

## 可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换\*

阴明<sup>1)</sup> 周寿桓<sup>1)2)</sup> 冯国英<sup>1)†</sup>

1) (四川大学电子信息学院, 成都 610065)

2) (华北光电技术研究所, 北京 100015)

(2012年4月10日收到; 2012年6月20日收到修改稿)

高效宽带二次谐波转换在光通信、信号处理和光谱学等很多领域都有重要的应用. 通常高效宽带二次谐波转换的研究都集中在几个波长, 为了得到可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换, 理论分析了准相位匹配和群速度匹配条件. 在此基础上, 分别计算了 O 型和 I 型准相位匹配情况下, 温度对 5 mol% 掺杂氧化镁周期性极化铌酸锂和周期性极化铌酸锂晶体准相位匹配高效宽带二次谐波转换的影响. 对于 5 mol% 掺杂氧化镁周期性极化铌酸锂晶体, 在 O 型和 I 型准相位匹配情况下, 分别得到了调谐宽度 15 nm 和 341 nm 的可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换; 对于周期性极化铌酸锂晶体, 在 O 型和 I 型准相位匹配情况下, 分别得到了调谐宽度 44 nm 和 98 nm 的可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换. 拓展了准相位匹配高效宽带二次谐波转换的波长范围.

**关键词:** 可调谐, 高效宽带二次谐波转换, 温度

**PACS:** 42.65.Ky, 42.65.-k, 42.65.Wi

## 1 引言

高效宽带二次谐波转换在光通信、信号处理和光谱学等很多领域都有重要的应用<sup>[1]</sup>. Sidick 等<sup>[2,3]</sup>最先提出了高效宽带二次谐波转换的理论. 在双折射相位匹配的情况下, Alford 和 Smith<sup>[4]</sup>, Martinez 等<sup>[5,6]</sup>通过晶体级联和角色散补偿实现了高效宽带二次谐波转换. 传统的双折射相位匹配是利用非线性晶体的双折射特性和色散特性, 通过选择光波的波矢方向和偏振方向来实现的; 而准相位匹配技术是通过晶体非线性系数的周期性调制来补偿相互作用波之间的相位失配. 该技术的一个显著特点是对非线性晶体的整个透光范围内的任意波长的光波都可以实现相位匹配, 而最大的优点是可以利用晶体的最大非线性系数, 从而使转换效率大大提高<sup>[7]</sup>. Arbore 等<sup>[8-10]</sup>通过啁啾技术实现了准相位匹配高效宽带二次谐波转换. Yu 等<sup>[11,12]</sup>通过掺镁周期性极化铌酸锂的色散关系实现了准

相位匹配高效宽带二次谐波转换. 研究可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换对于拓展准相位匹配高效宽带二次谐波转换的波长范围具有重要的意义.

本文为了得到可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换, 理论分析了准相位匹配和群速度匹配条件. 在此基础上, 数值模拟了温度对 5 mol% 掺杂氧化镁周期性极化铌酸锂和周期性极化铌酸锂晶体在 O 型和 I 型准相位匹配情况下高效宽带二次谐波转换的影响, 给出了不同温度以及同时满足相位匹配和群速度匹配条件的基波波长 (最佳基波波长)、晶体极化周期 (最佳晶体极化周期) 和二次谐波转换带宽, 得到了最宽调谐范围 341 nm 的可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换.

## 2 准相位匹配和群速度匹配理论分析

在准相位匹配中, 当基波通过非线性晶体时, 由于非线性效应会产生二次谐波, 如图 1 所示.

\* 国家自然科学基金重大项目 (批准号: 60890200) 和国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金 (批准号: 10976017) 资助的课题.

