

文章编号: 0258-7025(2001)11-0988-03

位相调制三倍频激光束聚焦特性的衍射模型*

顾震 詹庭宇 朱宝强 王韬 钱列加

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

摘要 基于三次谐波转换过程中位相扰动的传输变换,理论上研究了非线性晶体表面周期性纹波对三倍频激光束聚焦特性的影响,建立了多级衍射模型。该理论模型能解析地分析多级衍射峰的强度分布及角度分布,可为高功率激光驱动器三倍频器的设计提供理论依据。

关键词 谐波转换,表面纹波,衍射

中图分类号 O 436.1 文献标识码 A

Diffraction Model on Focusing Properties of Phase-modulated Third Harmonic Beams

GU Zhen ZHAN Ting-yu ZHU Bao-qiang WANG Tao QIAN Lie-jia

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract Based on the transform of phase aberrations in third harmonic generation, the focusing properties of third harmonic beam with nonlinear crystals having periodic surface ripples were theoretically investigated. A diffraction model has been developed, which can analytically calculate the intensity and angular distributions of multi-diffraction orders. It provides the design criteria for the third harmonic generation of high-energy laser drivers.

Key words harmonic conversion, surface ripples, diffraction

1 引言

激光束的谐波转换是获得短波长和可调谐激光的有效方法,自1961年Franken等^[1]首次观察到激光的倍频现象以来,人们对此已作了广泛的研究,包括平面波和高斯光束等各类光束的谐波转换^[2,3]及最近的飞秒脉冲的谐波转换^[4,5]。这些研究工作所关心的物理量是谐波转换效率,对于理想的长脉冲均匀光束,转换效率可以超过80%。然而对于许多激光应用,需要了解谐波光束空间特性激光束质量的信息。例如高能大口径钎玻璃激光驱动器不仅要求三倍频激光束保持一定的光束质量,而且对于高频成分(聚焦傍斑)具有严格要求^[6]。因此,三倍频激光束聚焦特性的研究是重要且必要的。A. V. Smith等研究了高斯光束经倍频后光束质量 M^2 因子及谐波光束的指向性及波面特性^[7],而D. Eimerl等研究了光束位相调制对三倍频效率的影

响^[8]。考虑到实际大口径高能钎玻璃激光束具有一定的非均匀性(振幅和位相),钱列加和邓锡铭建立了三倍频激光束特性传输变换的近似模型^[9],其重要结论是三倍频激光的光束质量将变差($M_{3\omega}^2 \cong 3M_{\omega}^2$),但其光束发散角保持不变($\Delta\theta_{3\omega} \cong \Delta\theta_{\omega}$)。对于高能大口径钎玻璃激光的物理实验应用来讲,需要了解三倍频激光束聚焦光斑形态的细节,特别是要明确具有严重危害的空间高频成分含量。导致聚焦光斑高频分量的主要因素是光束小尺度位相调制(畸变),具体地在三倍频情况中,大口径非线性KDP晶体金刚石车床加工所附带的周期性表面纹波(如图1所示)是影响三倍频光束高频分量的主要来源。对此,本文将从三倍频激光束振幅和位相传输变换特性出发,建立研究三倍频光束空间高频成分的多级衍射模型。它可以解析地分析因基波激光位相调制所产生的三倍频光束各级衍射光分量,为晶体表面加工要求提供理论依据。最后,该理论解析模型的正确性由基于严格的非线性耦合波方程的数值模拟计算得到验证。

* 国家高技术 863-416-5-1 资助课题。

收稿日期:2000-08-01;收到修改稿日期:2000-11-08

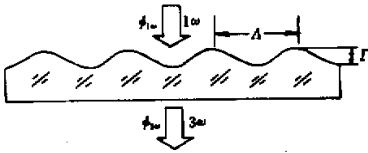


图1 具有周期为 Δ , 幅度为 Γ 的三倍频晶体表面调制波纹示意图, 光束相位为 $(\phi_{1\omega}$ 和 $\phi_{3\omega})$

Fig.1 Schematic diagram of the third harmonic crystals with surface ripples. The Period Δ and amplitude Γ of ripples are also shown as well as the beam phases $(\phi_{1\omega}$ and $\phi_{3\omega})$

