

The Study of Cascaded Third-Harmonic-Generation of Blue Laser with a Monolithic Periodically Poled Crystal

Xuguang Zhang^{1,2,3}, Yanhua Lu¹, Xiafei Xu¹, Lei Zhang¹, Huaijin Ren¹, Fang Liu¹, Jun Sun^{4,5,6}, Weimin Wang^{1*}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan

²Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing

³Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan

⁴School of Physics, Nankai University, Tianjin

⁵MOE Key Laboratory of Weak-Light Nonlinear Photonics, Nankai University, Tianjin

⁶Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Taiyuan Shanxi

Email: zhang_131517@163.com, *weimin_653@163.com

Received: Jan. 4th, 2018; accepted: Jan. 22nd, 2018; published: Jan. 29th, 2018

Abstract

Cascaded third-harmonic-generation is realized by second-harmonic-generation (SHG) and sum-frequency-generation (SFG) successively. It can be realized with one monolithic periodically poled crystal at the same temperature. The theoretical and experimental study about this kind of method was introduced in this paper. Through Sellmeier Equation and phase-matching condition, it was found that the poling periods for SHG and SFG are both related to fundamental wavelength and working temperature. The poling periods can be determined after confirming wavelength and temperature. According to our calculation, a 440-nm blue laser was realized by cascaded third-harmonic-generation of 1319-nm laser with a 40-mm-long periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal where the working temperature was 55.5°C.

Keywords

Cascaded Third-Harmonic-Generation, Periodically Poled Crystal, Blue Laser

基于单块周期极化晶体的级联三倍频蓝光输出技术的研究

张旭光^{1,2,3}, 鲁燕华¹, 许夏飞¹, 张雷¹, 任怀瑾¹, 刘芳¹, 孙军^{4,5,6}, 王卫民^{1*}

*通讯作者。

文章引用: 张旭光, 鲁燕华, 许夏飞, 张雷, 任怀瑾, 刘芳, 孙军, 王卫民. 基于单块周期极化晶体的级联三倍频蓝光输出技术的研究[J]. 应用物理, 2018, 8(1): 32-38. DOI: 10.12677/app.2018.81005

¹中国工程物理研究院, 应用电子学研究所, 四川 绵阳

²中国工程物理研究院, 研究生院, 北京

³中国工程物理研究院, 高能激光科学与技术实验室, 四川 绵阳

⁴南开大学, 物理科学学院, 天津

⁵南开大学, 弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津

⁶山西大学, 极端光学协同创新中心, 山西 太原

Email: zhang_131517@163.com, *weimin_653@163.com

收稿日期: 2018年1月4日; 录用日期: 2018年1月22日; 发布日期: 2018年1月29日

摘要

本文对单块周期极化晶体, 在同一温度下先后经过倍频(SHG)与和频(SFG)过程实现级联三倍频输出进行了理论与实验研究。通过周期极化晶体的色散方程以及倍频与和频过程需满足的相位匹配条件, 发现晶体所需倍频与和频极化周期只与基频光波长和工作温度有关, 基频光波长确定后, 同一工作温度相对应的倍频极化周期与和频极化周期即可确定。根据计算结果, 在一块40 mm长的周期极化铌酸锂(PPLN)晶体上实现了1319 nm的级联三倍频蓝光输出, 工作温度55.5℃。