† E-mail: guoing\_feng@scu.edu.cn

共线二次谐波转换的相位失配量  $\Delta k$  为

$$\begin{aligned} \Delta k &= k_2 - 2k_1 - k_g \\ &= \frac{2\pi n_2}{\lambda_2} - \frac{4\pi n_1}{\lambda_1} - \frac{2\pi}{\Lambda}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $k_1, k_2$  和  $k_g$  为基波、二次谐波和周期性极化晶体的波矢量,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为基波和二次谐波的波长,  $n_1$  和  $n_2$  为基波和二次谐波的折射率,  $\Lambda$  为周期性极化晶体的极化周期. 当满足相位匹配  $\Delta k = 0$  时,  $\Lambda$  的选择可由下式求得:

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{n_2 \lambda_1 - 2n_1 \lambda_2}. \quad (2)$$

由于宽谱基波中各频率激光无法同时实现相位匹配, 引起了“光谱过滤”, 导致谐波光谱变窄 [13]. 在满足准相位匹配的条件下, 使得相位失配量  $\Delta k$  在一定的波长范围内保持较小的变化, 那么在这个波长范围内的所有波长就能实现高效的二次谐波转换, 即需要满足  $\frac{d(\Delta k)}{d\lambda_1} = 0$ . 又因为  $\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{2}$ , (1) 式两边分别对  $\lambda_1$  求导可得

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta k)}{d\lambda_1} &= \frac{d\left(\frac{2\pi n_2}{\lambda_2}\right)}{d\lambda_1} - \frac{d\left(\frac{4\pi n_1}{\lambda_1}\right)}{d\lambda_1} - \frac{d\left(\frac{2\pi}{\Lambda}\right)}{d\lambda_1} \\ &= \frac{4\pi}{\lambda_1^2} \left[ \left( n_1 - \lambda_1 \frac{dn_1}{d\lambda_1} \right) - \left( n_2 - \lambda_1 \frac{dn_2}{d\lambda_1} \right) \right] \\ &= \frac{4\pi}{\lambda_1^2} \left[ \left( n_1 - \lambda_1 \frac{dn_1}{d\lambda_1} \right) - \left( n_2 - \lambda_2 \frac{dn_2}{d\lambda_2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

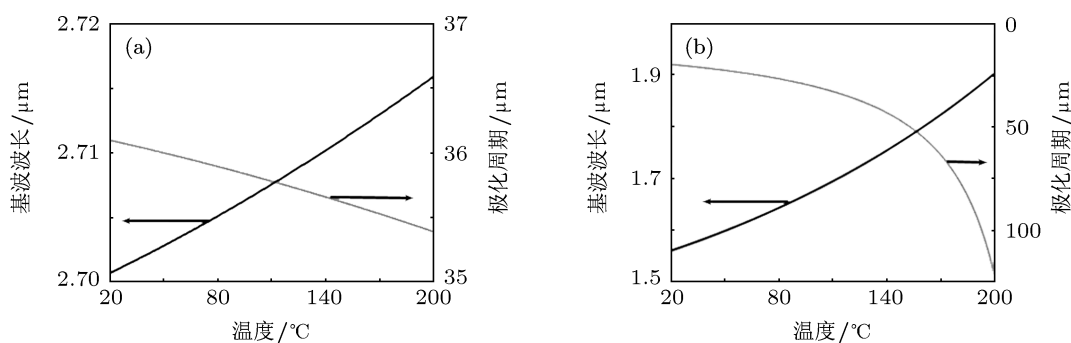


图2 5 mol% MgO : PPLN 最佳基波波长和晶体极化周期随温度的变化 (a) 0 型准相位匹配; (b) I 型准相位匹配

由图 2(a) 可以看出, 在 0 型准相位匹配情况下, 随着晶体温度由 20 °C 升高到 200 °C, 最佳基波波长由 2.701 μm 升高到 2.716 μm, 最佳晶体极化周期由 36.1 μm 下降到 35.4 μm. 由图 2(b) 可以看出, 在 I 型准相位匹配情况下, 随着温度由 20 °C 升高到 200 °C, 最佳基波波长由 1.561 μm 升高

由于群速度  $v = \frac{c}{n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}}$ , 因此满足  $\frac{d(\Delta k)}{d\lambda_1} = 0$

时, 有

$$\frac{d(\Delta k)}{d\lambda_1} = \frac{4\pi c}{\lambda_1^2} \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) = 0, \quad (4)$$

式中  $v_1$  和  $v_2$  为基波和二次谐波的群速度. 要实现宽带二次谐波转换, 要满足群速度匹配 [13]

$$v_1 = v_2. \quad (5)$$

为了实现高效宽带二次谐波转换, 需同时满足相位匹配条件和群速度匹配条件 [14].

