

文章编号: 1001-3806(2013)01-0072-05

聚焦激光在 KDP 晶体中的传输特性模拟

邓磊敏 段 军* 杨 焕 杜 敏

(华中科技大学 光电子科学与工程学院 武汉光电国家实验室 武汉 430074)

摘要: 激光在 KDP 晶体中制作 3 维微结构是抑制高功率激光驱动器中横向受激喇曼散射效应的一种有效方法。为了解激光制作微结构的可行性以及激光参量对制作精度、效率和成品率的影响,对聚焦激光在 KDP 晶体中的传输特性进行了数学模拟研究。激光焦点峰值功率密度、光斑畸变和位置偏移是影响制作精度和造成晶体碎裂的主要因素;e 光焦点形貌会随着晶体光轴与入射激光的夹角增大而发生畸变,其峰值功率密度随着夹角的增大而迅速减小。结果表明,当夹角小于 15° 时,e 光焦点可使加工效率提升 1 倍以上;当夹角大于 30° 时,低能量加工其影响可忽略,高能量加工则极易造成晶体碎裂,应对 e 光进行屏蔽。

关键词: 激光技术;传输特性;数值模拟;KDP 晶体

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.01.018

Simulation of transmission characteristics of focused laser inside KDP crystal

DENG Lei-min, DUAN Jun, YANG Huan, DU Min

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Laser producing 3-D microstructures inside KDP crystals is an effective way to suppress the transverse stimulated Raman scattering (TSRS) effect in high power lasers. The transmission characteristics of focused laser inside KDP crystal was simulated to investigate the feasibility of laser making 3-D microstructures and the effects of laser parameters on the machining accuracy, efficiency and success rates. The effects of the focus peak power density, spot distortion and the migration are the main factors affecting the machining accuracy and causing crystal fragmentation. The size and shape of the e-polarization focus will distort and its peak power density decreases rapidly with the increasing of angle between incident laser and crystal optical axis. The results show that the effect of the e-polarization laser will increase the processing efficiency more than twice when the angle is less than 15° and can be neglected in the low-energy or cause crystal fragmentation easily in high-energy when the angle is greater than 30° .

Key words: laser technique; transmission characteristics; numerical simulation; KDP crystal

引 言

近年来,随着地球能源的短缺和激光惯性约束核聚变系统拥有广阔的应用前景,各国都相继建立起大型激光驱动装置^[1-2]。在这些激光装置中,都使用了大量大口径 KDP 晶体制成的 Pockels 盒以及倍频器件^[3]。随着激光功率的提升,KDP 晶体中的各种非线性光学效应显著呈现,其中横向受激喇曼散射(transverse stimulated Raman scattering, TSRS)是一种显著限制 3ω 激光脉冲强度的非线性效应^[4-7]。当驱动器在

整形长脉冲下运行时,由于 3ω 光与晶体的作用时间延长和 TSRS 效应产生的 Stokes 光在晶体中横向传播的距离增加,都会导致 Stokes 光的增益大幅提高,其光强较强时会造成晶体损伤^[8]。减弱或消除 KDP 晶体中 TSRS 效应的有效方法之一,是利用激光在 KDP 晶体内制作一种 3 维微结构的光隔层,减少 Stokes 光在晶体中的横向传播距离^[9]。

KDP 是典型的超脆性双折射晶体,对激光的抗损伤阈值很高,激光加工难度较大,效率很低。并且大尺寸 KDP 晶体非常珍贵,聚焦激光会在晶体内发生双折射形成多个焦点,影响微结构制作精度,经常造成晶体碎裂报废。目前,国内外关于聚焦高斯激光在晶体中的传输特性的研究鲜有报道,数学模拟研究聚焦激光在双折射晶体中的传输特性,从理论上计算激光参量对微结构制作精度、效率和成品率的影响具有十分重要的工程价值。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175205);华中科技大学自主创新研究基金资助项目(2011TS057)

作者简介:邓磊敏(1988-),男,博士研究生,主要从事超快激光微加工方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: duans@mail.hust.edu.cn

收稿日期:2012-05-15;收到修改稿日期:2012-05-21

1 光传输特性数值模拟原理与方法

1.1 模型建立原理

激光入射到双折射晶体中将会产生寻常光 o 光和非寻常光 e 光 e 光在 KDP 晶体内传输特性复杂,传统的斯涅耳 (Snell) 定律不再适用。本模型采用光波动理论的惠更斯-菲涅耳原理求解光波在双折射晶体界面上的折射。

在单轴晶体中 $n_1 = n_2 = n_o, n_3 = n_e \neq n_o$, 因此其折射率椭球方程为:

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (1)$$

可以导出其射线曲面为:

$$\left(\frac{1}{n_e}\right)^2 + \left(\frac{1}{n_o}\right)^2 + \left(\frac{1}{n_o}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

