

文章编号:1001-5078(2007)07-0625-04

# 准相位匹配光学参量产生器的理论与数值计算

刁述妍<sup>1,2</sup>

(1. 临沂师范学院物理系, 山东 临沂 276005; 2. 郑州大学河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450052)

**摘 要:** 光学参量产生过程中, 必然存在共线和非共线光波相互作用。分析了共线和非共线光学参量产生器的准相位匹配条件, 得出满足准相位匹配条件的光偏折角。通过对光学参量产生器增益的分析和数值计算, 得出光学参量产生器输出光增益与相位失配关系曲线。推导了在允许相位失配范围内谱线宽度表达式。通过数值计算, 得到谱线宽度与输出光波长关系曲线。所得结果对产生高增益、高转换效率、窄线宽光学参量产生器的设计、制作有一定的指导意义。

**关键词:** 光学参量产生器; 准相位匹配; 相位失配; 谱线宽度

**中图分类号:** TN248.1

**文献标识码:** A

## The Investigation of Quasi-Phase-Matched Optical Parametric Generator

DIAO Shu-yan<sup>1,2</sup>

(1. Department of Physics, Linyi Normal University, Linyi 276005; 2. Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electronics Information Technology of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** It's unavoidable that collinear and noncollinear interactions in the process of optical parametric generator. The quasi-phase-matched conditions of collinear and noncollinear optical parametric generator are analyzed and the deflection angle is achieved. The curves of the dependence of output gain on phase-mismatching are obtained by analyzing and calculating the gain of optical parametric generator. The signal spectra width is worked out in the range of phase-mismatching and the curve of signal bandwidth along with the signal wavelength is obtained by numerical calculation. All these findings bear certain guiding significance to the production of the high-quality optical parametric generator with high gain, high conversion efficiency and narrow bandwidth.

**Key words:** optical parametric generator; quasi-phase-matching; phase-mismatching; spectra width

### 1 引言

光学参量产生器(OPG)利用非线性晶体的混频特性实现光学频率变换, 能够将单一频率的激光转换为可调谐相干光的输出, 其结构简单, 调谐范围宽, 适于小型化和固体化, 在激光光谱学、激光光化学、激光同位素分离、空气气体检测、远程遥感、光通讯等领域有广泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>。在非线性光学频率变换过程中, 由于色散效应, 折射率随频率变化, 耦合波之间产生相位失配, 使转换效率降低。可以采取两种方法获得高转换效率。一种是利用晶体的双折射特性补偿晶体的色散效应, 实现相位匹配, 即

双折射相位匹配(BPM)。另一种是通过周期性的改变非线性晶体的自发极化方向, 补偿色散效应造成的波矢失配, 实现相位匹配, 即准相位匹配技术(QPM)<sup>[3]</sup>。准相位匹配与传统相位匹配技术相比有独特的优越性。准相位匹配技术避免了空间 walk-off 效应, 理论上能够利用晶体的整个透光范围, 利用晶

**基金项目:** 河南省重点科技攻关计划项目基金(0223024900)。

**作者简介:** 刁述妍(1965-), 女, 临沂师范学院副教授, 郑州大学博士生, 从事全固态激光技术及非线性光学频率变换的研究。E-mail: dsyzxy@163.com

**收稿日期:** 2007-01-16

体的最大非线性系数,可以采取多种调谐方式,非线性转换效率高。1962年,Armstrong等人<sup>[4]</sup>首次提出了利用非线性极化率在一维空间上周期性调制实现相位匹配的方法,即准相位匹配技术,但由于受晶体制作工艺的限制,准相位匹配技术只停留在理论阶段,直到20世纪90年代,随着周期极化晶体制作工艺的成熟,QPM技术得到了广泛应用<sup>[5-7]</sup>。

