

应用级联倍频方法提高倍频系统输出稳定性研究

邓青华[†] 张小民 丁磊 唐军 谢旭东 卢振华 赵润昌 董一方

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2010年1月11日收到; 2010年4月16日收到修改稿)

提出应用级联倍频方法提高倍频系统输出稳定性, 并就该方法的有效性进行了理论分析和模拟计算. 分析和计算结果不但证明级联倍频方法能实现倍频系统稳定输出, 而且还表明可以通过仔细调节第一块倍频晶体中波矢方向 k 与光轴间夹角、两块倍频晶体间的间隔, 能调节改变实现倍频系统最稳输出时所需第二块晶体的理论计算长度, 使之与第二块倍频晶体的实际加工长度一致, 最终实现系统稳定倍频输出. 级联倍频方法在实现高输出稳定性的同时能实现高的倍频转换效率, 对应用于光参量啁啾脉冲放大系统的高稳定抽运源系统的设计建造具有重要参考意义.

关键词: 级联倍频, 稳定倍频输出, 光参量啁啾脉冲放大

PACS: 42. 65. Sf, 42. 79. Nv

1. 引言

光学参量啁啾脉冲放大技术作为获得超强超短激光的优选放大方案, 获得广泛研究^[1-5]. 其抽运光系统大都是 Nd: YAG (1064 nm) 系统或 Nd: glass/Nd: YLF (1053 nm) 系统输出的倍频绿光, 而抽运光的输出稳定性是影响光学参量啁啾脉冲放大系统输出稳定性的关键因素. 因而人们对光学参量啁啾脉冲放大系统抽运倍频绿光的稳定性问题非常关注. 作者在文献[6]中提出了倍频注入方法提高倍频输出稳定性, 并用理论分析和模拟计算结果证明了这种新方法的有效性. 本文就倍频注入方法的一种具体实现方法——级联倍频方法进行研究.

级联倍频方法已有较多应用. Eimerl^[7] 提出应用两块正交的倍频晶体进行级联倍频, 从而在基频光强度较低时依然能获得较高的倍频转换效率. 级联倍频方法还可通过时空走离补偿^[8]、匹配角度调谐相位匹配中心波长^[9]等增大倍频带宽. 本文提出应用级联倍频方法来提高倍频稳定性. 这一方法的实际内涵为: 第一块倍频晶体进行弱倍频效应, 所产生的倍频光作为种子光和剩余基频光在第二块倍频晶体内作用, 实现稳定倍频输出.

2. 理论分析

级联倍频方案可应用于 I 类倍频过程中, 也可应用于 II 类倍频过程中. 本文仅就偏硼酸钡 (BBO) 晶体的 I 类级联倍频方案进行分析研究. I 类级联倍频方案如图 1 所示. 级联的两块 BBO 倍频晶体的主轴完全平行. 偏振方向平行于 o 轴方向的基频光经过第一块倍频晶体后产生弱的倍频光. 剩余基频光和弱倍频光一起进入第二块倍频晶体中进行倍频作用, 通过倍频注入方法提高倍频输出稳定性.

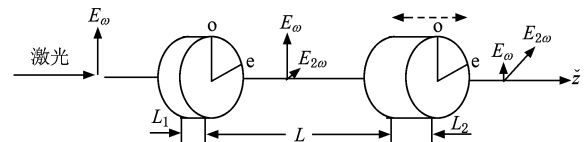


图 1 I 类级联倍频方案示意图

文献[10]给出了 I 类位相匹配倍频过程的稳态耦合波方程组如下:

$$\frac{dE_1}{dz} = -i \frac{\omega_1 d_{\text{eff}}}{n_1 c \cos^2 \beta_1} E_1^* E_2 \exp(-i\Delta kz), \quad (1a)$$

[†] E-mail: dqhaj@yahoo.com.cn

$$\frac{dE_2}{dz} = -i \frac{\omega_2 d_{\text{eff}}}{2n_2 c \cos^2 \beta_2} E_1^2 \exp(i\Delta k z), \quad (1b)$$

式中 $E_j, \beta_j (j = 1, 2)$ 分别代表倍频过程中基频光和倍频光的电场和光波在非线性介质中传播时的 Poyting 矢量的走离角; c 为真空中光速; z 为光沿 z 轴方向的传播距离; Δk 为倍频过程的相位失配 ($\Delta k = 2k_1 - k_2$); d_{eff} 代表倍频晶体的有效非线性系数. 该方程组所示倍频过程忽略了晶体吸收、衍射、群速度失配、群速度色散、三阶非线性效应等多种效应. 该方程组能描述脉宽大于数百皮秒的单体平面基频光的倍频过程.