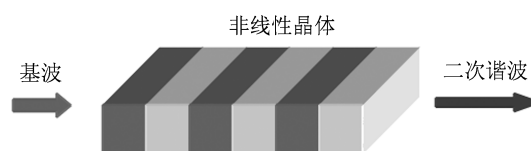


图1 二次谐波转换示意图

### 3 5 mol% 掺杂氧化镁周期性极化铌酸锂 (5 mol% MgO : PPLN) 二次谐波转换

根据文献 [15] 给出的 5 mol% MgO : PPLN 的 Sellmeier 方程, 分别计算了 0 型 ( $e + e \rightarrow e$ ) 和 I 型 ( $o + o \rightarrow e$ ) 准相位匹配情况下, 最佳基波波长和晶体极化周期随温度的变化, 如图 2 所示.

到 1.902 μm, 最佳晶体极化周期由 -19.9 μm 下降到 -122.3 μm. 对于 5 mol% MgO : PPLN 晶体, 0 型准相位匹配情况下, 得到了调谐宽度 15 nm 的可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换; I 型准相位匹配情况下, 得到了调谐宽度 341 nm 的可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换. I 型准相位匹配

比 0 型准相位匹配能够得到调谐范围更宽的高效宽带二次谐波转换.

二次谐波的转换效率正比于  $\sin^2(\Delta kL/2)$ . 在求得准相位匹配点的参数后, 固定其他参数, 改变基波波长, 使得  $\sin^2(\Delta kL/2) = 1/2$ . 定义允许带宽为转换效率下降至最大值的 1/2 时所对应的基波波长的变化量<sup>[13,16]</sup>. 我们假设 5 mol% MgO : PPLN 晶体的长度为 10 mm. 对于 5 mol% MgO : PPLN 晶体, 在 0 型准相位匹配情况下, 计算得到温度为 60 和 200 °C 时的转换效率随基波波长的变化

曲线, 如图 3 所示.

由图 3 可以看出, 对于 5 mol% MgO : PPLN 晶体, 在 0 型准相位匹配情况下, 温度为 60 °C 时, 最佳基波波长为 2.704  $\mu\text{m}$ , 二次谐波转换的带宽为 93 nm, 温度为 200 °C 时, 最佳基波波长为 2.716  $\mu\text{m}$ , 二次谐波转换的带宽为 93 nm. 温度在 60 和 200 °C 时, 二次谐波转换的带宽相等.

对于 5 mol% MgO : PPLN 晶体, 在 I 型准相位匹配情况下, 计算得到温度为 60 和 200 °C 时的转换效率随基波波长的变化曲线, 如图 4 所示.

