

文章编号: 0258-7025(2004)03-0284-05

在 PPLN-OPO 中伴生四波混频的研究

王 涛^{1,2,3}, 姚建铨¹, 郁道银¹, 李喜福¹, 禹国俊¹, 王 鹏¹, 张百钢¹

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072; ² 河北工业大学机械学院, 天津 300130; ³ 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 提出了在周期极化 LiNbO₃-光学参量振荡(PPLN-OPO)中伴有四波混频(FWM)的发生, 论述了 PPLN-OPO 中的抽运光 λ_3 (1064 nm), 信号光 λ_1 (1500 nm), 闲频光 λ_2 (3660.55 nm), 信号光 λ_1 的倍频光 λ_4 (750 nm), 满足 FWM 的频率匹配与准相位匹配的条件, 初步建立了 PPLN-OPO-FWM 的过程理论体系, 进行了光学系统装置的实验, 理论分析与实验结论相吻合。

关键词 非线性光学; 周期极化 LiNbO₃; 光学参量振荡; 四波混频; 准相位匹配

中图分类号 O 437 文献标识码 A

Research on the Generation of FWM Going with PPLN-OPO

WANG Tao^{1,2,3}, YAO Jian-quan¹, YU Dao-yin¹,

LI Xi-fu¹, YU Guo-jun¹, WANG Pen¹, ZHANG Bai-gang¹,

¹Optoelectronics Information Science and Technology Lab, Institute of Lasers and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²College of Mechanism Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

³State key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract The generation of FWM going with PPLN-OPO was put forward for the first time. FWM frequency matching and quasi-phase matching conditions of bumping wave λ_3 (1064 nm), signal wave λ_1 (1500 nm) and idle wave λ_2 (3660.55 nm) in PPLN-OPO was discussed. The system of PPLN-OPO-FWM process was set up theoretically and the setting of optical system was realized experimentally. The conclusion of experiment was accorded with theoretical analysis, which is valuable for the study of PPLN, OPO and FWM in theory and practice.

Key words nonlinear optics; PPLN; OPO; FWM; QPM

1 引 言

在现代光学技术中, 周期极化 LiNbO₃-光学参量振荡(PPLN-OPO)在光通讯、大气研究、光化学、医学、非线性光学^[1]、光谱学、同位素分离、军事国防等^[2]许多研究领域内都有重要应用。本文提出了在 PPLN-OPO 中四波混频(FWM)的发生, 初步建立了 PPLN-OPO-FWM 的过程理论体系, 对实验得到的 750 nm 波长光谱谱线给出了解释与分析, 提出

并论述了波长光 λ_1 (1500 nm), λ_2 (3660.55 nm), λ_4 (750 nm)与抽运光 λ_3 (1064 nm)发生 FWM 的条件, 即频率匹配与准相位匹配, 与实验得出的光谱谱线图的结果吻合。

2 理论研究

用量子力学描述 FWM 如下^[3]: 一个或几个光波的光子被湮灭, 同时产生了不同频率的新光子, 且

收稿日期: 2003-05-09; 收到修改稿日期: 2003-07-17

基金项目: 华中科技大学激光技术国家重点实验室(2001)0104 号开放基金、国家自然科学基金(60278032, 60278001)、教育部南开大学和天津大学科技合作基金资助项目。

作者简介: 王 涛(1963—), 男, 天津大学精仪学院激光与光电子研究所博士后, 教授, 主要从事高功率激光器及光纤通讯技术研究。万方数据 @eyou.com

该过程中,净能量与动量守恒。我们认为在PPLN-OPO过程中,抽运光 λ_3 ,信号光 λ_1 ,闲频光 λ_2 ,信号光 λ_1 的倍频光 λ_4 共同参与了在PPLN中发生的FWM,使抽运光 λ_3 的一部分能量通过FWM转移给了 λ_4 光,形成了它的有效增益。

由极化强度 P 对于电场 E 的非线性关系可得出与FWM相关的 P_4 项表达式为^[3]

$$P_4 = \frac{3\epsilon_0}{4}\chi^{(3)}\{[|E_4|^2 + 2(|E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_3|^2)]E_4 + 2E_1E_2E_3\exp(i\theta_+) + 2E_1E_2E_3^*\exp(i\theta_-) + \dots\} \quad (1)$$