2 多级衍射模型的建立

在能大口径玻璃激光系统中, 由于应用了多级空间滤波器, 基波光束的高频振幅和位相畸变基本不存在。三倍频器中非线性晶体表面纹波将是产生三倍频光束空间高频成分的主要因素, 光束经表面形畸变的介质将直接遭受到位相畸变。如果是基波光束首先遭受到这样的位相畸变, 则三倍频光束最终也会通过谐波转换过程间接感受到相应的位相畸变。文献[9]已经讨论过三倍频过程中位相畸变的传输变换

$$\phi_{3\omega}(x) = 3\phi_{1\omega}(x) \quad (1)$$

上式在忽略倍频及混频过程的波矢失配 ($\Delta K_{3\omega} = \Delta K_{1\omega} = 0$) 时成立, 并假定位相调制沿 x 轴方向。如果晶体表面具有周期为 Δ , 幅度为 Γ 的正弦型调制纹波, 基波光束将遭受到一位相畸变 $\phi_{1\omega}(x)$

$$\phi_{1\omega}(x) = 2\pi\Gamma/\lambda_{1\omega} \sin^2(\pi x/\Delta) \quad (2)$$

式中 $\lambda_{1\omega}$ 为介质中基波光束波长, $\lambda_{1\omega} = \lambda_{1\omega}(0)/n_{1\omega}$, $\lambda_{1\omega}(0)$ 是光波在真空中的波长, 光束经过晶体传输具有横向分布的光程 $L(x) = n_{1\omega}\Gamma \sin^2(\pi x/\Delta)$, 因此, 结合等式(1)和(2), 三倍频光束将感应到周期性位相调制

$$\phi_{3\omega}(x) = 2\pi\Gamma(\lambda_{1\omega}/3) \sin^2(\pi x/\Delta) \quad (3)$$

由于 $\lambda_{3\omega} \approx \lambda_{1\omega}/3$, 等式(3)表明了一个很有意义的结论: 无论三倍频光束是直接遭受到源于晶体表面畸变的位相调制, 还是基波光束首先遭受到位相调制再经三倍频过程(包括倍频及混频)间接感应给三倍频光束, 最终三倍频光束将具有相同的位相调制。因此对于实际应用来说, 不必区分晶体表面畸变是在哪个表面, 而只需关心晶体总的表面畸变。

分析了三倍频光束感应到的位相调制以后, 就

可以讨论三倍频光束的空间高频成分。对于实际加工的晶体表面调制量 Δ ($\sim 3-10$ mm) 及 Γ (≤ 10 nm) 的典型值, 光束位相调制几乎不影响三倍频效率 η 。因此三倍频光波的振幅保持不变 ($|E^{3\omega}(x, y)| = |E_0^{3\omega}(x, y)|$, 其中 $E_0^{3\omega}(x, y)$ 表征理想晶体表面对应的三倍频光波):

$$E^{3\omega}(x, y) = E_0^{3\omega}(x, y)e^{i\phi_{3\omega}(x)} \quad (4)$$

对式(4)进行泰勒展开(弱畸变假定成立), 可以方便地处理光束高频成分

$$E^{3\omega}(x, y) = E_0^{3\omega}(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi\Gamma}{\lambda_{3\omega}} \cos(2\pi x/\Delta)\right] =$$

$$E_0^{3\omega}(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi\Gamma}{2\lambda_{3\omega}} (e^{i2\pi x/\Delta} + e^{-i2\pi x/\Delta})\right] \approx$$

$$E_0^{3\omega}(x, y) \exp\left[1 - \frac{i\pi\Gamma}{2\lambda_{3\omega}} (e^{i2\pi x/\Delta} + e^{-i2\pi x/\Delta}) - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi\Gamma}{2\lambda_{3\omega}}\right)^2 (e^{i4\pi x/\Delta} + e^{-i4\pi x/\Delta}) + \dots\right] \quad (5)$$