激光射入晶体后,就要按晶体所规定的方式分成取向不同的两种特殊的偏振态。 o 光偏振态在晶体中沿各个方向传播时折射率相同,在晶体中产生球面波 Ω_3 , 如图 1 所示,过 A' 作球面 Ω_3 的切平面 S_1 可确定 o 光的出射方向。对于 e 光,其在 A 点产生的次波沿任一方向的折射率都不相同,在晶体中形成如 (2) 式所示的波阵面,并随着晶体光轴的取向偏转而形成椭球面波 Ω_2 。过 A 点作椭球面 Ω_2 的切平面 S_2 可确定 e 光的出射方向,其切点不一定在图 1 所示的平面内,所以出射方向一般不在入射面内。

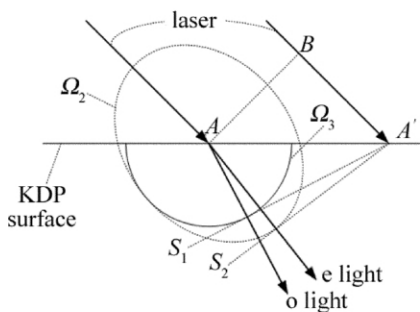


Fig. 1 Schematic diagram of Huygens' construction

1.2 模型建立及计算方法

设入射激光功率为 P , 聚焦透镜焦距为 f 。扩束后的激光光斑半径为 $w(z)$, 将其沿径向分成 N 段, 对于分割形成的第 n 个圆环 r_n , 又可沿角向将其分割成 $M = 6n + 1$ 段, 于是整个激光光斑被分割成许多个小块, 如图 2 所示。径向上第 n 块、角向上第 m 块 Q_{nm} 携带的能量为:

$$P_{nm} = \frac{2P}{\pi} \int_{\frac{2m\pi}{6n+1}}^{\frac{2\pi(m+1)}{6n+1}} d\theta \int_{\frac{2m\pi}{6n+1}}^{\frac{2(n+1)\pi}{6n+1}} \frac{1}{w^2(z)} \times$$

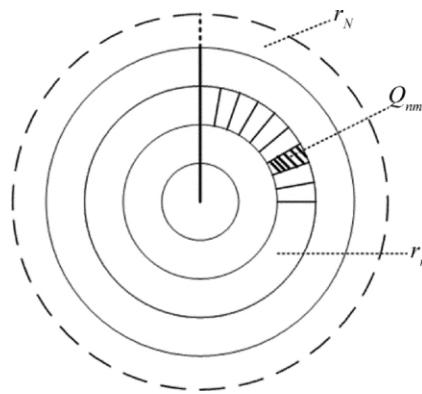


Fig. 2 Schematic diagram of spot segmentation

$$\exp\left[-\frac{2\rho^2}{w^2(z)}\right] \rho d\rho \quad (3)$$

以晶体光轴在晶体表面的投影直线为 y 轴, 在晶体内部建立 x, y, z 轴坐标系, 光轴与晶体表面的夹角为 β , 如图 3 所示。对于块 Q_{nm} 入射光与 z 轴的夹角为 θ_r , 入射光在晶体表面的投影与 y 轴的夹角为 θ_{r2} 。可以导出 e 光在晶体内部形成的波阵面的隐式方程为:

$$F = \frac{x^2}{\left(\frac{1}{n_e}\right)^2} + \frac{(y \sin \beta - z \cos \beta)^2}{\left(\frac{1}{n_o}\right)^2} + \frac{(y \cos \beta + z \sin \beta)^2}{\left(\frac{1}{n_o}\right)^2} - 1 \quad (4)$$

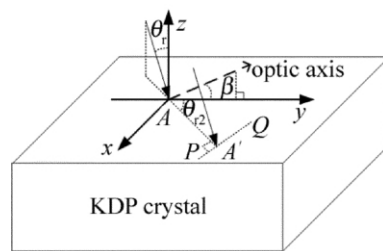


Fig. 3 Schematic diagram of model coordinate

取两光线的光程差为 1, 经过计算可以得出 A' 点的坐标为 $\left(\frac{\sin \theta_{r2}}{\sin \theta_r}, \frac{\cos \theta_{r2}}{\sin \theta_r}, \rho\right)$ 。由此可推出过 A' 点和椭球面上的点 (x, y, z) 的切平面方程为:

$$\frac{\partial F}{\partial x} \cdot \left(\frac{\sin \theta_{r2}}{\sin \theta_r} - x\right) + \frac{\partial F}{\partial y} \cdot \left(\frac{\cos \theta_{r2}}{\sin \theta_r} - y\right) + \frac{\partial F}{\partial z} \cdot (-z) = 0 \quad (5)$$

