001 年 8 月 20 日收到,2001 年 9 月 20 日收到修改稿)

采用边带锁频技术,在 II 类相位匹配半整体光学参量振荡器(OPO)中实现双谐振 OPO 稳定单频运转,通过调谐抽运光频实现 OPO 输出连续可调谐,最大连续调谐范围 2.8GHz,将其应用于 Cs_2 分子的频率调制光谱,观测到室温附近 Cs_2 分子气室样品在 1041.506nm 附近的高分辨率光谱.

关键词:连续 OPO,单频运行,连续调谐,调制吸收光谱

PACC:0765,4250

1. 引 言

光学参量振荡器(OPO)的输出光场保留了抽运激光低噪声的特性,同时又极大地扩展了激光光谱范围而受到人们的广泛关注.目前,脉冲参量振荡技术的发展已比较成熟,达到实用化水平.连续波光参量振荡器(cw OPO)由于受非线性晶体、抽运功率、以及抽运光源频率稳定性的限制,发展一直落后于脉冲 OPO.近年来,随着激光二极管(LD)抽运的全固体化激光器的出现及新的高效非线性晶体的使用,使得高转换效率^[1]、连续可调^[2]、稳定运转的 OPO 有了长足的发展,并广泛应用于光谱学、遥感、光学频标^[3]及产生各种非经典光场^[4-7].1993 年 Yang 等^[3]采用 KTP 晶体实现了连续单共振 OPO(SRO),其中只有一个下转换模在腔内共振,但其阈值抽运功率高达 1W 限制了 SRO 的广泛应用.双谐振 OPQ(DRO),两个下转换模同时在腔内共振,具有抽运阈值低和输出光光谱纯度高等优点,因而受到普遍关注^[3,8,9].1998 年 Bode 等^[2]曾采用 I 类相位匹配 LiNbO_3 晶体实现 DRO,OPO 输出波长连续调谐达到 8GHz.

激光光谱技术中,人们已经对 Cs 饱和蒸气样品的 D_1 线($6^2S_{1/2} \leftrightarrow 6^2P_{1/2}$ 的跃迁谱线)和 D_2 线($6^2S_{1/2} \leftrightarrow 6^2P_{3/2}$ 的跃迁谱线)进行了很详尽地研究.主要由于

所能得到的光源波长的限制,对 Cs_2 分子在能级 $X^1 \Sigma_g^+ \leftrightarrow A^1 \Sigma_u^+$ 之间跃迁谱线的研究较少,这些跃迁谱线分布在 900nm—1400nm 的波长范围内,吸收及辐射截面较小,谱线比较复杂.利用 YAG 激光器^[10](辐射波长 1064nm)和布拉格反射的激光二极管激光器^[11](波长 1083nm),实验得到了 1064nm 附近和 1083nm 附近的吸收谱线.连续 OPO 可以产生宽波段可调谐的下转换输出,是研究 Cs_2 分子 $X^1 \Sigma_g^+ \leftrightarrow A^1 \Sigma_u^+$ 跃迁谱线的理想光源.1998 年 Gibson 等首次利用连续 DRO 采用直接探测的办法测量了 Cs_2 分子在 1050nm 附近吸收光谱^[12],由于 Cs_2 分子常温下在该波段吸收很弱,采用直接探测的办法观测其吸收谱必须提高 Cs_2 分子饱和蒸气密度,文献 [12] 中将 Cs_2 分子气室温度加热至 320°C.频率调制光谱技术是一种高灵敏的光学外差谱技术,具有响应快、灵敏度高的特点,能够快速探测灵敏度达到光源噪声极限的微弱吸收谱信号.目前,频率调制光谱技术均采用可调谐激光器或激光二极管(LD)为光源,我们第一次以可调谐 OPO 为光源将该技术应用于 Cs_2 分子的吸收谱测量,测量了 Cs_2 分子在 1041.506nm 附近的吸收谱,达到较高的灵敏度.