关键词

级联三倍频, 周期极化晶体, 蓝光

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

蓝光激光器是近年来激光研究的一个热点, 它在高密度光存储、生物与医学检测、彩色显示、水下成像与通信以及先进制造业等领域有广泛应用[1] [2] [3]。非线性频率变换是获得蓝光激光的常用手段, 一般利用二阶非线性效应获得蓝光激光, 其非线性系数要比高阶的非线性系数大, 这通常意味着更高的转换效率[4]。通过二阶非线性效应获得蓝光激光一般需要倍频(SHG)、和频(SFG)过程。对于400 nm~480 nm波段的蓝光, 当基频光波长在800 nm~960 nm范围内时, 可通过一次二阶非线性变换实现蓝光输出。例如Nd:YAG产生的946 nm光, 可通过倍频方式实现473 nm蓝光[5], Nd:GdVO₄产生的880 nm激光, 可通过倍频实现440 nm蓝光[6]。1319 nm、1342 nm光往往要先后经过倍频与和频来实现蓝光输出, 即级联三倍频[7] [8]。要实现非线性频率变换, 就要利用非线性晶体来产生非线性效应。对于三硼酸锂(LBO)、磷酸钛氧钾(KTP)、β-硼酸钡(BBO)等非线性晶体, 需要通过角度相位匹配或温度相位匹配的方式满足相位匹配条件, 实现非线性频率变换[9]。该方式必须按照特定方向切割晶体, 维持在一个特定的工作温度, 往往无法利用晶体的最大非线性系数, 这限制了非线性转换效率的提高。对于角度相位匹配方式, 两束偏振态不同的光在非线性晶体中传播时, 会因双折射效应分离, 产生走离效应, 也会降低非线性转换效率。准相位匹配技术利用周期极化晶体实现非线性频率变换, 理论上可以利用晶体的最大非线性系数, 而且不会产生走离效应[10] [11] [12]。另外, LBO、KTP、BBO等晶体在实现级联三倍频过程中, 倍频、和频的匹配角度或者匹配温度不一样, 需要两块晶体分开实现倍频与和频过程, 而且实现倍频、和频的

两块晶体之间往往需要加入耦合系统，需要两个温控装置实现不同的温度控制。准相位匹配的方式，可通过单块周期极化晶体，不同极化周期实现倍频与和频，而且可以通过设计使其工作在同一温度。这种方式不再需要两块晶体之间的耦合，温度控制也更为简单。

2. 理论分析

通过准相位匹配方式实现非线性频率变换时，周期极化晶体中的耦合波方程如下：

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_1}{\partial z} &= \frac{i\omega_1}{2n_1c} d_Q E_3 E_2^* \exp(i\Delta k \cdot z) \\ \frac{\partial E_2}{\partial z} &= \frac{i\omega_2}{2n_2c} d_Q E_3 E_1^* \exp(i\Delta k \cdot z) \\ \frac{\partial E_3}{\partial z} &= \frac{i\omega_3}{2n_3c} d_Q E_1 E_2 \exp(-i\Delta k \cdot z)\end{aligned}\quad (1)$$

d_Q 为周期极化晶体的有效非线性系数，表达式如下：

$$d_Q = d_H \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \left| \frac{i}{m\pi} [1 - \cos(2mD\pi)] \right| \exp\left(-i \frac{2\pi m}{\Lambda} z\right) \quad (2)$$

上式中， d_H 为周期极化晶体可利用的最大非线性系数； m 为极化周期阶数， D 为占空比，一般取 $D = 0.5$ ，此时 m 应取奇数； Λ 为极化周期。当极化周期阶数只取某一阶时，耦合波方程可化为：

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_1}{\partial z} &= \frac{i\omega_1}{2n_1c} \frac{2d_H}{m\pi} E_3 E_2^* \exp\left[i\left(k_3 - k_2 - k_1 - \frac{2\pi m}{\Lambda}\right) \cdot z\right] \\ \frac{\partial E_2}{\partial z} &= \frac{i\omega_2}{2n_2c} \frac{2d_H}{m\pi} E_3 E_1^* \exp\left[i\left(k_3 - k_2 - k_1 - \frac{2\pi m}{\Lambda}\right) \cdot z\right] \\ \frac{\partial E_3}{\partial z} &= \frac{i\omega_3}{2n_3c} \frac{2d_H}{m\pi} E_1 E_2 \exp\left[-i\left(k_3 - k_2 - k_1 - \frac{2\pi m}{\Lambda}\right) \cdot z\right]\end{aligned}\quad (3)$$

