

文章编号: 0253-2239(2001)04-394-03

双波长双脉冲激光三次谐波的产生方法

谢建平¹⁾ 陈长水²⁾ 王佩琳²⁾ 吴云霞¹⁾ 孙晓红¹⁾ 明海¹⁾

1), 中国科学技术大学物理系, 合肥 230026
2), 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031

摘要: 提出双波长双脉冲激光产生三次谐波的方法。波长不同的两脉冲激光束由反射使它们合拢后通过两块非线性的 BBO 晶体, 激光脉冲第一次通过 BBO 晶体产生两波长的二次谐波(SHG), 它们由各自的反射镜反射再次通过 BBO 又产生了二次谐波, 这两次产生的二次谐波和基波通过用于产生三次谐波的 BBO 晶体可产生双波长的三次谐波, 它们由 45°斜置的耦合镜输出。文中分析了满足二次谐波和三次谐波的四个相位匹配的条件, 该方法也可用于腔内双波长双脉冲的三次谐波激光的产生, 给出了相应的实验结果。

关键词: 三次谐波; 双波长双脉冲激光; 相位匹配

中图分类号: O437.1 文献标识码: A

双波长双脉冲激光的谐波在监测大气污染的差分吸收激光雷达^[1]、生物分子的激光诱导荧光诊断^[2]以及双波长全息术^[3]等领域中有重要的应用。对于可调谐激光器的单波长输出的谐波产生, 可用腔外谐波方法^[4,5]或腔内谐波方法^[6]。对可调谐激光器的双波长双脉冲输出都采用腔外谐波技术, 让两路波长不同的激光脉冲分别通过各自的非线性晶体产生三次谐波^[7], 或者通过非线性晶体顺次产生二次谐波和三次谐波^[1], 由于先后脉冲的波长不同, 因此非线性晶体在一个脉冲通过后要快速和高精度地调节到另一个取向以满足谐波产生的相位匹配。迄今尚未见只用两块非线性晶体进行双波长双脉冲激光的谐波产生而无需角度快速调节以及腔内双波长的谐波技术的报道。本文介绍双波长双脉冲激光共用两块 BBO 晶体产生三次谐波的方法。

1 原 理

图 1 是双波长双脉冲激光的三次谐波产生的实验光路。可独立调谐、波长分别为 λ_1 和 λ_2 的 Cr: LiSAF 调 Q 脉冲激光束, 由 M_1 、 M_2 和 M_3 镜反射将两束光合拢到两圆形光斑近于相切, 光束先后通过三次谐波和二次谐波的 BBO 晶体, 在二次谐波的 BBO 处产生了双波长的二次谐波, 波长分别为 $\lambda_1/2$ 和 $\lambda_2/2$, 它们由各自的端镜 M_4 和 M_5 反射返回, 基波通过 BBO 又产生二次谐波, 两次产生的二

次谐波和基波通过三次谐波的 BBO 便产生了双波长的三次谐波($\lambda_1/3$ 和 $\lambda_2/3$)。三次谐波和剩余的二次谐波由 45°斜置的耦合镜 M_3 输出, M_1 、 M_2 和 M_4 、 M_5 都是带尖棱(顶角约 35°)的反射镜; M_1 、 M_2 对基波高反射; M_4 、 M_5 对基波和二次谐波为高反射; M_3 对基波高反射, 对二次谐波和三次谐波为高透射。BBO 晶体尺寸都为 8 mm × 8 mm × 6 mm, 用于倍频的晶体切割方向为 $\theta = 26.3^\circ$, $\phi = 0$, 用于三次谐波的晶体为 $\theta = 47.1^\circ$, $\phi = 30^\circ$ 切割。

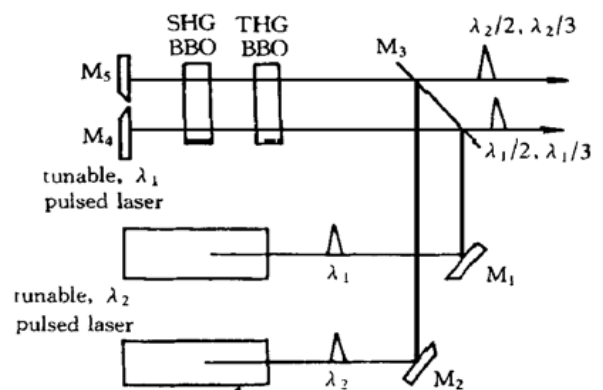


Fig. 1 Optical diagram of SHG, THG for double wavelength and double pulsed laser

当光路中只插入用于产生二次谐波的 BBO 晶体时, 先对较长波长 λ_1 (假定 $\lambda_1 > \lambda_2$) 的激光束调节 BBO 的取向, 使其二次谐波最强, 用 M_4 将其二次谐波和基波按原路返回。调节 M_2 改变波长 λ_2 激光的方向, 让它产生二次谐波并使其最强, 由 M_5 将其二次谐波和基波按原路返回通过 BBO 也两次产生二次谐波, 由 M_3 输出二次谐波。用于二次谐波产