本文介绍稳定单频运转及输出频率连续调谐的 II 类相位匹配双谐振 OPO.以 OPO 输出的可调谐相干光为光源,采用频率调制光谱技术,在室温(36°C)

* 国家自然科学基金(批准号:69778015,69837010),山西省自然科学基金和高校优秀青年教师奖励计划资助的课题.

† 通讯联系人, email: jrgao@sxu.edu.cn

附近获得 CS_2 分子气室样品的高分辨率光谱.

2. II 类匹配双共振 OPO 稳定运转特性分析

连续波运转单共振 (SRO) OPO 可以实现输出波长大范围连续调谐,但其输出波长易受抽运源的影响,很难保持在稳定的单频运转状态,抽运光频率的抖动会导致 OPO 腔内非共振摸起振.通常 cw OPO 运转在双谐振或三谐振(相互作用三模,抽运模、信号模与闲置模同时共振)情况下,谐振条件的引入减低了 OPO 抽运阈值、压窄了输出线宽,但同时也使其调谐范围受到很大限制.

采用 I 类匹配非线性晶体的 OPO 具有转换效率相对较高的优点,但实现稳定的单模运转比较困难.与 I 类相位匹配 OPO 相比较,II 类匹配方式的 OPO 有以下优点:1)由于两下转换光偏振非简并,很容易用偏振棱镜把两个下转换模分开;2)由于两下转换光偏振非简并,即使在频率简并运行时两下转换光仍然存在着较大的折射率差,使 OPO 对扰动的容忍度优于 I 类相位匹配^[9].

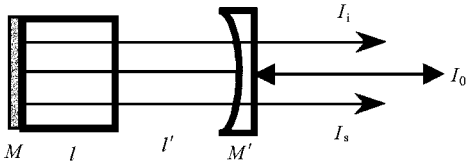


图 1 半整体腔双谐振 OPO 理论模型(l 为晶体长度, l' 为晶体与腔镜 M' 的距离, I_0 、 I_1 、 I_2 为抽运光,下转换闲散光和信号光)

图 1 为实验所用半整体腔 OPO,由一块 KTP 晶体和一个曲面镜组成,晶体的一端镀抽运光及下转换光全反膜,兼作 OPO 腔镜(M),曲面镜 M' 为 OPO 输出耦合镜,固定在压电陶瓷上以便扫描和锁定腔长, l 为晶体长度, l' 为晶体内表面与输入镜的距离.双共振条件下,OPO 腔内起振的一对下转换模频率 ω_1 、 ω_2 满足能量守恒 $\omega_1 + \omega_2 = \omega_p$, ω_p 为抽运光频率. II 类相位匹配情况下,两下转换光偏振非简并,即使在频率简并时也存在折射率差,即 $n_1(\omega_1) \neq n_2(\omega_2)$,引入

$$\bar{n} = \frac{n_1 + n_2}{2}, \quad \delta n = \frac{n_1 - n_2}{2}, \quad (1)$$

光在腔内循环一周的相位变化为

$$\varphi_1 = \frac{\omega_1}{c} [2l' + 2n_1 l] = 2p\pi + \delta\varphi_1, \quad (2)$$

$$\varphi_2 = \frac{\omega_2}{c} [2l' + 2n_2 l] = 2(p + m)\pi + \delta\varphi_2, \quad (3)$$

其中 L 为总腔长, l 为晶体长度, $l' = L - l$, p 、 m 为整数.