极化周期应满足相位匹配条件：

$$k_3 - k_2 - k_1 - \frac{2\pi m}{\Lambda} = 0 \quad (4)$$

根据公式(4)，极化周期表达式为：

$$\Lambda = \frac{2\pi m}{k_3 - k_2 - k_1} = \frac{m}{\frac{n_3}{\lambda_3} - \frac{n_2}{\lambda_2} - \frac{n_1}{\lambda_1}} \quad (5)$$

PPLN 晶体色散方程中，晶体折射率是温度与波长的函数。晶体的 Sellmeier 方程如下[13]：

$$\begin{aligned}n_e^2 &= a_1 + b_1 f + \frac{a_2 + b_2 f}{\lambda^2 - (a_3 + b_3 f)^2} + \frac{a_4 + b_4 f}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2 \\ f &= (T - 24.5)(T + 570.82)\end{aligned}\quad (6)$$

方程中各参数如表 1，表中参数引自参考文献 13。

公式(6)中 λ 为波长，单位 μm ， T 为温度，单位 $^\circ\text{C}$ 。

级联三倍频的倍频过程中 $\lambda_1 = \lambda_2 = 2\lambda_3$ ，和频过程中 $\lambda_1 = 2\lambda_2 = 3\lambda_3$ ，故某特定阶数的极化周期是温度与基频光波长的函数： $\Lambda = \Lambda(\lambda_1, T)$ 。以 PPLN 晶体实现 1319 nm 三倍频为例，倍频极化周期与和频极化周期与温度的关系如图 1。

Table 1. Parameters of Sellmeier equation
表 1. Sellmeier 方程参数

| Parameter | n_e (5% MgO doped) |
|-----------|------------------------|
| a_1 | 5.756 |
| a_2 | 0.0983 |
| a_3 | 0.2020 |
| a_4 | 189.32 |
| a_5 | 12.52 |
| a_6 | 1.32×10^{-2} |
| b_1 | 2.860×10^{-6} |
| b_2 | 4.7×10^{-8} |
| b_3 | 6.113×10^{-8} |
| b_4 | 1.516×10^{-4} |

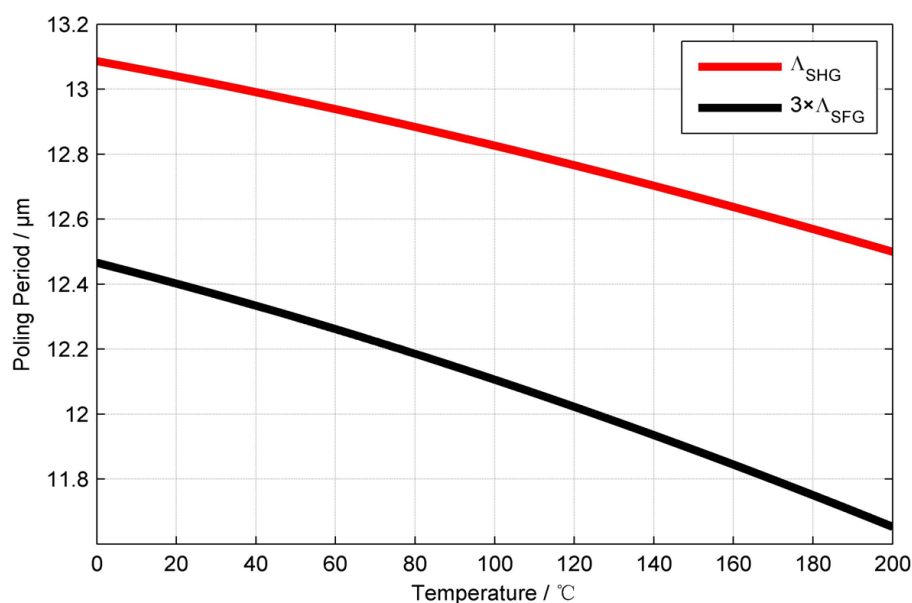


Figure 1. Relation of temperature and poling period
图 1. 温度与极化周期的关系

确定工作温度后，倍频极化周期与和频极化周期即可确定。在理论工作温度 30°C 时，1319 nm 倍频所需晶体极化周期为 13.0 μm ($m = 1$)，和频极化周期为 12.4 μm ($m = 3$)。