生的 BBO 晶体的光轴取向如图 2 所示, 图中 ox_1 、 oy_1 和 oz_1 为 BBO 晶体的晶轴, oz_1 为光轴, 块状 BBO 晶体的光束入射和出射端面平行于 $x'y'$ 平面。波长 λ_1 和 λ_2 激光束传播方向都在 $x'z'$ 面内并靠近 z' 轴, 与 z' 轴的夹角 θ_{λ_1} 和 θ_{λ_2} 分别为的相位匹配角。入射光束的基波都为 o 光, 振动平行于 y' 轴, 二次谐波 $\lambda_1/2$ 和 $\lambda_2/2$ 都为 e 光, 在 $x'z'$ 平面内振动。

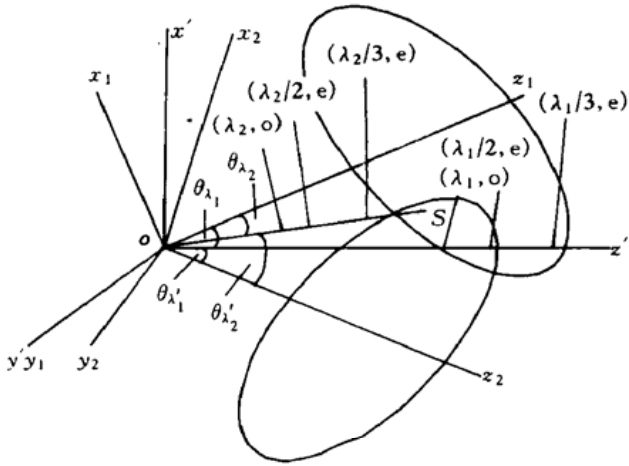


Fig. 2 Diagram of light directions and vibrations in BBO crystals for THG

当光路中插入第二块用于产生三次谐波的晶体时, 调节该晶体先对 λ_1 的光束产生三次谐波, 并使其最强, 再调节 M_2 和 M_4 使波长为 λ_2 的光束产生三次谐波, 并使其最强。这时两块晶体便分别满足 λ_1 和 λ_2 产生二次谐波和三次谐波所需要的四个相位匹配角。

如图 2 所示, oz_2 为产生三次谐波的 BBO 晶体的光轴, ox_2 、 oy_2 是其另外两个晶轴, oz_2 在 $y'z'$ 平面内。若波长 λ_1 的基波沿 oz' 方向行进, oz' 与 oz_1 和 oz_2 夹角分别为波长 λ_1 的二次谐波和三次谐波的相位匹配角 θ_{λ_1} 和 θ'_{λ_1} , 则沿 oz_1 和 oz_2 轴的方向矢量为: $oz_1 = i \sin \theta_{\lambda_1} + k \cos \theta_{\lambda_1}$ 和 $oz_2 = j \sin \theta'_{\lambda_1} + k \cos \theta'_{\lambda_1}$, 其中 i 、 j 、 k 为沿 x' 、 y' 和 z' 的方向矢量, 假定 os 方向为波长 λ_2 的基波行进方向, 它必须满足产生二次谐波的相位匹配角 θ_{λ_2} 和三次谐波的相位匹配角 θ'_{λ_2} , 即在以 oz_1 和 oz_2 为轴线, 顶角分别为 θ_{λ_2} 和 θ'_{λ_2} 的两个圆锥的交线上。可令

$$\begin{aligned} os &= i \sin \theta \cos \varphi + j \sin \theta \sin \varphi + k \cos \theta, \\ \theta &\text{ 为 } os \text{ 与 } z' \text{ 轴的夹角, } \varphi \text{ 是 } os \text{ 在 } x'y' \text{ 面上的方位角} \\ \left. \begin{aligned} os \cdot oz_1 &= \sin \theta \cos \varphi \sin \theta_{\lambda_1} + \cos \theta \cos \theta_{\lambda_1} = \cos \theta_{\lambda_2}, \\ os \cdot oz_2 &= \sin \theta \sin \varphi \sin \theta'_{\lambda_1} + \cos \theta \cos \theta'_{\lambda_1} = \cos \theta'_{\lambda_2}. \end{aligned} \right\} (1) \end{aligned}$$