其中, ϵ_0 为真空中的介电常数, $\chi^{(3)}$ 为3阶电极化率,基于光的偏振效应, $\chi^{(3)}$ 是4阶张量。引入PPLN的超周期倒格矢,由于PPLN超晶格结构的超周期近似于入射光波长,故它将直接参与入射光波的波矢守恒,使有效非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 具有了超周期函数的数理意义,也就是说,它在 $\chi^{(3)}$ 中加入了一个空间周期调制函数,此时的 $\chi^{(3)}$ 可以用傅里叶级数表示为

$$\chi^{(3)}(z) = \chi^{(3)} \cdot \sum_{-\infty}^{+\infty} G_N \exp(-ik_N z) \quad (2)$$

其中 $N(=1,3,5,\dots)$ 为准相位匹配阶数,取决于PPLN的结构^[4]; k_N 为超周期倒格矢亦称为周期波矢

$$k_N = \frac{2\pi \cdot N}{\Lambda} \quad (3)$$

其中 Λ 为极化周期。不妨只考虑某一阶准相位匹配,则简化为

$$\chi_{\text{eff}}(z) = \chi_{\text{eff}} \cdot G_N \exp(-ik_N z) \quad (4)$$

因为其中高阶准相位匹配所引发的非线性效应现象虽很丰富但比较弱小也比较复杂,一阶准相位匹配已满足本文论点,故暂略高阶准相位匹配的影响。

由周期方波信号的傅里叶变换可知

$$G_N = \frac{2}{N\pi} \sin(N\pi D) \quad (5)$$

D 为反转畴的占空比系数,一般情况下 $D=0.5$,所以

$$\chi_{\text{eff}}(z) = \chi_{\text{eff}} \cdot \frac{2}{N\pi} \exp(-ik_N z) \quad (6)$$

将(6)式引入(1)式得

$$P_4 = \frac{3\epsilon_0}{2N\pi}\chi^{(3)}\{[|E_4|^2 + 2(|E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_3|^2)]E_4 + 2E_1E_2E_3\exp(i\theta_+) + 2E_1E_2E_3^*\exp(i\theta_-) + \dots\}$$

$$2E_1E_2E_3\exp(i\theta_+) + 2E_1E_2E_3^*\exp(i\theta_-) + \dots\} \quad (7)$$

$$\text{式中 } \theta_+^A = (k_3 + k_1 + k_2 - k_4 - k_N)z - (\omega_3 + \omega_1 + \omega_2 - \omega_4)t \quad (8)$$

$$\theta_-^A = (k_3 + k_1 - k_2 - k_4 - k_N)z - (\omega_3 + \omega_1 - \omega_2 - \omega_4)t \quad (9)$$

其中 θ_+^A, θ_-^A 为 E_4 与 P_4 之间的相对相位。方程(7)中正比于 E_4 的项分别对应于自相位调制(SPM)与交叉相位调制效应^[3],余下的项对应于FWM。其中哪项在参量耦合中发生作用,取决于 θ_+^A, θ_-^A 。发生显著的FWM的条件是频率及波矢之间的匹配,即 $\Delta k=0$,波矢的匹配亦称为相位匹配,由于引入了PPLN的 k_N ,则称为准相位匹配。

由式(8),(9)得知 k_N 参与了波矢之间的匹配,而由于PPLN仅仅是介电体超晶格结构而不是光波,故它不参与频率之间的匹配,即它不参与光频率的能量守恒。方程(7)中第三项对应不同频率 ω_1 和 ω_3 的两光子的湮灭,同时产生新的 ω_2 和 ω_4 光子,即频率匹配

$$\omega_3 + \omega_1 = \omega_2 + \omega_4 \quad (10)$$

波长匹配表达式

$$\frac{1}{\lambda_3} + \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_4} \quad (11)$$

准相位匹配条件为 $\Delta k=0$,即

$$n_3\omega_3 + n_1\omega_1 - n_4\omega_4 - n_2\omega_2 - N\omega_\Lambda = 0 \quad (12)$$

对于光波长: $\lambda_1(1500\text{ nm})$, $\lambda_2(3660.55\text{ nm})$, $\lambda_4(750\text{ nm})$, $\lambda_3(1064\text{ nm})$ 完全满足式(11),说明这四种光波满足波长(频率)匹配条件,即满足能量守恒,由 λ_1 与 λ_3 波长光子湮灭,产生 λ_4 和 λ_2 波长光子。其中 $\omega_\Lambda = 2\pi \cdot c/\Lambda$ 为 k_N 对应的频率表达式。