有关准相位匹配光学参量产生器的分析和实验大多是三波共线的特殊情况。光学参量产生器由于没有腔镜的限制,三波混频过程中通常是非共线的,只有在晶体调节非常精确的情况下才能实现共线相位匹配。再者,光学参量产生器的阈值高,需要高的泵浦功率,随着泵浦功率的提高,泵浦光的输出模式变差,即 $M^2$ 变大,泵浦光谱线变宽,势必产生非共线相互作用。另外,在通过角度调谐实现光参量产生过程中,也存在非共线相互作用的情况。所以,在准相位匹配光学参量产生器中,非共线相互作用普遍存在。本文主要分析了共线和非共线光学参量产生过程的准相位匹配条件,得出满足准相位匹配条件的光偏折角。通过对光学参量产生器增益的分析、计算,得出在不同的泵浦功率和不同的晶体长度时,光学参量产生器增益与相位失配关系曲线。当相位失配为零时,增益最大,在允许相位失配范围内,最小增益约为最大增益的40%。通过公式推导,得到在允许相位失配范围内谱线宽度表达式,并通过数值计算得到谱线宽度随输出光波长的变化曲线,在简并点附近输出光线宽显著增大,而在1500~1900nm范围内输出光线宽很窄,只有几纳米。所得结果对产生高增益、高转换效率、窄线宽光学参量产生器的设计、制作有一定的指导意义。

## 2 理论分析

### 2.1 共线、非共线相位匹配条件

图1为周期极化晶体QPM原理示意图, $\Lambda$ 为晶体的极化周期,晶体沿 $z$ 轴方向极化。在非线性频率变化过程中,三波相互作用QPM的相位失配为:

$$\Delta k = k_3 - k_2 - k_1 - k_m \quad (1)$$

式中, $k_m$ 为周期波矢,沿 $x$ 方向,是极化周期引入的参数。 $m(=1,3,5,\dots)$ 为准相位匹配阶数,如 $m=1$ ,为一阶准相位匹配。在非线性频率变换过程中,三波互作用过程满足能量守恒关系:

$$\omega_p(T) = \omega_s(T) + \omega_i(T) \quad (2)$$

式中, $\omega_p(T)$ , $\omega_s(T)$ 和 $\omega_i(T)$ 分别为泵浦光、信号光和空闲光的角频率。不论共线相互作用还是非共线相互作用,为了获得较高的转换效率,参量互作用过

程必须满足相位匹配条件。实现一阶共线准相位匹配条件为 $\Delta k=0$ ,即:

$$n(\omega_p, T)\omega_p - n(\omega_s, T)\omega_s - n(\omega_i, T)\omega_i - \omega_\Lambda(T) = 0 \quad (3)$$

式中, $n(\omega_p, T)$ , $n(\omega_s, T)$ 和 $n(\omega_i, T)$ 分别为温度为 $T$ 时泵浦光、信号光和空闲光的折射率,由Sellmeier方程决定<sup>[8]</sup>。 $\omega_\Lambda(T) = 2\pi c/\Lambda(T)$ , $\Lambda(T)$ 是温度为 $T$ 时晶体的极化周期。

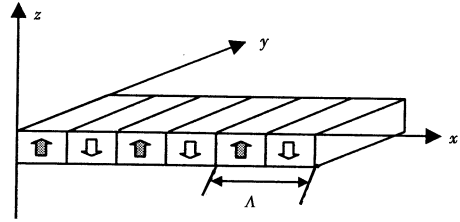


图1 周期极化晶体 QPM 原理示意图

一阶非共线准相位匹配相互作用光波波矢,如图2所示。泵浦光沿与晶体表面垂直的方向即 $x$ 方向入射,泵浦光波矢与晶体周期波矢方向一致,信号光与空闲光与周期波矢方向的夹角分别为 $\alpha$ 和 $\beta$ ,实现准相位匹配的条件为 $\Delta k=0$ ,即:

$$\begin{cases} n_p(\omega_p, T) \cdot \omega_p = n_s(\omega_s, T) \cdot \omega_s \cdot \cos\alpha + n_i(\omega_i, T) \cdot \omega_i \cdot \cos\beta + \frac{2\pi c}{\Lambda} \\ n_s(\omega_s, T) \cdot \omega_s \cdot \sin\alpha = n_i(\omega_i, T) \cdot \omega_i \cdot \sin\beta \end{cases} \quad (4)$$

由公式(4)可解得 $\alpha$ 为:

$$\cos\alpha = \frac{n_s^2 \omega_s^2 - n_i^2 \omega_i^2 + (n_p \omega_p - \frac{2\pi c}{\Lambda})^2}{2n_s \omega_s (n_p \omega_p - \frac{2\pi c}{\Lambda})} \quad (5)$$