3. 实验结果与分析

在确定极化周期后，利用 5 mm 倍频长度与 35 mm 和频长度，总长 40 mm 的 PPLN 晶体进行实验。实验装置简图如图 2，采用声光调 Q，偏振输出，45°镜抑制 1064 nm 振荡，通过耦合透镜将基频光耦合进 PPLN 晶体，经过色散棱镜后，蓝光、红光、基频光分离。

基频光实验中，1319 nm 光重频 400 Hz，脉宽 110 ns，光束质量 $M_x^2 = 1.81$ ， $M_y^2 = 2.65$ ，光斑束腰半径在经过耦合透镜后为 0.406 mm (x) 与 0.4965 mm (y)。在基频光功率 530 mW，工作温度 55.5°C 时，得到了最高 2.4 mW 的蓝光输出，此时红光功率为 147 mW。实验测量了基频光入射耦合透镜前的功率以及

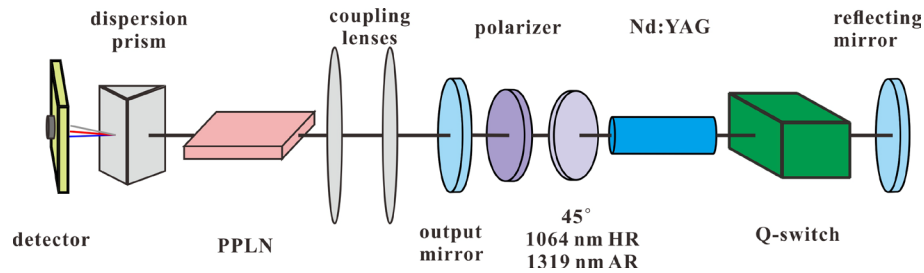


Figure 2. Experiment setup for third-harmonic generation

图 2. 三倍频实验光路

经过色散棱镜后的出射光总功率,在基频光功率 530 mW 时,出射光总功率 370 mW,约有 30.2%的损耗。

实验测得的蓝光转换效率,在去掉损耗影响的情况下只有 6%。

实验测得基频光中心波长 1318.8 nm,红光中心波长 659.44 nm,蓝光中心波长为 439.5 nm。

级联三倍频的设计方案中,经过倍频晶体部分后的倍频高斯光束与基频高斯光束之间的光斑面积比为 1:2,参与和频过程的基频光占倍频后剩余基频光功率的 63%,而理想的和频过程的倍频光与基频光子数比为 1:1,故要求倍频效率为 55.75%,三倍频理想转换效率最高只有 83.6%,无法达到 100%。在实验中,红光功率 147 mW,转换效率 39.7%,需要提高光功率密度或者增加晶体长度提高转换效率。另外,实验发现 PPLN 晶体的理论工作温度与最高蓝光转换效率时的工作温度差距比较大,这主要由晶体的极化周期误差导致。

晶体的极化周期误差除引起工作温度的变化外,也会导致转换效率的下降。单一周期的周期极化晶体,极化周期误差可通过温度调节,补偿因此产生的相位失配。即:

$$\begin{aligned} \Lambda + \Delta\Lambda &= \frac{m}{\frac{n_3(\lambda_1, T + \Delta T)}{\lambda_3} - \frac{n_2(\lambda_1, T + \Delta T)}{\lambda_2} - \frac{n_1(\lambda_1, T + \Delta T)}{\lambda_1}} \\ &= f(\lambda_1, T + \Delta T) \end{aligned} \quad (7)$$