由文献[6]的分析结果可知:倍频晶体 2 的输出稳定性及倍频效率可通过两个因素进行调谐,第一个因素是倍频晶体 1 产生的种子倍频光的强度,第二个因素是进入倍频晶体 2 时种子倍频光和基频光间的初始相位差. 下面就这两个方面的决定因子进行分析.

在第一块倍频晶体中,只会产生弱的倍频光,所以此时方程(1a),(1b)满足小信号近似条件,因而输出倍频光强如下所示:

$$I_2 = \frac{2\omega_1^2 d_{\text{eff}}^2 I_1^2 L_1^2}{c^3 n_1^3 n_3 \epsilon_0} \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k L_1}{2}\right), \quad (2)$$

式中 I_1, I_2 分别指注入基频光强和输出倍频光强. 由(2)式可知:第一块倍频晶体输出光强除了与注入基频光强平方成正比外,还与有效非线性系数、非线性晶体长度、相位失配量 Δk 有关系. 在要求输出很弱的倍频光强时,由于晶体长度不可能加工到足够短来实现小的倍频转换效率,只能通过选择光在晶体中的波矢方向(即 $(\theta_{\text{in1}}, \phi_{\text{in1}})$, 其中 θ_{in1} 为波矢方向 \mathbf{k} 与光轴间夹角, ϕ_{in1} 为波矢方向 \mathbf{k} 在 xoy 平面的投影与 x 轴的夹角)来实现小的倍频转换效率. 这是因为有效非线性系数、相位失配量 Δk 均为 $(\theta_{\text{in1}}, \phi_{\text{in1}})$ 的函数. 当 $\phi_{\text{in1}} = 0$ 时有

$$d_{\text{eff}}(\theta_{\text{in1}}) = d_{31} \sin(\theta_{\text{in1}}) - d_{11} \cos(\theta_{\text{in1}}), \quad (3)$$

$$\Delta k(\theta_{\text{in1}}) = \frac{4\pi}{\lambda} (n_2(\theta_{\text{in1}}) - n_1(\theta_{\text{in1}})), \quad (4)$$

其中 $n_1(\theta_{\text{in1}}), n_2(\theta_{\text{in1}})$ 分别是基频光、倍频光在晶体中的折射率.

结合(2),(3),(4)式可知:晶体长度 L_1 为一固定长度时,通过选择合适的 θ_{in1} 能实现一定的倍频种子光强度输出.

文献[6]的(2),(3)式中倍频光和基频光间的相位差计算公式为 $\theta = \phi_2 - 2\phi_1 + \Delta k z$, 所以基频光和倍频光进入第二块 BBO 晶体时初始相位差 $\theta(0)$

$= \frac{4\pi L_1}{\lambda} (n_2(\theta_{\text{in1}}) - n_1(\theta_{\text{in1}})) + \frac{4\pi L}{\lambda} (n_{20} - n_{10})$. 其中 n_{20}, n_{10} 分别为倍频光和基频光在空气中的折射率, L_1, L 分别为第一块倍频晶体长度和两块晶体之间的空间距离. 通过 $\theta(0)$ 的计算可知:当第一块倍频晶体长度及 θ_{in1} 确定后,通过调节两块倍频晶体中的间隔 L , 可以进一步调谐倍频光和基频光的初始相位差.

以上分析表明:能通过调节 θ_{in1} 和两倍频晶体之间距离对系统稳定倍频输出状态进行调谐.