上式中忽略了位相的常数项(对光束没有任何影响)。相对于理想晶体表面情况的三倍频光波 $E_0^{3\omega}(x)$, 晶体表面纹波将使三倍频光束具有高频成分, 这些高频成分对应由周期性位相调制构成的位相光栅的多级衍射峰。具体地各级衍射峰(第 n 级)相对零级峰的强度及相应的角谱域位置为

$$\theta_x(\pm N) = \pm \frac{N\lambda'_{3\omega}}{\Delta} \quad (6a)$$

$$I(\pm n) = \left(\frac{1}{n!}\right)^2 \left(\frac{\pi\Gamma}{2\lambda_{3\omega}}\right)^{2n} \quad (6b)$$

这里 $\lambda'_{3\omega}$ 是真空中三倍频光波长 ($\lambda_{3\omega} = \lambda'_{3\omega}/n_{3\omega}$)。各级衍射峰的形状和理想晶体表面情况下三倍频光的聚焦光斑形状(由 $E_0^{3\omega}(x, y)$ 确定)一致。另外在上述多级衍射模型的建立过程中, 我们采用了弱畸变近似, 即 $\pi\Gamma/\lambda_{3\omega} \ll 1$, 对玻璃激光而言 ($\lambda_{3\omega} \approx 351$ nm/1.5 ≈ 234 nm), 弱畸变近似要求表面纹波幅度 $\Gamma \ll 75$ nm。

为验证上述多级衍射模型的正确性, 我们针对描述三倍频过程的非线性耦合波方程直接进行数值模拟计算(图2)。耦合波方程中计入了实际存在的晶体走离角(walk-off angle)影响, 它将导致 $+n$ 级衍射峰和 $-n$ 级衍射峰幅度略有差异。另外, 为清楚地显示多级衍射峰, 图2(b)表示的是光波振幅并同时以对数坐标表示。晶体表面由于畸变将最终使三倍频光具有位相调制, 若对应图2数值计算所采用的典型参数, 晶体表面的纹波将使三倍频光具有高频成分, 其对应着由周期性位相调制构成的位相光

栅的多级衍射峰。模拟计算证实了多级衍射模型的正确性:1) 各级衍射峰的位置及强度可由(6)式很准确地确定,2) 各级衍射峰形状相似,我们的衍射模型不能提供衍射峰具体形状的信息。另外,模拟计算同时也表明三倍频光束的发散角($\Delta\theta_{3\omega}$)和基波激光相当($\Delta\theta_{3\omega} \cong \Delta\theta_{1\omega}$),而三倍频激光的光束质量将是基波激光的三倍,和文献[9]的结论一致。

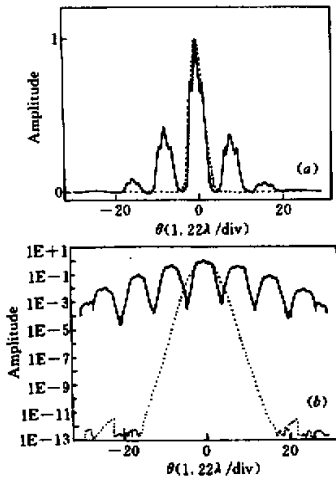


图2 根据耦合波方程数值计算,具有表面调制纹波幅度为 $\Gamma = 40$ nm,周期为 $\Lambda = 5$ mm的三倍频晶体的三倍频光强度随角度分布图(实线)及输入基频波聚焦特性图(虚线)。为清楚显示多级衍射峰,图2(b)为半对数图,所用参数为:基波光斑直径250 mm(6级超高斯),功率密度 2 GW/cm^2 ,Ⅱ类-Ⅱ类匹配方式(KDP晶体厚度为11.5 mm)