在双共振条件下 $\delta\varphi_1 = \delta\varphi_2 = 0$,有^[13]

$$L = l' + \bar{n}l \\ = \lambda_p \left(p + \frac{m}{2} \right) - \frac{\delta n l}{2l' + 2\bar{n}l} (m\lambda_p + 2\delta n l). \quad (4)$$

只有满足上式腔长关系时 OPO 才可以起振, $p + m/2$ 为一定值的模组成一个簇,同一簇内相邻谐振模的腔长差为

$$\Delta L = \frac{\delta n l \lambda_p}{l' + \bar{n}l}, \quad (5)$$

相邻模的频率间隔为

$$\Delta\omega = \frac{c}{\lambda(l' + \bar{n}l)}. \quad (6)$$

对于 KTP 晶体, $\delta n = n_1 - n_2 = 1.8302 - 1.7458 = 0.0844$.取晶体长度 l 为 7mm,晶体到输入镜的距离为 $l' = 14\text{mm}$,抽运光波长 $\lambda_p = 532.4\text{nm}$,计算可得相邻谐振模对应的腔长差 $\Delta L = 11\text{nm}$,相邻模的频率间隔为 $\Delta\omega = 5.6\text{GHz}$.每个模允许的腔长范围取决于 OPO 腔的线宽,通过 OPO 的自由光谱范围及实测的精细常数可以计算出实际 OPO 的线宽为 24.4MHz,这决定了抽运光频率抖动的最大范围;24.4MHz 的腔线宽等效于 2.25nm 的腔长变化,图 2 为示波器记录扫描状态下 OPO 的透射曲线.其中曲线 a 为抽运绿光透射,绿光的腔线宽很宽(剩余反射率引起),对 OPO 的调谐有利;曲线 b 为下转换光输出,可以看到只有在一些特定腔长下,下转换光才能起振,这些能够起振的模组成一个模簇,抽运光频的不稳或 OPO 腔长扰动极易使 OPO 发生在模簇内的跳模^[8].

大功率抽运时甚至会有多个模簇,从而发生起振模簇间跃跳,使 OPO 输出功率及频率非常不稳^[9].从图 2 中也可以看到,II 类匹配 OPO 能够起振的模对应的腔长是一系列分立的值,其腔长间距 $\Delta L = 11\text{nm}$ 约为模宽度 $\delta L = 2.25\text{nm}$ 的 5 倍,跳模概率相对较低,这个特性使 II 类 OPO 的稳定运转较易达到.为得到稳定输出的光参量振荡器,必须将腔长的稳定性控制在模线宽对应的腔长变化范围 δL 内.由于 $\Delta L \propto \delta n$,对于 I 类匹配晶体 OPO($\delta n \approx 0$),在上述条件下 $\delta L \approx 0.1\text{nm}$,因而 I 类匹配 OPO 稳定运转要求腔长抖动稳定在 0.1nm 范围内,否则必然会跳模^[14].而在 II 类匹配 OPO 腔中信号光与闲散光

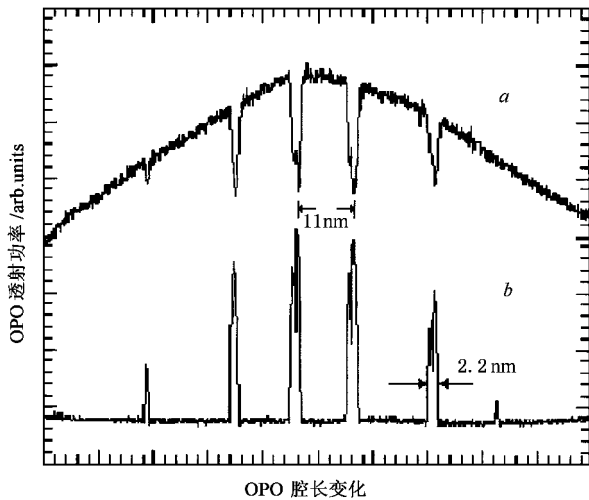


图2 双谐振 OPO 输出功率随腔长变化(曲线 *a* 为透射抽运场输出,曲线 *b* 为下转换输出)

偏振互相垂直,两下转换光折射率之差较大导致了 OPO 对外部条件的容忍度大大优于 I 类匹配情况(本文中 δL 比同样条件下 I 类匹配 OPO 大 22.5 倍)。