对于有两个极化周期的晶体来说,倍频极化周期误差与和频极化周期误差并不相同,达到补偿条件的温度也各不相同, $\Delta T_{SHG} = f^{-1}(\lambda_1, \Delta\Lambda_{SHG})$, $\Delta T_{SFG} = f^{-1}(\lambda_1, \Delta\Lambda_{SFG})$ 。倍频与和频过程的理想工作温度为 T_0 , 相位匹配时的工作温度为 $T_{SHG} = T_0 + \Delta T_{SHG}$, $T_{SFG} = T_0 + \Delta T_{SFG}$ 。级联三倍频需要先进行倍频过程,以倍频过程的工作温度 T_{SHG} 为实际工作温度时,该温度下和频过程的相位失配量为

$\Delta k = 2\pi m/f(\lambda_1, T_{SFG}) - 2\pi m/f(\lambda_1, T_{SHG})$ 。 $\Delta T' = \Delta T_{SHG} - \Delta T_{SFG}$ 越大,和频过程的相位失配也就越大。相位失配所导致的和频效率下降,可用下面的公式表示:

$$\eta = A \cdot \text{sinc}^2(\Delta k L / 2) \quad (8)$$

其中, A 为高斯光束级联三倍频时的最高转换效率,由上文分析可知,约为 83.6%。公式右边第二项表示晶体长度一定,因极化周期误差导致相位匹配工作温度不同,引起相位失配时,对转换效率的影响。示意图如图 3。

图中 T 表示倍频相位匹配时的工作温度而横坐标表示和频相位匹配时的工作温度,因极化周期误差,两者相位匹配时的工作温度并不相同, ΔT 即表示因此引起的倍频与和频的匹配温度差值。当两者相位匹配工作温度相同时,转换效率最高,为 83.6%。两者相位匹配工作温度不同,当以倍频相位匹配温度为实际工作温度时,和频转换效率会下降。其中, T 的值与 ΔT 的值取决于晶体极化周期及其误差,晶体极化周期误差越大,转换效率下降越明显。另外,由公式(8)可知,当极化周期误差导致的相位失配量为定值时,晶体长度越长,转换效率下降越明显。

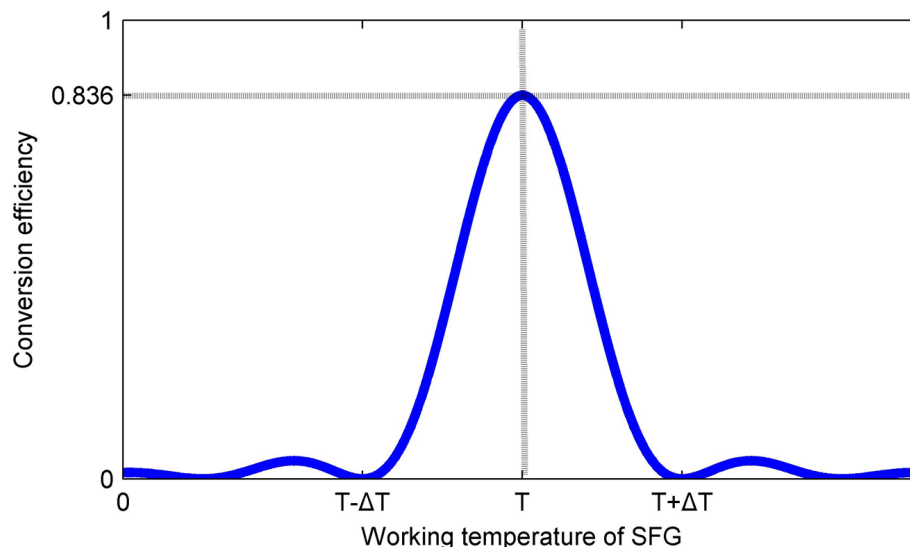


Figure 3. Diagram of relation between match-temperature for SFG and conversion efficiency
图 3. 和频匹配温度与转换效率之间关系的示意图