Fig. 2 Amplitude distribution of third harmonic beam in angular domain with surface ripples for $\Gamma = 40$ nm and $\Lambda = 5$ mm was calculated by numerically simulation based on the nonlinear coupled wave equations (Solid curve). The focusing profile of input fundamental beam is also shown (dotted curve). In order to show the multi-diffraction orders clearly, a semi-log plot is given in Fig. 2(b). Parameters used in the simulation: fundamental beam diameter 250 mm (Super-Gaussian profile with order of 6), intensity 2 GW/cm^2 , third harmonic conversion configuration Type II/Type II (KDP crystals with equal thickness 11.5 mm)

解析表示的多级衍射模型较基于非线性耦合波方程的数值模拟计算能更简单地分析三倍频光束的高频成分。作为应用实例,在此简单地分析一下“神光Ⅱ”钕玻璃激光装置对三倍频器晶体的加工要求。

对 $\phi 250$ mm口径的“神光Ⅱ”激光束而言,物理试验要求严格控制约 $150 \mu\text{rad}$ (相当于基波光束30倍衍射极限)的高频成分强度小于中央峰值的 10^{-6} ,根据衍射模型(6)式,可以得出对晶体表面纹波的要求:1) 对于一级衍射峰位于危害 $150 \mu\text{rad}$ 处($\Lambda = 2.34$ mm),纹波幅度 Γ 应小于 0.15 nm;2) 对于二级衍射 $\Lambda = 4.68$ mm,要求 $\Gamma < 6.7$ nm;3) 对于三级衍射 $\Lambda = 7.02$ mm, $\Gamma < 27$ nm。

根据上述研究结果,针对“神光Ⅱ”倍频系统所用KDP晶体提出表面加工的最低要求,在国内现有加工条件下,加工晶体正好符合我们的最低要求($\Lambda \approx 13$ mm, $\Gamma \approx 30$ nm),利用此晶体,三倍频转换效率达 $\sim 70\%$,三倍频能量400 J左右的穿孔率(380 nm,对应于约30倍衍射极限)达到90%以上。实验晶体表面加工的上述尺度的纹波对转换效率影响不大,在光束质量方面三倍频的远场焦斑尺寸比基频焦斑稍小,此结果直接验证了理论分析的正确性。

致谢 作者感谢林尊琪、徐德衍研究员、范滇元院士等的有益讨论。

参 考 文 献

- 1 P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters. Generation of optical harmonics. *Phys. Rev. Lett.*, 1961, 7(1):118-123
- 2 G. D. Boyd, D. A. Kleinman. Second harmonic generations of Gaussian laser beams. *J. Appl. Phys.*, 1968, 39(13):3597-3618
- 3 A. K. Cousins. Power conversion efficiency in second harmonic generation with nonuniform beams. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, 29(1):217-226
- 4 R. C. Eckardt, J. Reintjes. Phase matching limitations of high efficiency second harmonic generation. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, QE-20(10):1178-1187
- 5 M. H. Dunn, M. Ebrahimzaden. Parametric generation of tunable light from continuous wave to femtosecond pulses. *Science*, 1999, 286(11):1513-1517
- 6 S. Skupsky, K. Lee. Uniformity of energy deposition for laser driven fusion. *J. Appl. Phys.*, 1983, 54(7):3662-3669
- 7 Arlee V. Smith, Mark S. Bowers. Phase distortions in sum-and difference-frequency mixing in crystals. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, 12(1):49-57
- 8 D. Eimerl, J. M. Auerbach. Paraxial wave theory of second and third harmonic generation in uniaxial crystals. I. Narrow band pump fields. *J. Mod. Opt.*, 1995, 42:1037-1067
- 9 Qian Liejia, Deng Ximing. Approximate model on transform of beam characteristics in frequency tripling. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1996, 16(9):1223-1226