θ 角所满足的方程为:

$$\begin{aligned} &\cos^2 \theta \left[1 + \frac{\cos^2 \theta_{\lambda_1}}{\sin^2 \theta_{\lambda_1}} + \frac{\cos^2 \theta'_{\lambda_1}}{\sin^2 \theta'_{\lambda_1}} \right] - \\ &2 \cos \theta \left[\frac{\cos \theta_{\lambda_1} \cos \theta_{\lambda_2}}{\sin^2 \theta_{\lambda_1}} + \frac{\cos \theta'_{\lambda_1} \cos \theta'_{\lambda_2}}{\sin^2 \theta'_{\lambda_1}} \right] + \\ &\left[\frac{\cos^2 \theta_{\lambda_2}}{\sin^2 \theta_{\lambda_2}} + \frac{\cos^2 \theta'_{\lambda_2}}{\sin^2 \theta'_{\lambda_2}} - 1 \right] = 0. \quad (2) \end{aligned}$$

由(1)式和(2)式可解出 θ 和 φ , 例如对于 $\lambda_1 = 900.18 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 897.9 \text{ nm}$, 用 BBO 晶体产生二次谐波和三次谐波的相位匹配角分别为

$$\begin{aligned} \theta_{\lambda_1} &= 26.0626^\circ, & \theta_{\lambda_2} &= 26.1222^\circ, \\ \text{和 } \theta'_{\lambda_1} &= 47.0147^\circ, & \theta'_{\lambda_2} &= 47.1688^\circ, \end{aligned}$$

可解得 θ 为

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 0.1650^\circ, & \varphi_1 &= 111.0175^\circ, \\ \text{和 } \theta_2 &= 48.0988^\circ, & \varphi_2 &= 24.3503^\circ. \end{aligned}$$

对于第 1 组解, os 和 oz_1 所在平面与 $x'z'$ 面的夹角为 0.3498° , os 和 oz_2 所在平面与 $y'z'$ 面的夹角为 0.055° , 这样波长 λ_2 的基波在二次谐波晶体和三次谐波晶体中便可分别看作 o 光和 e 光, 所产生的二次谐波在三次谐波的 BBO 晶体则为 o 光, 而不会产生光振动方向的分解, 可有较高效率产生二次谐波和三次谐波。对于第 2 组解, os 和 oz_1 所成平面与 $x'y'$ 面的夹角为 58.0766° , os 和 oz_2 所在平面与 $y'z'$ 面的夹角为 48.2270° , 波长 λ_2 沿 y' 振动的基波光在二次谐波晶体中分解成 o 光的分量和在三次谐波晶体中分解成 e 的分量的能量约为其入射能量的一半, 这组情况所产生的谐波将很小, 应舍去。

2 实验和结果

为了提高谐波效率, 将图 1 所示的光路置于两路氙灯抽运调 Q 的 Cr: LiSAF 激光器^[8]的腔内, 即 M_4 和 M_5 分别作为波长 λ_1 和 λ_2 激光器一端的平面腔镜, 两路激光器的另一端都是 $R = 4 \text{ m}$ 的球面镜, 转动球面腔镜使基波波长分别调谐在 $\lambda_1 = 900.18 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 897.9 \text{ nm}$ 。当每路抽运能量为 60.5 J 时, 腔内基波脉冲能量约 31 mJ 。插入第一块 BBO 晶体进行二次谐波实验, 每个波长的二次谐波输出脉冲能量为 10.2 mJ (AC15/5 型能量指示计), 二次谐波效率超过 30% , 脉宽为 43 ns (Tektronix TDS 520D 示波器), 两个二次谐波脉冲的时序可交换, 其间隔可在数十微秒和很大范围内调节, 两个二次谐波可在 448.1 nm 和 465.1 nm

(WDS-3 单色仪) 之间独立调谐。插入第二块 BBO 晶体, 按前述的调整方法获得了双波长双脉冲的三次谐波, 由 M_3 镜输出。图 3 是抽运能量为 84.5 J 时三次谐波的调谐曲线。在短波端各波长的三次谐波脉冲能量达 0.7 mJ, 基波转换成三次谐波的效率大于 2%, 它们的波长可在 296.8 nm 至 306.1 nm 的范围内调谐。由图可见当三次谐波的波长超过 303 nm 时脉冲能量下降较快, 这是由于这时的基波波长大于 900 nm 已远离了 Cr: LiSAF 晶体荧光的中心波长, 增益变得较小所致。所输出的双波长双脉冲的二次谐波和三次谐波光脉冲已在有合作目标的差分吸收激光雷达中用于检测大气中的 NO_2 和 SO_2 污染物的实验研究, 所获初步结果较为满意。