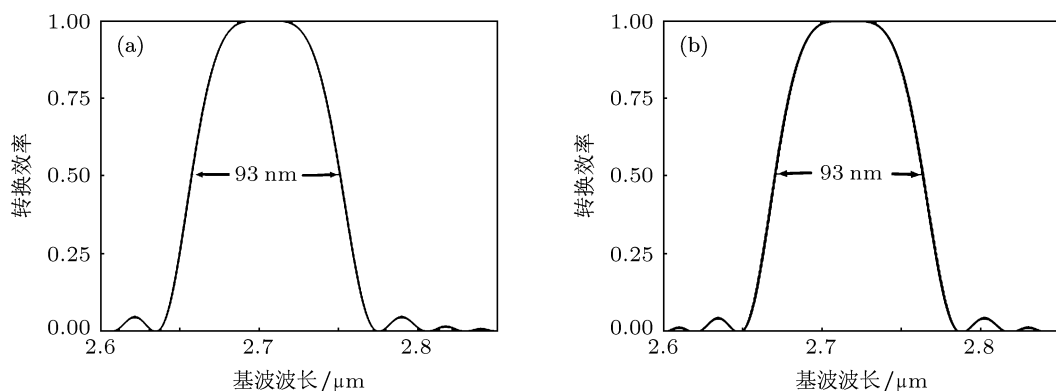


图 3 5 mol% MgO : PPLN 0 型准相位匹配时转换效率随基波波长的变化 (a) 温度为 60 °C; (b) 温度为 200 °C

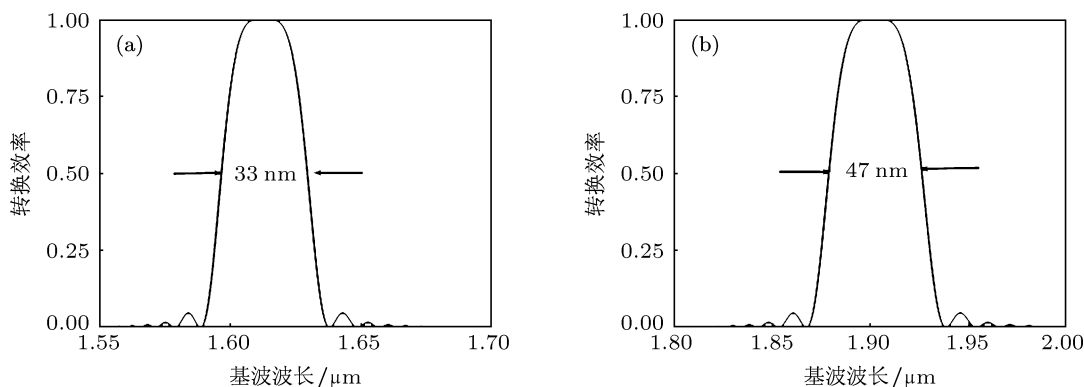


图 4 5 mol% MgO : PPLN I 型准相位匹配时转换效率随基波波长的变化 (a) 温度为 60 °C; (b) 温度为 200 °C

由图 4 可以看出, 对于 5 mol% MgO : PPLN 晶体, 在 I 型准相位匹配情况下, 温度为 60 °C 时, 最佳基波波长为 1.613  $\mu\text{m}$ , 二次谐波转换的带宽为 33 nm, 温度为 200 °C 时, 最佳基波波长为 1.902  $\mu\text{m}$ , 二次谐波转换的带宽为 47 nm. 温度在 200 °C 时能够获得更宽的带宽. 晶体的温度不同, 导致了晶体的折射率发生变化, 若基波和二次谐波的折射率之差随温度变化小, 则带宽的变化小; 若基波和二次谐波的折射率之差随温度变化大, 则带宽的变化大.

由图 3 和图 4 还可以看出, 对于 5 mol% MgO : PPLN 晶体, 0 型准相位匹配可以获得更宽的带宽. 准相位匹配方式不同, 导致了基波的折射率发生变化, 从而使得不同准相位匹配方式的带宽不同.

#### 4 周期性极化铌酸锂二次谐波转换

根据参考文献 [17] 给出的 PPLN 的 Sellmeier 方程, 分别计算了 0 型和 I 型准相位匹配情况下, 最佳基波波长和最佳晶体极化周期随温度的变化,

如图 5 所示.