3. 模拟计算

模拟计算是就两块级联的 BBO 晶体 I 类相位匹配 ($o + o \rightarrow e$) 倍频过程进行的, BBO 晶体的 Sellmier 方程和有效非线性系数取自文献[11]. 基频光波长为 1064 nm, 初始基频光光强假设为 400 MW/cm². 室温条件下 BBO 晶体的相位匹配角为 22.78°. 由于实际加工条件和应用条件限制,第一块 BBO 晶体长度不可能非常小. 只能改变晶体的切割方向从而使得入射波矢方向 \mathbf{k} 与光轴间的夹角偏离相位匹配角来实现较小强度的倍频种子光输出. 将第一块 BBO 晶体长度固定为 3 mm, 偏离角(即 θ_{in1} 与相位匹配角间的差值)从 0 到 4.9 mrad 间变化时,用 Runge-Kutta 方法对描述倍频过程的耦合波方程组(1a),(1b)进行数值计算,从第一块倍频晶体输出的倍频光强变化情况如图 2 所示.

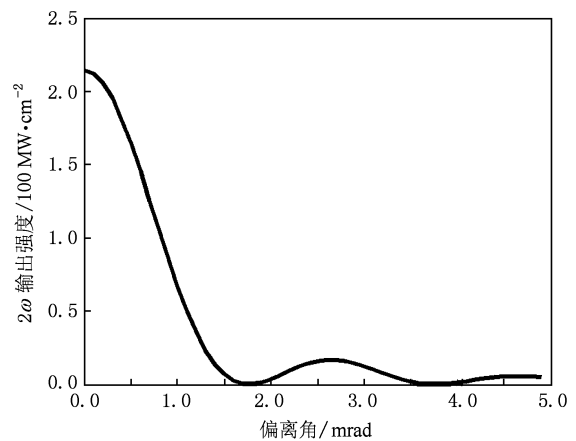


图 2 第一块 BBO 晶体输出倍频光强度随相位匹配偏离角变化曲线

从图 2 可以看出,偏离角为 1.8 mrad 附近时,输出倍频光强曲线出现一个极小值. 为了给第二块

BBO 晶体的倍频过程提供弱的倍频种子光,激光在第一块 BBO 晶体中的 θ_{in1} 与相位匹配角间的偏离角可接近 1.8 mrad, 即 θ_{in1} 接近 22.88° . 当 θ_{in1} 在 22.88° 附近变化时, 第一块 BBO 晶体输出倍频光强变化曲线如图 3 所示, 该图中的偏离角已定义为 θ_{in1} 与 22.88° 之间的差值, 称为微偏角. 极小值出现在微偏角为 $53 \mu\text{rad}$ 处. 假设调节两块晶体之间的距离, 使得倍频光和基频光间的初始相位差 $\theta(0) = 2m\pi$ (m 为整数). 在上述条件下, 当第一块 BBO 晶体中 θ_{in1} 与 22.88° 之间的微偏角变化时, 第二块 BBO 晶体输出倍频强度随晶体长度变化情况如图 4 所示. 从图 3 和图 4 可知: 级联倍频方案中, 当第一块倍频晶体产生弱的倍频种子光时, 第二块 BBO 晶体产生的倍频光强随晶体长度增大呈现循环变化特性; 而且随着微偏角偏离 $53 \mu\text{rad}$ 越多, 第一块晶体输出的倍频种子光强越大, 循环周期所需晶体长

度减小. 倍频光强随晶体长度增大所呈现的循环变化特点是能被利用来提高倍频输出稳定性的.

假设注入基频光强起伏 15%, 这里将这种起伏分解为三种注入条件: 基准光强 $400 \text{ MW}/\text{cm}^2$, 比基准光强增大 7.5% 及减小 7.5%. 将第一块 BBO 晶体中的微偏角固定为 $115 \mu\text{rad}$, 以上三种基频光强注入条件下, 第二块 BBO 晶体输出倍频光强随晶体长度变化曲线如图 5 所示. 由图 5 可知: 当入射基频光强变化时, 输出倍频光强变化曲线在 A 点汇聚, 该处倍频光输出稳定性将大大提高. 对不同晶体长度处输出倍频光强的稳定性进行分析, 结果如图 6 所示. 稳定性分析过程为: 假设基频光强分别为基准光强、在基准光强基础上增大一定比例及减小一定比例时计算得到的输出倍频光强分别为 $I_{p0}(L)$, $I_{increase}(L)$, $I_{decrease}(L)$, 不同 BBO 晶体长度处的倍频输出稳定性值为

$$R(L) = \frac{\max[I_{p0}(L), I_{increase}(L), I_{decrease}(L)] - \min[I_{p0}(L), I_{increase}(L), I_{decrease}(L)]}{I_{p0}(L)}, \quad (5)$$