实验结果表明PPLN-OPO可实现正常运转^[5],即其满足准相位匹配 $\Delta k_p = 0$

$$n_3\omega_3 - n_2\omega_2 - n_1\omega_1 - N_c\omega_\Lambda = 0 \quad (13)$$

为证明式(12)的成立,不妨设其成立并与式(13)联立解之。

解法1:以 $N_f\omega_\Lambda$ 作为独立项直接参与准相位匹配,即可令式(13)减去式(12)得

$$2n_1\omega_1 - n_4\omega_4 = (N_f - N_c)\omega_\Lambda \quad (14)$$

有 $N_b = N_f - N_c$,其中 N_b, N_f, N_c 分别为在倍频,FWM,OPO效应中PPLN的超周期倒格矢的等效折射率。由式(14)可得

$$2n_1\omega_1 - n_4\omega_4 = N_b\omega_\Lambda \quad (15)$$

式(15)是 λ_1 的倍频准相位匹配表达式,由于实验结果证实了倍频光 $\lambda_4 = 750\text{ nm}$ (图3)存在,说明发生

了倍频过程,是准相位匹配的,即式(15)成立,于是,连带证明式(12)成立,即满足准相位匹配,所以产生 FWM,与实验结果吻合。反过来说,若式(15)不成立,那么不会产生倍频光 λ_4 ,于是实验中观测到的 λ_4 则源于他处,那么它最有可能来自 FWM,所以说在上述过程中应该产生 FWM。

解法 2:将 PPLN 准相位匹配项 $N_f\omega_A, N_c\omega_A$ 转化为对“折射率”的影响,应该说它对于同一频率的光波,其影响因子是相同的,于是将式(12), (13) 转化为

$$n'_3\omega_3 + n'_1\omega_1 - n'_4\omega_4 - n'_2\omega_2 = 0 \quad (16)$$

$$n'_3\omega_3 - n'_2\omega_2 - n'_1\omega_1 = 0 \quad (17)$$

$$\text{其中 } n'_j = q_j n_j, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (18)$$

这里, q_j 为等效于 PPLN 的超晶格结构特性对折射率 n_j 的影响因子, n'_j 为等效于 PPLN 的超晶格结构对 ω_j 的折射率,对应于 PPLN 的色散效应,也就是光波与 PPLN 介质的束缚电子相互作用时,介质的响应通常与光波频率 ω 有关,此特性即为色散^[3],它表明了折射率 n 对频率的依赖关系,当然 PPLN 的特性直接对折射率 n 产生影响^[4],所以 q_j 符合 PPLN 的色散效应的物理意义,它可以经实测的色散曲线^[3]推算得出,也可由塞尔麦耶尔方程^[3]近似得出,于是对于并非电磁波的 PPLN 的超晶格结构直接参加改变光波的折射率 n 似更为符合光传播的物理意义。

式(16)减去式(17)得

$$2n'_1\omega_1 - n'_4\omega_4 = 0 \quad (19)$$

式(19)是信号光 λ_1 的倍频“准”相位匹配表达式,因为实验得到了 λ_4 ,它证明发生了倍频效应,即它是准相位匹配的,亦即式(19)成立,于是连带证明式(12)成立,即满足准相位匹配,所以产生 FWM,与实验结果吻合。

PPLN-OPO 的有效运转产生信号光 λ_1 , 闲频光 λ_2 , 是在 PPLN 中发生 FWM 的前提条件;而信号光 λ_1 的倍频光 $\lambda_4 = 750 \text{ nm}$ 与闲频光 λ_2 可以作为种子光参与引发 FWM 的发生,其源生光是 λ_3 与 λ_1 , 生成光是 λ_4 与 λ_2 , 即 FWM 中抽运光 λ_3 与信号光 λ_1 的两个光子被湮灭,同时产生了 λ_4 与 λ_2 的新光子,上述全部过程的良性增益循环形成了 λ_4 的增益放大而得到较高增益输出。