由图 5(a) 可以看出, 在 0 型准相位匹配情况下, 随着晶体温度由 20 °C 升高到 200 °C, 最佳基波波长由 2.721  $\mu\text{m}$  升高到 2.765  $\mu\text{m}$ , 最佳晶体极化周期由 35.42  $\mu\text{m}$  下降到 34.94  $\mu\text{m}$ . 由图 5(b) 可以看出, 在 I 型准相位匹配情况下, 随着温度由 20 °C 升高到 200 °C, 最佳基波波长由 1.612  $\mu\text{m}$  升高到 1.710  $\mu\text{m}$ , 最佳晶体极化周期由 -23.64  $\mu\text{m}$  下降

到 -31.53  $\mu\text{m}$ . 对于 PPLN 晶体, 0 型准相位匹配情况下, 得到了调谐宽度 44 nm 的可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换; I 型准相位匹配情况下, 得到了调谐宽度 98 nm 的可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换, I 型准相位匹配比 0 型准相位匹配能够得到调谐范围更宽的高效宽带二次谐波转换.

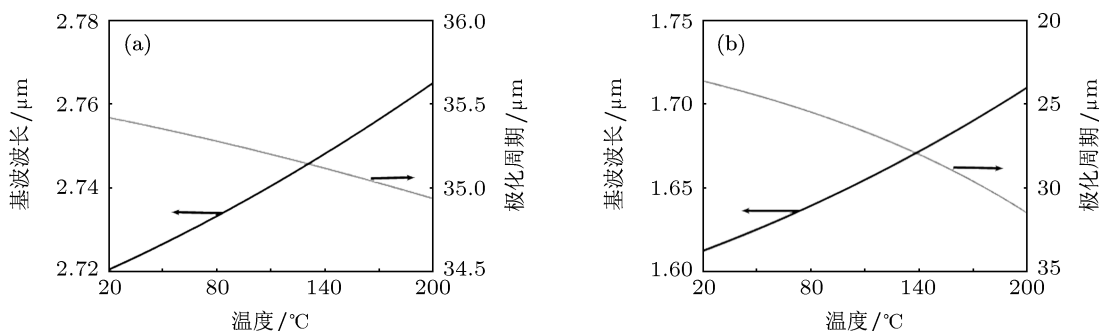


图 5 PPLN 准相位匹配最佳基波波长和晶体周期随温度的变化 (a) 0 型准相位匹配; (b) I 型准相位匹配

定义允许带宽为转换效率下降至最大值的 1/2 时所对应的基波波长的变化量. 我们假设 PPLN 晶体的长度为 10 mm. 对于 PPLN 晶体, 在 0 型准相位匹配情况下, 计算得到温度为 60 和 200 °C 时的转换效率随基波波长的变化曲线, 如图 6 所示.

由图 6 可以看出, PPLN 晶体在 0 型准相位匹配情况下, 温度为 60 °C 时, 最佳基波波长

为 2.729  $\mu\text{m}$ , 二次谐波转换的带宽为 97 nm; 温度为 200 °C 时, 最佳基波波长为 2.765  $\mu\text{m}$ , 二次谐波转换的带宽为 97 nm; 温度在 60 和 200 °C 时, 二次谐波转换的带宽相等.

对于 PPLN 晶体, 在 I 型准相位匹配情况下, 计算得到温度为 60 和 200 °C 时的转换效率随基波波长的变化曲线, 如图 7 所示.