OPO 的调谐特性由能量守恒条件 $\omega_1 + \omega_2 = \omega_p$ 、相位匹配条件 $\Delta k = k_p - k_s - k_i = 0$ 以及簇模条件 $\delta\omega_s - \delta\omega_s^c + \delta\omega_i - \delta\omega_i^c = 0$ 决定^[9]。相位匹配条件保证高的参量增益,它决定 OPO 输出光频随调谐参量变化函数的走向,而其他两个条件则决定 OPO 具体的调谐细节。相位匹配情况的改变可以通过改变非线性晶体的角度、温度、及电光调制非线性晶体的方法来实现。由于谐振条件的限制,双谐振 OPO 的连续调谐相对比较困难。通过调谐抽运光源的频率来实现 OPO 的连续调谐是近几年发展的新方法,很多文献^[2,6]都证明采用这种方法调谐的 OPO,其调谐范围本质上只受抽运光源连续可调的限制,再则 OPO 采用这种方法调谐可以比较方便地应用到吸收光谱的测量。我们利用调节晶体温度扩展调谐区域,同时通过调谐抽运光频率实现 OPO 的连续调谐。

3. 实验装置

实验装置如图 3,主要由三部分组成:抽运光源、半整块(semimonolithic)光学参量振荡腔(OPO)及 CS_2 分子频率调制光谱系统。

作为 OPO 的抽运源,我们设计了一台 LD(Laser Diode)抽运的全固化 Nd:YVO₄/KTP 内腔倍频单频激光器,激光腔采用“ ∞ ”字环形腔,腔内插入单向器使激光器单向运转。最大单频绿光输出为 1.5W,输出

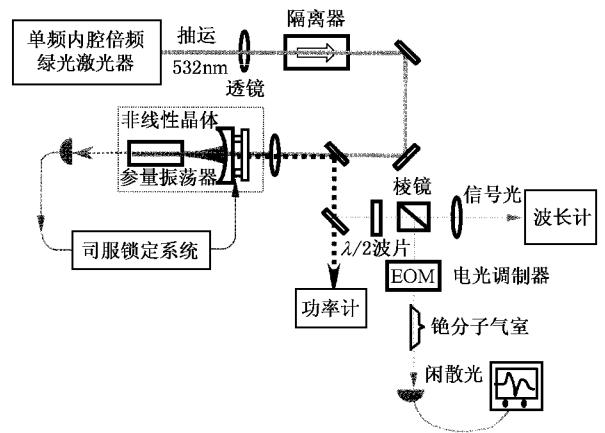


图3 实验装置

功率起伏小于 $\pm 1.5\%$ ^[15],自由运转情况下,输出光频率漂移小于 10MHz。激光腔腔长可由一压电陶瓷控制,扫描压电陶瓷电压,激光器输出频率可以连续调谐 5.6GHz 而不发生跳模。

为了降低内腔损耗、改善腔的稳定性,光学参量振荡腔采用图 1 所示半整体腔结构,由一个曲率半径为 20mm 的曲面镜 M_1 和一块尺寸为 2mm \times 5mm \times 7mm 的平-平 KTP 晶体组成,KTP 晶体采取 α 切割($\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$), α 切割的 KTP 晶体在 532nm 光抽运下可完成频率非简并参量下转换,常温下信号光与闲散光的波长分别为 1089nm 和 1041nm。晶体固定在四维调整架上,可以精确调整晶体方位,并放置在精密控温的控温炉中,控温精度 0.01 $^\circ\text{C}$ 。曲面镜 M_1 为输入、输出耦合镜,对下转换光输出耦合透射率为 4%,对 532nm 波长光增透以保证抽运光极大的腔线宽, M_1 放置在离晶体 14mm 处,固定在压电陶瓷上,为使 OPO 腔尽量稳定,输入输出耦合镜的压电陶瓷直接固定在 OPO 的支撑台上,不作调整。这样整个 OPO 腔由一个支撑 KTP 晶体的微调架调整,减小了腔的机械不稳定性。抽运光两次穿过非线性晶体,有效加长了非线性相互作用的长度。