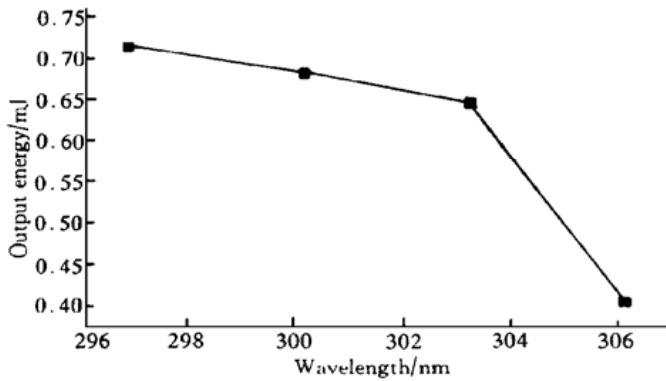


Fig. 3 THG output vs wavelength (pump energy: 84.5 J)

结论 本文用两块 BBO 晶体产生双波长双脉冲激光的三次谐波, 该方法也可用于腔内的三次谐波产

生; 该方法不仅可用于 Cr: LiSAF 激光器, 也可用于其它可调谐激光器, 如 Ti: Al_2O_3 等激光器。理论分析表明在两块 BBO 晶体中产生二次和三次谐波的四个相位匹配条件可以满足。实验上获得的双波长双脉冲的三次谐波的激光脉冲能量达 0.7 mJ, 脉宽 43 ns, 300 nm 附近的调谐范围为 10 nm。该方法产生的双波长双脉冲谐波激光可用于差分吸收激光雷达, 生物分子荧光诊断和双波长全息术等领域。

参 考 文 献

- [1] Wolf J P. 3-D monitoring of air pollution using mobile "all-solid state" lidar System. *Optics & Photonics News*, 1995, 6(1): 27~ 29
- [2] Prasad C R, Hwang I H, Fromzed V. A compact diode pumped, tunable, two wavelength, micropulse Cr: LiSAF laser. OSA Trends in optics and photonics series, Vol. 10, *Advanced Solid State Lasers*, Washington, DC: Opt. Soc. Am., 1997. 174~ 176
- [3] 阮双琛, 候 洵, 王水才. 双波长掺铬氟化铝铯锂激光器. *光子学报*, 1996, 25(8): 767
- [4] Pinto J F, Esterowitz L. Unstable Cr: LiSAF laser resonator with a variable reflectivity output coupler. *Appl. Opt.*, 1998, 37(5): 3272~ 3275
- [5] Zenzie H H, Isyanova Y. High-energy, high-efficiency harmonic generation from a Cr: LiSrAlF6 laser system. *Opt. Lett.*, 1995, 20(2): 169~ 171
- [6] 孟红祥, 何良芳, 余 锦 等. 激光二极管泵浦的 Cr: LiSAF 二次谐波产生获得可调谐蓝色激光输出. *光学学报*, 1999, 19(7): 877~ 879
- [7] Fredriksson K, Galle B, Nystrom K *et al.*. Mobile lidar system for environmental probing. *Appl. Opt.*, 1981, 20(24): 4181~ 4189

Method for Third Harmonic Generation of Double Wavelength and Double Pulse Laser

Xie Jianping¹⁾ Chen Changshui²⁾ Wang Peilin²⁾ Wu Yunxia¹⁾ Sun Xiaohong¹⁾ Ming Hai¹⁾

1), Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

2), Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

(Received 21 January 2000; revised 20 March 2000)

Abstract: The method for third harmonic generation of double wavelength and double pulse laser is proposed. Two pulsed laser beams with different wavelengths are reflected to make them near close and passing through two BBO crystals. Two wavelength second harmonics (SH) of laser pulses are generated after two times passing through the BBO of SHG. SHs and laser fundamental waves pass through the BBO of third harmonic generation (THG) to obtain two wavelength THGs, and couple out by 45° output mirror. The four phase matching conditions are analyzed to be satisfied in SHG and THG. This method can be used to intracavity THG of double wavelength and double pulse laser. The corresponding experimental results are given.

Key words: third harmonic generation; double wavelength and double pulse laser; phase matching