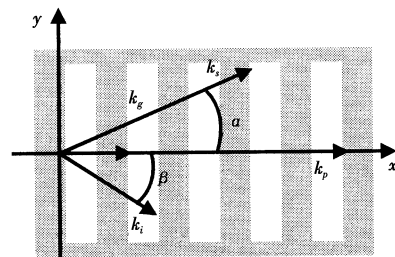


图2 泵浦光垂直晶体表面入射共线和非共线相互作用结构示意图

从图中可以看出,对于沿 $x$ 轴方向传输的泵浦光,一对共轴的信号光和空闲光与多对非共轴的信号光和空闲光都满足准相位匹配条件,在三波不共线的情况下,凡是符合式(5)的信号光都满足准相位匹配条件,输出光增益达到最大。

### 2.2 输出信号光谱线宽度

三波互作用过程中,光学参量产生器的增益是由光波在非线性晶体中的能量耦合作用提供的,满足准相位匹配条件时,光学参量产生器的增益达到

最大。QPM-OPG 信号光单程增益为<sup>[9]</sup>:

$$G \approx \frac{2\omega_s \omega_i d_0^2 I_p}{n(\omega_s) n(\omega_i) n(\omega_p) \varepsilon_0 c^3} L^2 \left[ \frac{\sin(\frac{\Delta k L}{2})}{\frac{\Delta k L}{2}} \right]^2 \quad (6)$$

光参量产生器的增益与相互作用光波波长、晶体的非线性系数、泵浦光强度、晶体长度和相位失配有关。在泵浦光足够强、非线性晶体足够长的情况下,输出光的中心波长由准相位匹配条件  $\Delta k = 0$  决定,此时可获得最大增益;当产生相位失配时 ( $\Delta k \neq 0$ ),增益减小,输出谱线加宽,谱线的宽度由允许相位失配条件决定,允许相位失配条件为  $|\Delta k L| \leq \pi$ 。在不同的泵浦光强和不同的晶体长度时,OPG 增益与相位失配关系曲线如图 3 和图 4 所示。从图中可看出,泵浦光越强、晶体越长增益越高,但实际应用中,需要选择适当的泵浦光强和晶体长度。因为随着泵浦光的增强,泵浦光模式变差,线宽增加,相位失配增大,增益减小,同时,后向波增强,转换效率降低。如果增加晶体长度,但非共线相互作用长度不变,增加的晶体长度不能参与有效的光波耦合反而使光束发散,增大损耗,转换效率降低。从图中还可看出,当相位失配为零时,增益最大,随着相位失配  $\Delta k$  的增大,增益逐渐减小,在允许相位失配条件内,最小增益是最大增益的  $4/\pi^2$  倍(约 40%)。

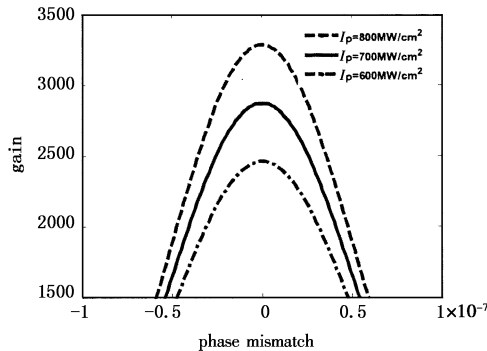


图3 泵浦光强分别为  $800 \text{ MW/cm}^2$ ,  $700 \text{ MW/cm}^2$  和  $600 \text{ MW/cm}^2$  信号光增益与相位失配的关系

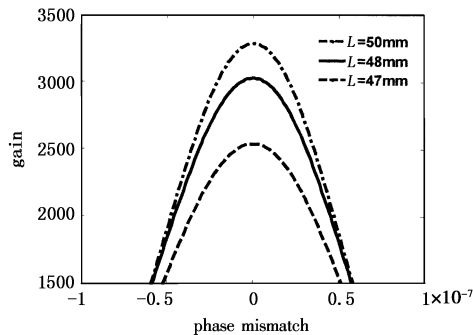


图4 晶体长度分别为 50mm, 48mm 和 47mm 信号光增益与相位失配的关系

下面推导共线情况下的谱线宽度。由共线相互作用准相位匹配公式:

$$\Delta k = k_p - k_s - k_i - k_m \quad (7)$$

在允许相位失配范围内,假设信号光角频率变化为  $\Delta\omega_p$ ,空闲光角频率变化  $\Delta\omega_i$ ,非线性频率变换过程中,能量守恒且泵浦光波长不变,则  $\Delta\omega_p = \Delta\omega_i = \Delta\omega$ ,式(9)对角频率求微分:

$$d(\Delta k) = \frac{dk_s}{d\omega} \cdot \Delta\omega - \frac{dk_i}{d\omega} \cdot \Delta\omega = \left( \frac{dk_s}{d\omega} - \frac{dk_i}{d\omega} \right) \cdot \Delta\omega \quad (8)$$

信号光波矢  $k_s = \frac{n(\omega_s)\omega_s}{c} = \frac{2\pi n(\omega_s)}{\lambda_s}$ ,对其求微分得:

$$\begin{aligned} \frac{dk_s}{d\omega_s} &= \frac{1}{c} \left( n(\omega_s) + \omega_s \cdot \frac{dn(\omega_s)}{d\omega_s} \right) \\ \frac{dk_i}{d\omega_i} &= \frac{1}{c} \left( n(\omega_i) + \omega_i \cdot \frac{dn(\omega_i)}{d\omega_i} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

把式(9)代入式(8)得:

$$d(\Delta k) = \frac{1}{c} \left[ \left( n(\omega_s) + \omega_s \cdot \frac{dn(\omega_s)}{d\omega_s} \right) - \left( n(\omega_i) + \omega_i \cdot \frac{dn(\omega_i)}{d\omega_i} \right) \right] \cdot \Delta\omega$$

由允许失配条件  $d(\Delta k) = |\pi/L|$  代入上式,得:

$$|\Delta\omega| = \frac{\pi c/L}{\left| \left[ n(\omega_s) + \frac{dn(\omega_s)}{d\omega_s} \cdot \omega_s \right] - \left[ n(\omega_i) + \frac{dn(\omega_i)}{d\omega_i} \cdot \omega_i \right] \right|} \quad (10)$$

或

$$|\Delta\lambda| = \frac{\lambda_s^2/L}{\left| \left[ n(\lambda_s) + \frac{dn(\lambda_s)}{d\lambda_s} \cdot \lambda_s \right] - \left[ n(\lambda_i) + \frac{dn(\lambda_i)}{d\lambda_i} \cdot \lambda_i \right] \right|} \quad (11)$$

由公式(11)和 Sellmeier 方程,通过数值计算,得到信号光谱线宽度与信号光波长变化关系曲线,如图 5 所示。从图中可以看出,在允许相位失配范围内,信号光谱线很窄,在简并点 (2128nm) 附近谱线加宽。当泵浦光波长为 1064nm,非线性晶体为掺氧化镁周期极化铌酸锂晶体,晶体温度为  $100^\circ\text{C}$ ,晶体长度为 50mm,晶体周期为  $30.7 \mu\text{m}$ ,相位失配为零时,信号光中心波长为 1650nm,在相位失配范围内,信

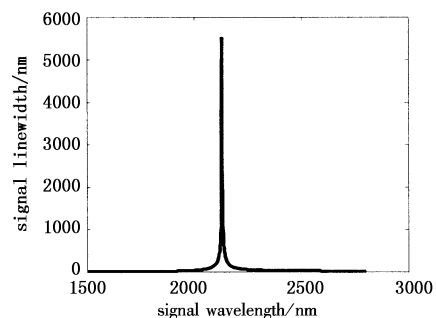


图5 信号光谱宽度随信号光波长的变化曲线

号光线宽为 9.5nm。而当信号光中心波长为 2000nm 时,信号光线宽约为 100nm。在实际应用中,可以根据所得结果合理地选择波长和计算谱线宽度以适应不同的应用。