由图 6 可知: 在 A 点附近, 输出倍频光强的稳定性大大提高; 当 BBO 晶体长度为 12.36 mm 时, 输出信号光强稳定性最好, 当基频光强变化 15% 时, 该处输出倍频光强变化仅为 2.46%, 此时基准光强的倍频效率能达到 90.57%. 所以级联倍频方案能在提高倍频输出稳定性的同时实现高的倍频效率. 对不同微偏角条件下, 入射基频光强变化时倍频光输出稳定性进行分析, 结果如表 1 所示. 表 1 中的输出倍频光强和倍频效率是针对基准光强而言的. 由图 3 和表 1 可知: 随着微偏角偏离 $53 \mu\text{rad}$ 越多, 第一块晶体输出的倍频种子光强增大, 第二块晶体倍频光最稳输出时所需 BBO 晶体长度减小, 稳定性提高, 但是稳定输出时基准光强的倍频效率稍有下降. 因而可以通过对第一块晶体中的 θ_{in1} 进行仔细调节, 从而改变稳定倍频输出时所需第二块倍频的晶体理论计算长度, 使其与实际加工长度一致, 从而实现系统稳定倍频输出.

以上讨论了通过调节第一块倍频中波矢方向 k 与光轴间夹角 θ_{in1} , 来调谐实现倍频稳定输出所需倍频长度及输出倍频光起伏变化情况. 下面将就倍频种子光和基频光间的初始相位差影响进行研究.

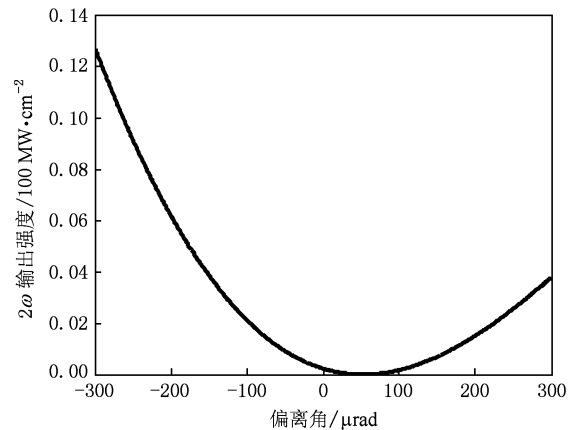


图 3 θ_{in1} 围绕 22.88° 为中心变化时第一块 BBO 晶体输出倍频光强度变化曲线

表 1 不同微偏角条件下稳定倍频输出参数

偏离角 / μrad	最小光强起伏 $2\omega/\%$	最稳 BBO 长度 $2\omega/\text{mm}$	最稳强度 $2\omega/\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$	最稳转换比 $2\omega/\%$
55	8.69	15.84	399.6	99.9
65	5.08	15.32	390.72	97.68
75	3.84	14.34	383	95.75
85	3.25	13.66	376.64	94.16
95	2.89	13.14	371.2	92.8
105	2.64	12.72	366.4	91.6
115	2.46	12.36	362.28	90.57