3 参量增益研究

FWM 中,数据率 λ_4 的弱信号同抽运光波 λ_3 同

在 PPLN 中,此信号光将被放大,这种放大的增益称为参量增益。根据四波耦合波方程推导出参量增益 g 为^[3]

$$g = [(\gamma p_0 r)^2 - (\kappa/2)^2]^{1/2} \quad (20)$$

其中参量 r 和 p_0 由下两式定义

$$r = 2(p_1 p_2)^{1/2} / p_0,$$

$$p_0 = p_1 + p_2$$

p_0 为总入射功率。

准相位匹配 $\Delta k = 0$ 时

$$g = \frac{p_0 \cdot \tilde{n} \cdot \lambda}{A_a} (r^2 - 1)^{1/2} \quad (21)$$

式中 \tilde{n} 为非线性系数(非线性折射率系数), $\tilde{n} = 3\chi^{(3)}/8n$, 其中 n 为线性折射率, A_a 为晶体的有效通光截面。由(21)式知,参与 FWM 的抽运光的总功率越大,增益越大,其他影响因素与结构、材料等系统条件有关。另外,关于 g 的推导过程中采用了光学、数学等假设,其结果与实际有偏差,但亦有参考价值。从实验结果中得知,抽运功率越大,参量光输出增益越高,直接证实了上述观点。

但 g 值的极值点对应于 $\Delta k = \gamma(p_3 + p_1)$, 这是因为通常情况下,谐振腔的结构、腔长等形式决定了稳定振荡的模式。在 $\Delta k = 0$ 的条件下,与之对应的 ω_1 与 ω_2 却不一定是谐振腔的结构等形式所决定的稳定振荡的模式,即“结构、材料等系统条件”对 g 的影响有时也不可忽视。特别是 $\chi^{(3)}$ 只考虑了一阶准相位匹配,加之 PPLN 所引发的非线性效应现象还很丰富,因此实际振荡模与准相位匹配时的 ω_1 与 ω_2 不同甚至差距很大,此时引起增益变化,而使输出漂移。实践中, PPLN-OPO 与 FWM 的实验光学系统,从设计、研制、安装与调试、测试等工作量很大,特别是调试过程复杂、精细,所有这些印证了上述说法。

4 实验研究

4.1 实验装置

系统实验装置如图 1 所示,主要由 LD 抽运源, 1064 nm Nd:YVO₄ 激光器,耦合系统, PPLN 及其加热与温度控制器构成。

它利用 LD 输出的 808 nm 波长光,经声光调 Q, 抽运 Nd:YVO₄ 激光器输出 1064 nm 激光,再抽运周期为 29 μm 的 PPLN 形成 OPO 输出,同时伴生 FWM。

4.2 实验结果与分析

实验结果如下,在 PPLN 晶体工作温度为

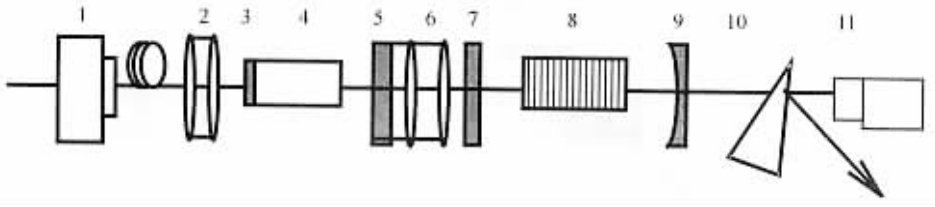


图1 PPLN-OPO-FWM 实验光路

1:808 nm LD;2,6:耦合系统;3:声光 Q 开关;4:Nd:YVO₄ 晶体;5:1064 nm 输出镜;7:PPLN-OPO 输入镜;
8:PPLN 及其加热与温度控制系统;9:PPLN-OPO 输出耦合镜;10:分光棱镜或滤光片;11:光谱仪(Agilent-86142B)

Fig.1 Schematic of PPLN-OPO-FWM

1: 808 nm LD; 2,6: coupler system; 3: A-O Q-switch; 4: Nd:YVO₄ crystal; 5: 1064 nm output mirror; 7: PPLN-OPO input mirror; 8: PPLN heating and temperature controlling system; 9: PPLN-OPO output coupler mirror; 10: splitter beam prism or filter; 11: spectroscopy (Agilent-86142B)