实验采用边带锁定技术使 OPO 稳定地单模运转。用探测器 D_1 探测晶体双全反端漏出的微弱下转换光经混频后作为误差信号,与高压放大器、PZT 一起形成反馈控制回路,控制 OPO 腔长。OPO 下转换信号光和闲置光偏振非简并,调整半波片和棱镜光轴方位很容易把它们分开,用分辨率为 0.002nm 的波长计(coherent wavelength meter)监视下转换信号光的波长,同时监测闲散光,通过示波器观测 OPO 锁定情况。

利用频率调制光谱技术测量 CS_2 分子微弱吸收光谱. OPO 输出的闲散光 (idler) 通过电光调制晶体 (EOM) 进行相位调制, 经样品吸收后由快速响应探测器探测, 再用混频器检出调制频率处的有用信号, 由示波器记录或者直接用谱分析仪分析.

4. 结果分析

频率调制光谱是一种光学外差谱技术, 能够快速探测灵敏度达到光源噪声极限的微弱吸收谱信号. 通过以下简单分析可以得到频率调制光谱技术所能探测的最小吸收极限.

频率为 ω_c , 电场振幅为 A_0 的光场可表示为

$$E_0(t) = \frac{1}{2} \tilde{E}_0(t) + \text{c.c.}, \quad \tilde{E}_0(t) = A_0 e^{i\omega_c t},$$

由接收面积为 A 的探测器探测到的慢变包络光功率为

$$P_0(t) = A I_0(t) = A c \frac{A_0^2}{8\pi}.$$

采用频率调制光谱的方法测量弱吸收, 首先对光场加一频率为 Ω 的相位调制, 调制后的光场可以表示为

$$\tilde{E}_1(t) = A_0 \left\{ -\frac{\beta}{2} e^{i(\omega_c - \Omega)t} + e^{i\omega_c t} + \frac{\beta}{2} e^{i(\omega_c + \Omega)t} \right\}, \quad (7)$$

其中 $\beta \ll 1$ 为调制系数.

设吸收样品对三个频率成分光场的透射、吸收、及相位漂移量分别为 $T_j = e^{(-\delta_j - i\phi_j)}$, $\delta_j = \alpha_j L_s / 2$, 及 $\phi_j = i n_j L (\omega_c + \Omega) / c$ ($j = 0, \pm 1$, 分别对应频率分量 ω_c , $\omega_c \pm \Omega$; α_j , L_s 分别为样品吸收系数、长度). 经过 CS_2 分子样品的透射场光强为

$$I_2(t) = \frac{c A_0^2}{8\pi} e^{-2\delta_0} [1 + (\delta_{-1} - \delta_1) \beta \cos \Omega t + (\phi_1 + \phi_{-1} - 2\phi_0) \beta \sin \Omega t]. \quad (8)$$

探测器产生的光电流正比于 $I_2(t)$, 当 $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_{-1} \neq 0$ 或 $\Delta\phi = \phi_1 + \phi_{-1} - 2\phi_0 \neq 0$ 时, 光电流包含一个频率为 Ω 的拍频信号, 用通常相位敏感的检测方法可以检测到这个拍频信号.

考虑纯粹的吸收特性, 对弱吸收 $e^{-2\delta_0} \approx 1$ (7) 式简化为

$$I_2(t) = \frac{c A_0^2}{8\pi} [1 - \Delta\delta\beta \cos \Omega t] = P_0 [1 - \Delta\delta\beta \cos \Omega t]. \quad (9)$$

探测器产生的光电流信号为 $i(t) = \bar{i} + i_s(t) =$

$g e \eta \frac{P_0}{\hbar \omega_c} (1 - \Delta\delta\beta \cos \Omega t)$ (e 为电子电量, η 为探测器的量子效率, g 为电子学增益系数), 在谱仪上分析该信号交流部分, 分析频率为 Ω , 得到拍频信号方均根噪声功率为

$$\bar{i}_s^2 = \frac{1}{2} g^2 e^2 \eta^2 \left(\frac{P_0}{\hbar \omega_c} \right)^2 \Delta\delta^2 \beta^2,$$