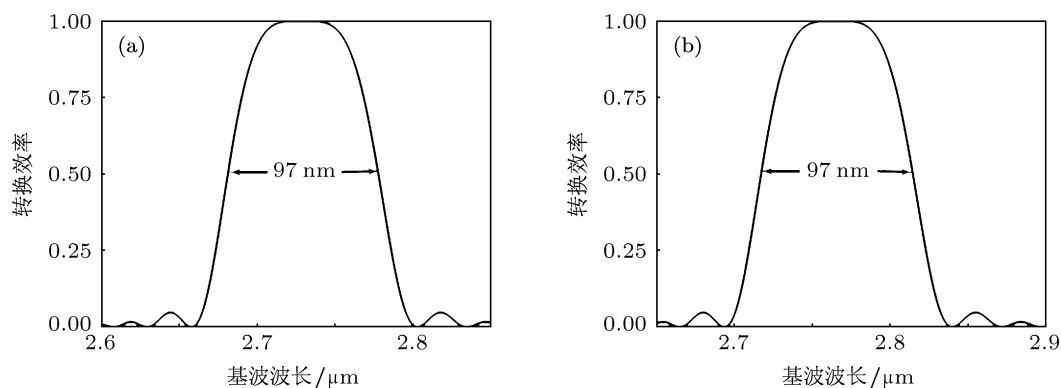


图 6 PPLN 0 型准相位匹配时转换效率随基波波长的变化 (a) 温度为 60 °C; (b) 温度为 200 °C

由图 7 可以看出, 对于 PPLN 晶体在 I 型准相位匹配情况下, 温度为 60 °C 时, 最佳基波波长为 1.630  $\mu\text{m}$ , 二次谐波转换的带宽为 34 nm, 温度为 200 °C 时, 最佳基波波长为 1.710  $\mu\text{m}$ , 二次谐波转换的带宽为 37 nm. 温度在 200 °C 时获得的带宽略大于 60 °C 时. 由图 6 和图 7 还可以看出,

对于 PPLN 晶体, 0 型准相位匹配可以获得更宽的带宽.

在相同温度下, 0 型准相位匹配方式下, PPLN 的最佳基波调谐范围大于 5 mol% MgO : PPLN; I 型准相位匹配方式下, 5 mol% MgO : PPLN 的最佳基波调谐范围大于 PPLN.

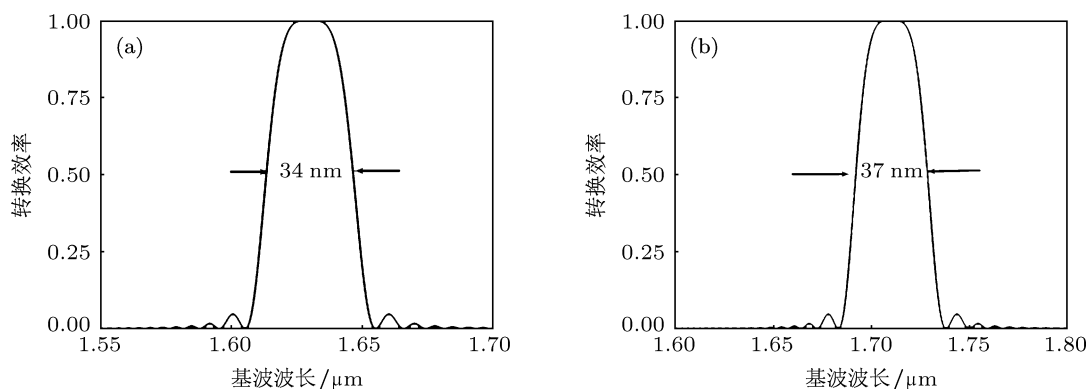


图7 PPLN I型准相位匹配时转换效率随基波波长的变化 (a) 温度为 60 °C; (b) 温度为 200 °C

## 5 结论

对于 5 mol% MgO : PPLN 晶体, 在 0 型和 I 型准相位匹配情况下, 分别得到了调谐宽度 15 nm 和 341 nm 的可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换; 对于 PPLN 晶体, 在 0 型和 I 型准相位匹配情况下, 分别得到了调谐宽度 44 nm 和 98 nm 的可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换. 相同

晶体, I 型准相位匹配比 0 型的可调谐范围宽. 对于 5 mol% MgO : PPLN 晶体, 在 I 型准相位匹配情况下, 通过改变温度获得了 1.561  $\mu\text{m}$  到 1.902  $\mu\text{m}$  (调谐宽度 341 nm) 的可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换, 温度为 60 和 200 °C 时, 二次谐波转换的带宽分别为 33 nm 和 47 nm, 这为不同波长光源的高效宽带二次谐波转换提供了依据.