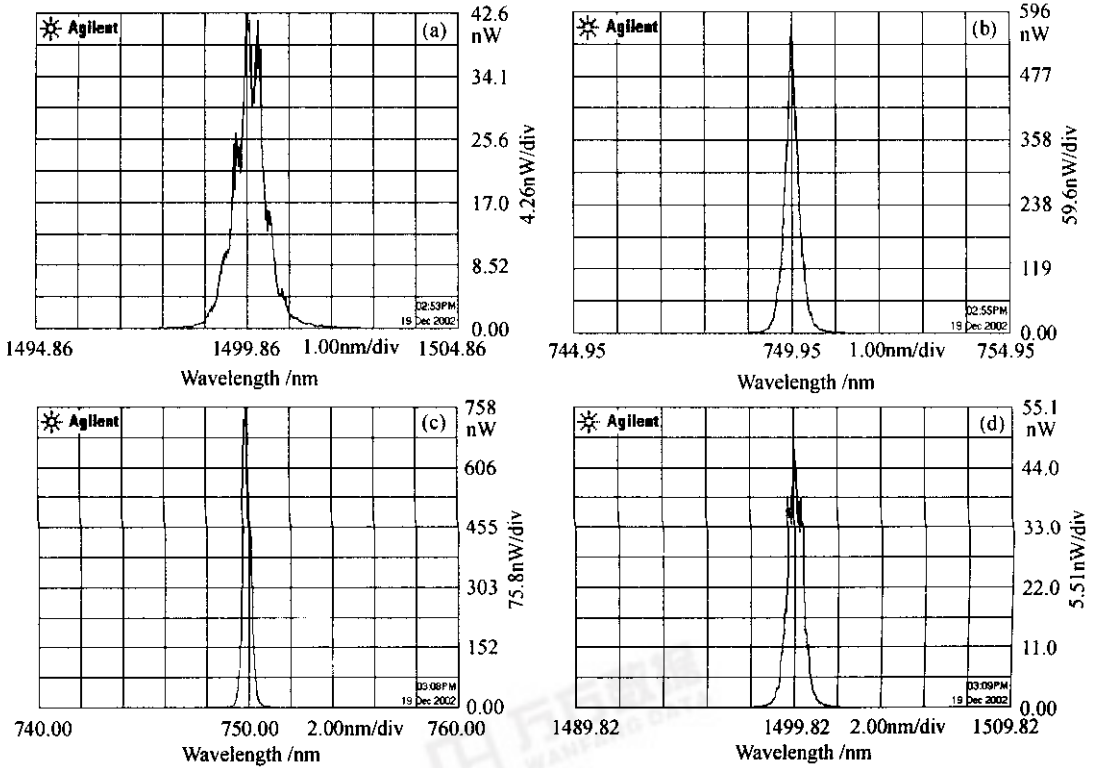


图2 1500 nm(a),750 nm(b)和 750 nm(c),1500 nm(d)的光谱线

Fig.2 Spectrogram of 1500 nm (a), 750 nm (b) and 750 nm (c), 1500 nm (d)

140℃时,在光谱仪上观测到了 $\lambda_1 = 1500 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 1064 \text{ nm}$, $\lambda_4 = 750 \text{ nm}$,见图 2(a)~(d),关于闲频光波长 $\lambda_2 = 3660.55 \text{ nm}$,由闲频光与抽运光的和频光波长 $\lambda_7 (824.38 \text{ nm})$ 的产生来证实它的存在,见图 3,其波长表达式为 $\lambda_7 = \lambda_3 + \lambda_2$;结果表明,PPLN-OPO 系统运转起来产生参量光 λ_1 与 λ_2 ,它们与抽运光 λ_3, λ_4 成为 FWM 的源生光,引发了 FWM 的发生。另外其他被观测到的光波还有: $\lambda_5 = 532 \text{ nm}$, $\lambda_6 = 622.46 \text{ nm}$, $\lambda_7 = 824.38 \text{ nm}$, $\lambda_8 = 439.91 \text{ nm}$,其中 λ_5 为 λ_3 的二倍频光, λ_6 为 λ_3 与 λ_1 的和频光,

λ_7 为 λ_3 与 λ_2 的和频光, λ_8 为 λ_3 与 λ_4 的和频光,与理论结果吻合。在同一实验过程中同一工况下,直接用光谱仪接收的光谱谱线图进行比较,直观、相对性好、比照准,极有助于理论分析及研究,而光波实际功率还要高一些。设定光谱仪测试“档位”分别为 1.00 nm/div, 2.00 nm/div,测定 750 nm 及 1500 nm 的光谱谱线分别如图 2(a)~(d),750 nm 及 1500 nm 谱线图峰值功率分别为 580 nW 与 42.6 nW,758 nW 与 47.6 nW;得知 750 nm 波长光谱线峰值功率比较高。在 FWM 中,信号光 λ_1 已经作为