假设光源为相干光, 散离噪声功率为

$$\bar{i}_N^2 = 2 e g i \Delta f = 2 e^2 g^2 \eta \frac{P_0}{\hbar \omega_c} \Delta f,$$

式中 Δf 为探测电路的带宽, 谱分析仪显示信号的信噪比为

$$\frac{S}{N} = \frac{\bar{i}_s^2}{\bar{i}_N^2} = \frac{\eta \Delta\delta^2 \beta^2 P_0}{4 \Delta f \hbar \omega_c}. \quad (10)$$

信噪比为 1 时, 给出最小可探测吸收极限, 有

$$\Delta\delta_{\min} = 2 \sqrt{\Delta f \hbar \omega_c / \eta \beta^2 P_0}. \quad (11)$$

实验中探测光波长为 1041nm 时, 功率 $P_0 = 7\text{mW}$, 调制系数 $\beta = 0.01$, 探测器量子效率 $\eta \approx 1$, 计算可知探测带宽 $\Delta f = 10\text{kHz}$ 时, 最小可探测极限为 4.2×10^{-5} , 探测带宽为 1Hz 时, 最小可探测极限为 4.2×10^{-7} .

OPO 扫描状态下可测得抽运阈值为 106mW, 仔细调节反馈回路中各参数, 使 OPO 稳定运转于单频状态. 在 1.7 倍阈值抽运功率情况下, OPO 锁定后下转换输出光功率为 72mW, 对应功率波动小于 3.5%.

实验观测了 OPO 在改变晶体温度时的调谐情况, 当 KTP 晶体温度改变 37°C (从 14°C 至 51°C) 时, 信号光 (signal) 波长从 1091.2nm 变化至 1088.2nm, 闲散光 (idler) 从波长 1039.8nm 变化至 1042.6nm, 覆盖波段 5.8nm. 在保持锁定情况下, 通过连续调谐激光器频率可以实现 OPO 输出频率的连续可调. 在抽运波长连续调谐 5.6GHz 时, 用扫描 F-P 腔可测得下转换输出波长连续调谐范围为 2.8GHz.

实验测定常温下 OPO 信号光与闲散光波长分别为 1089nm 和 1041nm, 由谱仪记录 CS_2 分子气室样品的频率调制谱线, 激光器由频率为 1Hz 的正弦波扫描电压调谐, 输出光光频连续调谐范围 3.2GHz, 下转换光调谐范围 1.6GHz. OPO 输出闲散光加一频率为 4MHz, 调制系数 $\beta = 0.013$ 的频率调制信号 (电光相位调制器为 New focus4004), 闲散光经过 CS_2 分子气室样品由探测器探测, 探测器交流信号由谱分析仪分析. 仔细调节 OPO 晶体温度, 我们观测温度

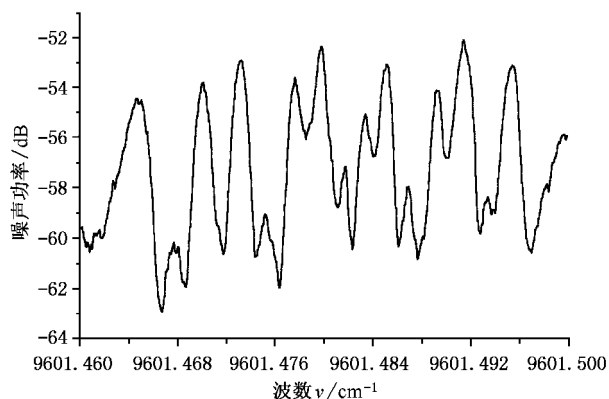


图 4 CS_2 分子频率调制吸收光谱(36°C)