### 3 结 论

本文主要分析了共线和非共线光学参量产生过程的准相位匹配条件,得出满足准相位匹配条件的光偏角,凡是满足该偏折角的参量光都满足准相位匹配条件,可以获得高增益。通过对光学参量产生器增益的分析、计算,得到在不同的泵浦光强和不同的晶体长度时,光学参量产生器增益与相位失配关系曲线。当相位失配为零时,增益最大,随着相位失配的增大,输出光的增益逐渐减小,在允许相位失配范围内,最小增益约为最大增益的 40%。通过公式推导,得到在允许相位失配范围内谱线宽度表达式,并通过数值计算得到谱线宽度随输出光波长的变化曲线。所得结果对产生高增益、高转换效率、窄线宽的光学参量产生器具有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] An-Chung Chiang, Tsong-Dong Wang, Yen-Yin Lin, et al. Pulsed optical parametric generation, amplification, and oscillation in monolithic periodically poled lithium niobate crystals[J]. IEEE Journal of Quantumelectronics, 2004, 40(6): 791 - 799.
- [2] Bäder U, Mattern T, Bauer T, et al. Pulsed nanosecond optical parametric generator based on periodically poled lithium niobate[J]. Opt. Commun., 2003, 217: 375 - 380.
- [3] 姚建铨. 非线性光学频率变换及准相位匹配技术[J]. 人工晶体学报, 2002, 31(3): 201 - 207.
- [4] Armstrong J A, Bloembergen B, Ducuing J, et al. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric[J]. J. Phys. Rev., 1962, 127(6): 1918 - 1939.
- [5] L E Myers, G D Miller, R C Eckardt, et al. Quasi-phase-matched 1.064 $\mu$ m pumped optical parametric oscillator in bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub>[J]. Opt. Lett., 1995, 20(1): 52 - 54.
- [6] Zhang Bai-gang, Yao Jian-quan, Lu Yang, et al. High-average-power nanosecond quasi-phase-matched single-pass optical parametric generator in periodically poled lithium niobate[J]. Chin. Phys. Lett., 2005, 22(7): 1691 - 1693.
- [7] L E Myers, R C Eckardt, M M Fejer, et al. Multigrating quasi-phase-matched optical parametric oscillator in periodically poled LiNbO<sub>3</sub>[J]. Opt. Lett., 1996, 21(8): 591 - 593.
- [8] Yao Jian-Quan, YU Yi-Zhong, et al. Nearly-noncritical phase matching in MgO:LiNbO<sub>3</sub> optical parametric oscillators[J]. Chin. Phys. Lett., 2001, 18(9): 1214 - 1217.
- [9] L E Myers, R C Eckardt, M M Fejer, et al. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub>[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1995, 12(11): 2102 - 2116.

## 信息产业部电子科技期刊主编工作会议在西宁召开

信息产业部电子科技期刊管理办公室于 6 月 10 日至 15 日,在青海省西宁市主持召开了每两年一次的“信息产业部 2006 - 2007 年度电子科技期刊主编工作会议”,90 余名主编和期刊主管领导出席了会议。

大会报告由部科技司技术基础处常利民处长主持,部科技司韩俊副司长作了大会报告:他肯定了电子科技期刊的发展;要求认真贯彻国家新闻出版政策,严格执行“出版管理条例”;分析了期刊的现状和问题;并以“交流与思考”为题提出对期刊发展的要求。部期刊办邹勇主任作了两年工作总结,就取得的成绩,存在的问题,完成的主要工作进行了总结,并布置了下一步的工作。部电子 1 所石怀成所长作了“网络环境下科技期刊的机遇与挑战”的大会主题报告,深刻分析了网络对期刊的深远影响;提出要“适应网络、学习网络、驾驭网

络”;要勇敢面对,迎接挑战,抓住契机,锻造品牌,谱写新的篇章。石所长的报告高瞻远瞩,分析透彻,论述充分,大家深受启迪,受到大家的广泛欢迎和好评。

大会颁发了 2005 - 2006 年度期刊评比的各奖项和优秀主编、优秀编辑、优秀审读员等奖项。大会发言交流由邹勇主任主持,有 9 位代表在大会发言,部期刊办张海萍同志就期刊出版计划,评比条件修改等进行了说明。

在审读员和主编分组会上,就评比条件和大家关心的一些问题进行了讨论交流。

大家肯定了部期刊办对期刊的管理、审读、评比、定期交流等对期刊健康发展所起的重要作用。

会议开的紧凑和谐,内容丰富,会上会下广泛交流,取得了良好效果。

(本刊通讯员)