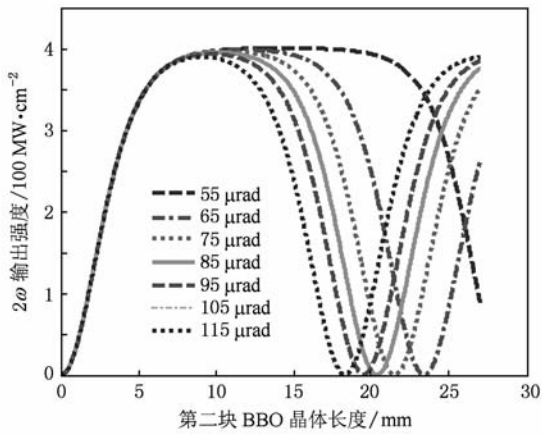


图4 第一块 BBO 晶体中 θ_{in1} 与 22.88° 之间的微偏角变化时第二块 BBO 晶体输出倍频强度随晶体长度变化曲线

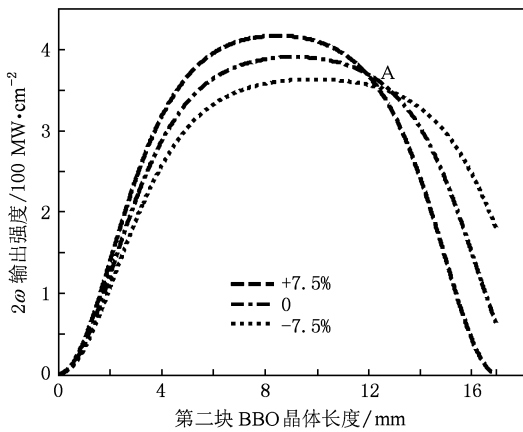


图5 微偏角为 $115 \mu\text{rad}$ 时注入基频光强起伏时输出倍频光强随第二块晶体长度变化情况

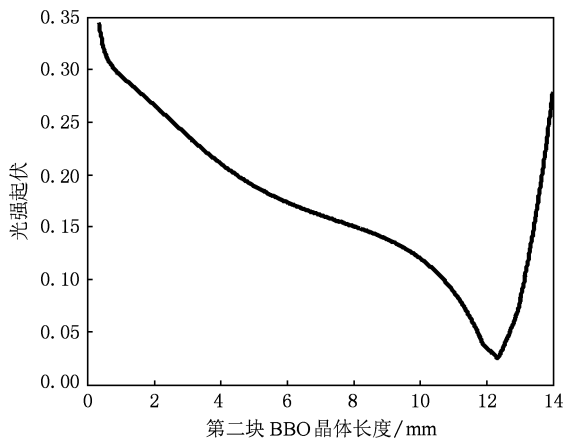


图6 微偏角为 $115 \mu\text{rad}$ 时注入基频光强起伏时输出倍频稳定性随第二块晶体长度变化情况

假设基频光强为 $400 \text{ MW}/\text{cm}^2$, 将第一块 BBO 晶体中的固定微偏角为 $115 \mu\text{rad}$, 调节两块 BBO 晶体之间的距离从而调谐倍频种子光与基频光间的初始位相差, 第二块 BBO 晶体输出倍频光强随晶体长度变化曲线如图 7 所示. 由图 7 可知: 当初始相位差变化时, 第二块倍频晶体输出倍频光强随晶体长度变化曲线不重合, 稍有不同. 通过对基频光注入光强起伏 15%, 不同初始相位差条件下倍频输出稳定性进行分析, 结果如表 2 所示. 由表 2 可知: 通过对两倍频晶体之间间隔进行微调, 从而仔细调节倍频种子光和基频光间的初始相位差, 可以对实现最稳倍频输出所需晶体长度进行微调, 且这种调节对输出倍频光稳定性和倍频效率的影响较小.

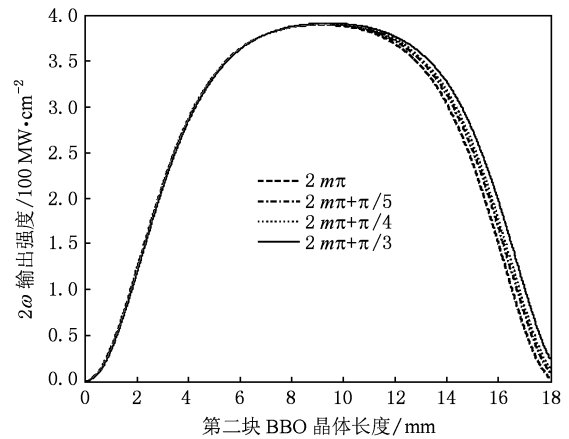


图7 倍频种子光与基频光间初始相位差变化时倍频光强随第二块晶体长度变化情况

表2 倍频种子光与基频光间初始位相差变化时稳定倍频输出参数

相位差 / μrad	最小光强起伏 $2\omega/\%$	最稳 BBO 长度 $2\omega/\text{mm}$	最稳强度 $2\omega/\text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}$	最稳转换比 $2\omega/\%$
0	2.46	12.36	362.28	90.57
$\pi/5$	2.46	12.55	362.32	90.58
$\pi/4$	2.47	12.64	362.6	90.65
$\pi/3$	2.47	12.85	362.84	90.71