为 36°C 的 CS_2 分子气室样品在 1041.506nm 附近的 Doppler 展宽的吸收信号,图 4 为谱分析仪记录的调制吸收谱,谱仪分析频率为 4MHz,分辨率带宽 10kHz,对应 OPO 输出波长变化 1.6GHz,可以看到

CS_2 分子在此波段的吸收线比较密,吸收信号信噪比为 7dB,可以推算出实验情况下 CS_2 分子气室样品与波长有关的功率损耗率为 9×10^{-5} ,此时采用直接探测的方法很难得到较为清晰的谱信号。

5. 结 论

以 LD 抽运的全固化单频稳频内腔倍频 Nd:YVO₄/KTP 激光器做抽运源,实现半整块 KTP 双谐振参量振荡器(DRO)的单频运转,并对其稳定性进行了分析.通过改变腔内 KTP 晶体的温度,OPO 输出波长调谐范围达 5.8nm,连续调谐抽运光的波长,实现了下转换光在 1041.506nm 波长附近 2.8GHz 连续调谐,并将其应用于 CS_2 分子频率调制吸收光谱,在铯分子气室温度为 36°C 时记录到清晰的调制谱线。

- [1] Breitenbach G, Schiller S and Mlynek J 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 2095.
- [2] Bode M, Lam P K, Freitag I, Tünnermann A, Bachor H A and Welling H 1998 *Opt. Commun.* **148** 117
- [3] Yang S T, Eckardt R C and Byer R L 1993 *Opt. Lett.* **18** 871
- [4] Gao J R, Cui F Y, Xue C Y, Xie C D and Peng K C 1998 *Opt. Lett.* **23** 870
- [5] Peng K C, Pan Q, Wang H, Zhang Y, Su H and Xie C D 1998 *Appl. Phys. B* **66** 755
- [6] Li Y M, Fan Q Y, Zhang K S, Xie C D and Peng K C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1492 (in Chinese)[李永民等 2001 物理学报 **50** 1492]
- [7] Peng K C et al 1993 *Acta Phys. Sin.* **42** 1079 (in Chinese) [彭堃堃等 1993 物理学报 **42** 1492]
- [8] Henderson A J, Padgett M J, Colville F G, Zhang J and Dunn M H 1995 *Opt. Commun.* **119** 256
- [9] Lee D and Wong N C 1992 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 1659
- [10] Wallmeroth K and Letterer R 1990 *Opt. Lett.* **15** 812
- [11] Arie A, Pastor P C, Pavone F S and Ingusio M 1998 *Opt. Commun.* **117** 78
- [12] Gibson G M, Dun M H and Padgett M J 1998 *Opt. Lett.* **23** 40
- [13] Debusschert T, Sizmann A, Giacobino E and Fabre C 1993 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 1670
- [14] Eckardt R C, Nabors C D, Kozlovsky W J and Byer R L 1991 *J. Opt. Soc. Am. B* **8** 646
- [15] Wang H B, Ma Y, Zhai Z H, Gao J R and Peng K C *Chin. J. Lasers* (in Chinese) to be published

Continuously tunable type-II optical parametric oscillator and its application in frequency modulation spectroscopy of Cs₂*^{*}

Wang Hai-Bo Zhai Ze-Hui Ma Yan Wang Shao-Kai Gao Jiang-Rui Xie Chang-De Peng Kun-Chi

(*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 20 August 2001; revised manuscript received 20 September 2001)

Abstract

Using the side-band frequency-locking technique, stable operation of cw OPO on single-frequency was achieved by type-II semimonolithic KTP crystal. The output wavelength of the OPO is temperature tuned over a range of 5.8nm. The 2.8GHz continuous frequency tuning was achieved by tuning of the pump laser frequency. Furthermore, the application of OPO in frequency modulation spectroscopy of Cs was demonstrated around 1041.506nm.

Keywords : cw OPO, single-frequency, continuously tunable, FM spectrum

PACC : 0765, 4250

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 69778015, 69837010) and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China.