式中, $\frac{\partial F}{\partial x} = 2xn_e^2, \frac{\partial F}{\partial y} = 2(y \sin \beta - z \cos \beta) n_e^2 \sin \beta + 2(y \cos \beta + z \sin \beta) n_o^2 \cos \beta, \frac{\partial F}{\partial z} = -2(y \sin \beta - z \cos \beta) n_e^2 \cos \beta + 2(y \cos \beta + z \sin \beta) n_o^2 \sin \beta$ 。

由于此切平面的法向量必垂直线段 PQ 的方向向

量,所以有:

$$\frac{\partial F}{\partial x} \cos\theta_{t2} - \frac{\partial F}{\partial y} \sin\theta_{t2} = 0 \quad (6)$$

综合(4)式、(5)式、(6)式3式便可解出光斑第 Q_{nm} 块的 e 光在晶体中的传输方向,而 o 光的传输方向可利用 Snell 定律算出。利用数学计算软件 MATLAB 对整个激光光斑进行计算,可模拟出整个聚焦激光在 KDP 晶体中的传输特性。

2 数值模拟结果及分析

采用上述模型模拟聚焦激光在 KDP 晶体材料中的传输特性。晶体厚度为 12mm,晶体光轴与晶体表面的夹角为 59.1° ,KDP 晶体材料对波长为 355nm 激光的折射率为 $n_e = 1.4858$, $n_o = 1.5311$ 。入射激光为基模高斯光束,偏振比为 1:0.2,总功率为 8W,光斑直径为 15mm,聚焦透镜焦距为 103mm。将激光聚焦到 KDP 晶体的下表面,在离下表面 $50\mu\text{m}$ 处计算得到的光斑图样如图 4a 所示,两光斑中心距离为 $318\mu\text{m}$,e 光光斑偏椭。并采用 355nm 激光对相同尺寸晶体进行了实验,试验结果显示,两光斑中心距离为 $317\mu\text{m}$,实验光斑形貌与模拟数据吻合较好,如图 4b 所示。

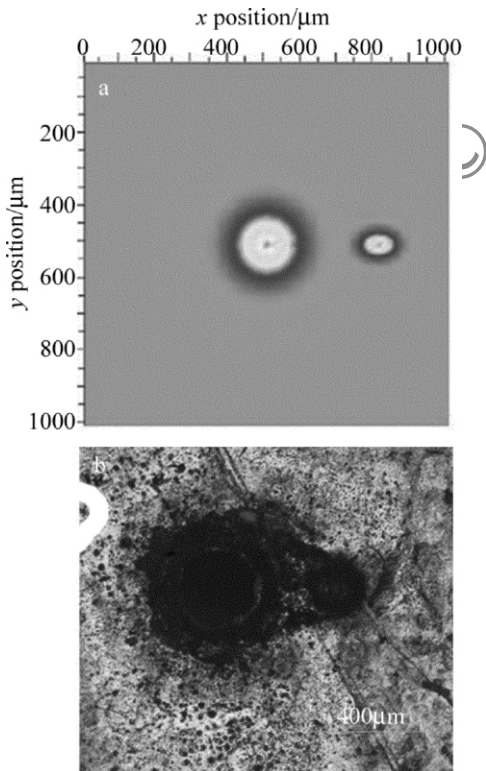


Fig. 4 Contrast of experimental result and simulated result
a—simulated result b—experimental result

利用该模型对超快激光在晶体中制作 3 维微结构进行了模拟。入射激光为脉冲无偏振光,波长为 1064nm,平均输出功率为 1.5W,脉冲宽度为 523ps,重复频率为 2kHz,峰值功率为 1.43MW,光

斑直径为 15mm,晶体厚度为 100mm,聚焦透镜焦距为 45mm,透镜表面距晶体材料表面 15mm。在晶体光轴与入射激光夹角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的情况下,对非寻常光 e 光的焦点位置及偏离情况进行了计算,结果如图 5 所示。

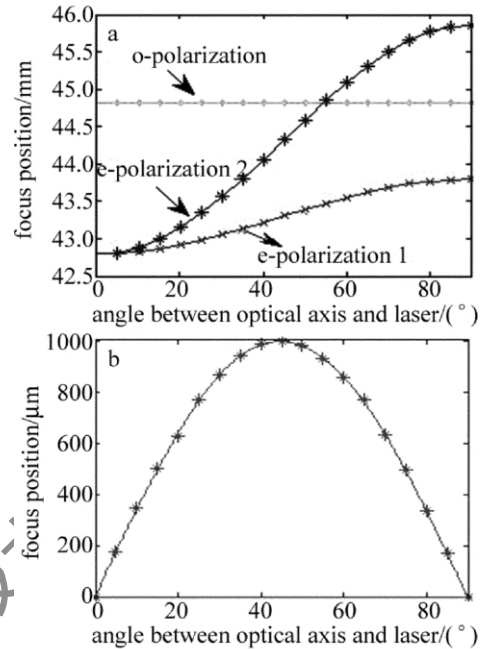


Fig. 5 Relationship of the focus position and the angle between the optical axis and laser