抽运光,它与源抽运光 λ_3 一同成为 FWM 的两个抽运光源经 FWM 生成新光子 λ_4 与 λ_2 ,这一过程消耗了一部分信号光 λ_1 ,而信号光 λ_1 的倍频产生 λ_4 的过程也消耗了一部分信号光 λ_1 ,因此, λ_1 被削弱了, λ_4 被放大了, λ_4 的功率峰值比较高;当然, λ_1 直接可由倍频产生,但其转换效率最高不过 50%,而 λ_1 的光谱线图 2(a)峰值功率为 42.6 nW,故 λ_4 光谱线图 2(b)的峰值功率 580 nW 中高出的部分为非倍频所产生,它源于 FWM,与前述理论分析吻合。

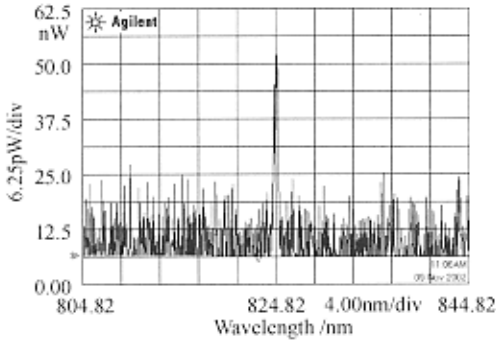


图 3 824.38 nm 光谱线

Fig. 3 Spectrogram at 824.82 nm in 4.00 nm/div

下面从光子与能量的角度考察 PPLN-OPO 与 FWM 的参量过程,按能量守恒^[6]有

$$p_{\lambda_3} = p_{\lambda_1} + p_{\lambda_2} \tag{22}$$

$$\dot{p}_{\lambda_1} = 2\dot{p}_{\lambda_4} \tag{23}$$

$$\ddot{p}_{\lambda_3} + \ddot{p}_{\lambda_1} = \ddot{p}_{\lambda_2} + \ddot{p}_{\lambda_4} \tag{24}$$

式(22), (23), (24)分别为 OPO, 倍频, FWM 的能量守恒表达式, p_{λ_j} 代表波长 λ_j 的能量(参与参量过程的能量)。用光谱仪测得数据, λ_1 光波的能量 p_{λ_1} 为 188 nW, λ_4 光波的总能量 \hat{p}_{λ_4} 为 276 nW, 这里 \hat{p}_{λ_4} 为

$$\hat{p}_{\lambda_4} = \hat{p}_{\lambda_4} + \ddot{p}_{\lambda_4} \tag{25}$$

根据式(22)~(25)推算 FWM 消耗了 λ_1 的总能量的 1/3。这一过程一方面消耗了 λ_1 的输出能量,削弱了 PPLN-OPO 信号光的输出功率,另一方面,对于产生波长 750 nm 光波有着重要价值。

在此全部非线性频率变换过程中, PPLN-OPO 的有效运转产生信号光、闲频光,而信号光的倍频光 $\lambda_4 = 750$ nm 与闲频光作为种子光参与引发 FWM,使 $\lambda_4 = 750$ nm 得到增益输出,如此良性增益循环形成了 λ_4 的相对较高增益放大。

参 考 文 献

- 1 Yao Jianquan. Nonlinear Optical Frequency Transformation and Laser Tuning Technology [M]. Beijing: Science Press, 1995. 109~139
姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 109~139
- 2 Lan Xinju, Yao Jianquan, An Yuying. Laser Technology [M]. Changsa: Hunan Scientific Press, 1979. 241~250
蓝信钜, 姚建铨, 安毓英. 激光技术[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1979. 241~250
- 3 G. P. Agrawal write, Hu Guojing, Huang Cao interpret. Nonlinear Fiber Optics [M]. Tianjin: Tianjin University Publishing Company, 1992. 239~254
G. P. Agrawal 著, 胡国锋, 黄超译. 非线性光纤光学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1993. 239~254
- 4 Liang Xiaoyan, Hou Wei, Lü Junhua *et al.*. Low-threshold and wide tunable PPLN optical parametrical 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 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1):10~12
- 5 Wang Tao. Research on 660 nm laser, PPLN-OPO-four-wave mixing, and the factors on fiber Raman amplify 660 nm [D]. Dissertation for Doctoral Degree of Tianjin University, 2003, **1**: 45~107
王涛. 660 nm 激光器, PPLN-OPO-四波混频及光纤拉曼放大因素的研究[D]. 天津大学博士学位论文, 2003, **1**:45~107
- 6 A. Beicala write, Zhu Yudong interpret. *Optic New Look* [M]. Beijing: Beijing Scientific Press, 1981. 114~142
A. 贝卡拉著, 朱裕栋译. 光学的新面貌[M]. 北京: 科学出版社, 1981. 114~142