4. 结 论

级联倍频实现稳定倍频输出方法的实际内涵为: 第一块倍频晶体进行弱倍频效应, 所产生的倍频光作为种子光和剩余基频光在第二块倍频晶体内作用, 实现稳定倍频输出. 理论分析表明能通过调节 θ_{in1} 和两倍频晶体之间距离对系统稳定倍频输

出状态进行调谐. 模拟计算结果进一步表明: 通过对第一块倍频晶体中波矢方向 k 与光轴间的夹角进行仔细调节, 可以调节第一块倍频晶体输出倍频种子光的强度, 从而对第二块晶体倍频光最稳输出时所需倍频晶体长度及倍频输出状态进行调谐; 随着倍频种子光强的增大, 第二块晶体倍频光最稳输出时所需倍频晶体长度减小, 稳定性提高, 稳定输出

时基准光强的倍频效率稍有下降; 倍频稳定输出时能将 15% 的基频光强起伏减小至 3% 左右, 且倍频效率可保持为 90% 左右; 通过对两倍频晶体之间间隔进行微调, 改变倍频种子光和基频光间的初始相位差, 调节最稳倍频输出时所需的第二块倍频晶体长度, 且这种调节对输出倍频光的稳定性和倍频效率的影响很小.

- [1] Liu H G, Zhang R B, Zhang H Q, Zhu C, Ma J, Wang Q Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4635 (in Chinese) [刘华刚、章若冰、张海清、朱晨、马晶、王清月 2007 物理学报 **56** 4635]
- [2] Liu H G, Zhang R B, Zhu C, Cai L, Wang Q Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **57** 2981 (in Chinese) [刘华刚、章若冰、朱晨、柴路、王清月 2008 物理学报 **57** 2981]
- [3] Zeng S G, Zhang B 2009 *Acta Phys. Sin.* **59** 2476 (in Chinese) [曾曙光、张彬 2009 物理学报 **58** 2476]
- [4] Zhang S K, Fujita M, Yamanaka M. 2000 *Opt. Commun.* **184** 451
- [5] Liu H J, Chen G F, Zhao W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 105 (in Chinese) [刘红军、陈国夫、赵卫 2004 物理学报 **53** 105]
- [6] Deng Q H, Peng H S, Li M Z, Ding L, Wang J J, Tang J, Luo Y M, Lin H H, Lv X J, Wang M Z 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 661 (in Chinese) [邓青华、彭翰生、李明中、丁磊、王建军、唐军、罗亦明、林宏奕、吕新杰、王明哲 2007 中国激光 **34** 661]
- [7] Eimerl D 1987 *IEEE J. Quantum Electron.* QE-**23** 1361
- [8] Smith A V, Armstrong D J, Alford W J 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 122
- [9] Brown M 1998 *Opt. Lett.* **23** 1591
- [10] Yao J Q 1995 *Nonlinear Frequency Conversion and Laser Tuning Technique* (Beijing: Science Press) p70 (in Chinese) [姚建铨 1995 非线性频率转换和激光调谐技术 (北京: 科学出版社) 第 70 页]
- [11] Zhang K C, Wang X M 2005 *Science of Nonlinear Optics Crystal Materials* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [张克从、王希敏 2005 非线性光学晶体材料科学 (北京: 科学出版社)]

Stabilizing second harmonic generation output using cascaded crystals

Deng Qing-Hua[†] Zhang Xiao-Min Ding Lei Tang Jun Xie Xu-Dong Lu Zhen-Hua

Zhao Run-Chang Dong Yi-Fang

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 11 January 2010; revised manuscript received 16 April 2010)

Abstract

Theoretical study and numerical simulation were carried out on the newly proposed way of cascaded second harmonic generation (SHG) to get stable SHG output. The results certify that by way of using cascaded SHG one can obtain stable SHG output. Our results also show that by tuning the angle between \mathbf{k} and the optical axis and the distance between the two SHG crystals, the length of the second SHG crystal for most stable SHG can also be tuned. When the length for most stable SHG is tuned to the real length of the second SHG crystal, stable SHG output was be obtained. Both stable SHG output and high SHG conversion efficiency can be got using this new way, and this will help a lot to design the pumping system for the optical pulse chirped amplifying system.

Keywords: cascaded second harmonic generation, most stable second harmonic generation output, optical pulse chirped amplifier

PACS: 42.65.Sf, 42.79.Nv

[†] E-mail: dqhaj@yahoo.com.cn