通过以上分析, 为提高转换效率需提高极化周期精度, 减小误差, 并合理设计晶体倍频与和频部分的长度。

4. 结论

实验证明, 通过一块晶体, 在同一温度下实现级联三倍频蓝光输出的方法是可行的。该方法与两块晶体分开实现倍频与和频的方式相比, 温控以及整体结构更加简单; 而且该方法不仅适用于 1319 nm 波长的级联三倍频蓝光输出, 在周期极化晶体透光波段范围内的其他波长也同样适用。通过进一步分析发现, 提高晶体的极化周期精度, 合理设计晶体的倍频与和频长度, 实现高转换效率的三倍频输出是可能的。论文中的分析可为相关的级联三倍频设计提供参考。

基金项目

国家自然科学基金项目(61575099); 中国工程物理研究院院长基金(201501023)。

参考文献 (References)

- [1] Sakuma, J., Asakawa, Y. and Obara, M. (2004) Generation of 5-W Deep-UV Continuous-Wave Radiation at 266 nm by an External Cavity with a CsLiB₆O₁₀ Crystal. *Optics Letters*, **29**, 92. <https://doi.org/10.1364/OL.29.000092>
- [2] Seyed, Ebrahim, Pourmand, *et al.* (2015) Effects of 946-nm Thermal Shift and Broadening on Nd³⁺:YAG Laser Performance. *Chinese Physics B*, **24**, 342-345.
- [3] Wang, G., Geng, A., Bo, Y., *et al.* (2006) 28.4 W 266 nm Ultraviolet-Beam Generation by Fourth-Harmonic Generation of an All-Solid-State Laser. *Optics Communications*, **259**, 820-822. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.09.061>
- [4] Shen, Y.R. (1984) *Principles of Nonlinear Optics*. John Wiley, 261.
- [5] Czeranowsky, C., Heumann, E. and Huber, G. (2003) All-Solid-State Continuous-Wave Frequency-Doubled Nd:YAG-BiBO Laser with 2.8-W Output Power at 473 nm. *Optics Letters*, **28**, 432. <https://doi.org/10.1364/OL.28.000432>
- [6] Castaing, M., Balembois, F. and Georges, P. (2008) Continuous-Wave Laser at 440 nm Based on Frequency-Doubled Diode-Pumped Nd:GdVO₄ Crystal. *Optics Letters*, **33**, 1957-1959. <https://doi.org/10.1364/OL.33.001957>
- [7] Mu, X., Ding, Y.J. and Zotova, T.B. (2005) All-Solid-State, Compact, and Coherent Blue Source Producing 118 mW at 440 nm by Intracavity-Frequency-Tripling Nd:YAG Laser Beam. *IEEE (CLEO) Conference on Lasers and Electro-Optics*, 473-475. <https://doi.org/10.1109/CLEO.2005.201817>
- [8] Ogilvy, H., Piper, J.A. and Withford, M.J. (2005) Intracavity Second and Third Harmonic Generation at 671 and 447

nm from a Q-Switched Nd:GVO₄ Laser. *Advanced Solid*.

- [9] Koechner, W. (2005) *Solid-State Laser Engineering*/-5th Rev. and Updated ed. World Book Inc.
- [10] Chen, Q. and Risk, W.P. (1994) Periodic Poling of KTiOPO₄ Using an Applied Electric Field. **30**, 1516-1517.
- [11] Burns, W.K., Mcelhanon, W. and Goldberg, L. (1994) Second Harmonic Generation in Field Poled, Quasi-Phase-Matched, Bulk LiNbO₃. *IEEE Photonics Technology Letters*, **6**, 252-254. <https://doi.org/10.1109/68.275441>
- [12] Zhai, K., Zhang, S., Ma, X., *et al.* (2016) Temperature Dependence of Fiber-Format Multiwavelength Generation Process in Bulk MgO-PPLN Crystal Via High-Power Photonic Crystal Fiber Laser. *IEEE Photonics Journal*, **8**, 1-7. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2600373>
- [13] Gayer, O., Sacks, Z., Galun, E., *et al.* (2008) Temperature and Wavelength Dependent Refractive Index Equations for MgO-Doped Congruent and Stoichiometric LiNbO₃. *Applied Physics B*, **91**, 343-348. <https://doi.org/10.1007/s00340-008-2998-2>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org