- [1] Ashihara S, Shimura T, Kuroda K 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 853
- [2] Sidick E, Knoesen A, Dienes A 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 1704
- [3] Sidick E, Knoesen A, Dienes A 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 1713
- [4] Alford W J, Smith A V 2001 *J. Opt. Soc. Am. B* **18** 515
- [5] Martinez O E 1989 *IEEE J. Quantum Electron.* **25** 2464
- [6] Szabo G, Bor Z 1990 *Appl. Phys.* **B 50** 51
- [7] Chen Y L, Yuan J W, Yan W G, Zhou B B, Luo Y F, Guo J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2079 (in Chinese) [陈云琳, 袁建伟, 闫卫国, 周斌斌, 罗勇锋, 郭娟 2005 物理学报 **54** 2079]
- [8] Arbore M A, Marco O, Fejer M M 1997 *Opt. Lett.* **22** 865
- [9] Arbore M A, Galvanauskas A, Harter D, Chou M H, Fejer M M 1997 *Opt. Lett.* **22** 1341
- [10] Imeshev G, Arbore M A, Fejer M M, Galvanauskas A, Fermann M, Harter D 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 304
- [11] Yu N E, Ro J H, Cha M, Kurimura S, Taira T 2002 *Opt. Lett.* **27** 1046
- [12] Yu N E, Kurimura S, Kitamura K, Ro J H, Cha M, Ashihara S, Shimura T, Kuroda K, Taira T 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3388
- [13] Ren A H, Liu Z Y, Zhang R Z, Liu J L, Sun N C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7050 (in Chinese) [任爱红, 刘正颖, 张蓉竹, 刘静伦, 孙年春 2010 物理学报 **59** 7050]
- [14] Liu T, Yu S, Zhang H, Shi P M, Gu W Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2482 (in Chinese) [刘涛, 喻松, 张华, 史培明, 顾晓仪 2009 物理学报 **58** 2482]
- [15] Gayler O, Sacks Z, Galun E, Arie A 2008 *Appl. Phys. B* **91** 343
- [16] Chen Y P, Chen X F, Xie S W, Zeng X L, Xia Y X, Chen Y L 2002 *J. Opt. A* **4** 324
- [17] Edwards G J, Lawrence M 1984 *Opt. Quantum Electron.* **16** 373

# Tunable high efficiency broadband second-harmonic conversion in quasi-phase matching\*

Yin Ming<sup>1)</sup> Zhou Shou-Huan<sup>1)2)</sup> Feng Guo-Ying<sup>1)†</sup>

1) (*School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

2) (*North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China*)

(Received 10 April 2012; revised manuscript received 20 June 2012)

## Abstract

High efficiency broadband second-harmonic conversion plays an important role in communication, signal processing, spectroscopy and so on. In general, the study of high efficiency broadband second-harmonic conversion focuses on a few of wavelengths. For obtaining tunable high efficiency broadband second-harmonic conversion in quasi-phase matching, the group-velocity and quasi-phase matched condition are analyzed. The temperature effect on high-efficiency broadband second-harmonic conversion in types 0 and I quasi-phase matched condition for 5 mol% periodically poled LiNbO<sub>3</sub> and periodically poled LiNbO<sub>3</sub> is studied. The results show that 15 nm and 341 nm tunable high efficiency broadband second-harmonic conversions are obtained in types 0 and I quasi-phase matched conditions for 5 mol% periodically poled LiNbO<sub>3</sub>; 44 nm and 98 nm tunable high efficiency broadband second-harmonic conversions are obtained in types 0 and I quasi-phase matched condition for periodically poled LiNbO<sub>3</sub>. The range of high efficiency broadband second-harmonic conversion wavelength is expanded.

**Keywords:** tunable, high efficiency broadband second-harmonic conversion, temperature

**PACS:** 42.65.Ky, 42.65.-k, 42.65.Wi

---

\* Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60890200) and the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China and the China Academy of Engineering Physics (Grant No. 10976017).

† E-mail: guoing\_feng@scu.edu.cn