a—focus migration in z direction b—focus migration in y direction

对于 o 光,其焦点 z 轴位置始终位于晶体表面以下 44.819mm 处,如图 5a 所示;而对于 e 光,在晶体光轴与入射激光夹角为 0° 时,晶体光轴对聚焦激光午面和弧矢面的影响相同,从而在晶体表面以下 42.85mm 处形成一个焦点。随着光轴与入射激光夹角的增加,晶体光轴对聚焦激光午面和弧矢面光线的影响出现明显差异,子午面光线受晶体光轴影响较大,而弧矢面光束受晶体光轴影响较小,从而使子午面光束和弧矢面光束分别形成各自焦点。两个焦点之间的距离随着光轴与入射激光夹角的增大而增大,从而导致 e 光焦点渐渐变成椭圆,如图 5a 所示,其中 e-polarization 1 为子午面焦点,e-polarization 2 为弧矢面焦点。图 5b 反映了 e 光子午面焦点位置在 y 方向上受晶体光轴与入射激光夹角的影响,随着晶体光轴与入射激光夹角的增大,e 光子午面焦点在 y 方向上的偏离显示出先增大后减小的趋势,在夹角为 45° 左右时出现最大偏离距离 $984\mu\text{m}$ 。从上述分析可知,e 光随入射激光与晶体光轴夹角变化而产生的位置偏移、焦点分裂和光斑形貌变化是影响微结构制作精度的主要因素。

同时在聚焦透镜焦距为 45mm 时,对 e 光的最大

峰值功率密度进行了模拟运算,结果如图 6 中 e-polarization 所示,其中 o-polarization 为 o 光的峰值功率密度。在晶体光轴与入射激光夹角为 0° 时,e 光焦点具有最大的峰值功率密度,其值约为寻常光焦点的 95%。随着晶体光轴与入射激光夹角的增加,e 光焦点最高峰值功率密度迅速下降,至晶体光轴与入射激光夹角为 30° 时,其值已经低于寻常光焦点的 1/20,造成此现象的主要原因是 e 光焦点的子午面和弧矢面分裂而产生能量耗散。KDP 晶体在 1064nm 处的激光损伤阈值^[3,10]为 $F_{th} = 2.3 \times 10^{16} \text{ W/m}^2$,从图 6 可知,在入射激光与晶体光轴夹角小于 15° 时,非寻常光 e 光具有微加工能力。随着入射激光与晶体光轴夹角的增大,非寻常光 e 光焦点的分裂明显,从而使 e 光产生的微结构在 z 方向上尺寸更大,并与寻常光 o 光在 y 方向上产生一定的偏移,而避免两个偏振光相互遮挡。充分利用 e 光焦点能同时加工多个微结构点,相对于仅使用 o 光加工提升加工效率 100% 以上。

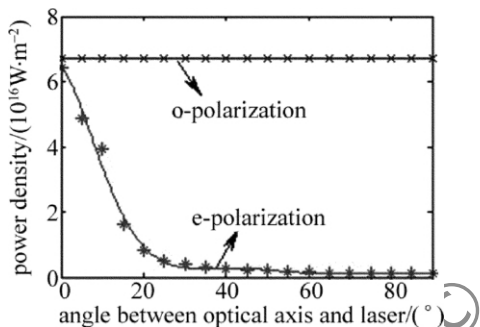


Fig. 6 Relationship of power density and the angle between the optical axis and laser

当入射激光与晶体光轴的夹角大于 30° 时,e 光焦点最高峰值功率密度为 $4.1 \times 10^{15} \text{ W/m}^2$,由此可推出,在入射激光峰值功率小于 5.67MW 的情况下,e 光焦点峰值功率密度始终小于 $\frac{1}{2} F_{th}$,可忽略其对加工的影响。

采用峰值功率更高的激光器虽然能使 e 光焦点产生加工效果,但是此时子午面和弧矢面的 e 光焦点在 z 轴方向上产生了较大距离的偏移,e 光两个焦点畸变成了两个相互正交的线状焦点,如图 7 所示。其形成的两个相互垂直的破坏线在受热后极易使晶体发生碎裂,故在入射激光与晶体光轴夹角较大且激光峰值功率较高时,应对 e 光进行适当屏蔽,以提高微结构加工的安全性及成品率。

在其它条件相同的情况下,模拟计算了聚焦透镜焦距分别为 45mm、50mm、55mm 和 60mm 时 e 光焦点峰值功率密度,如图 8 所示。在晶体光轴与入射激光夹角大于 20° 时,随着聚焦透镜焦距的增加,e 光焦点峰值功率密度变化不大。而晶体光轴与入射激光夹角

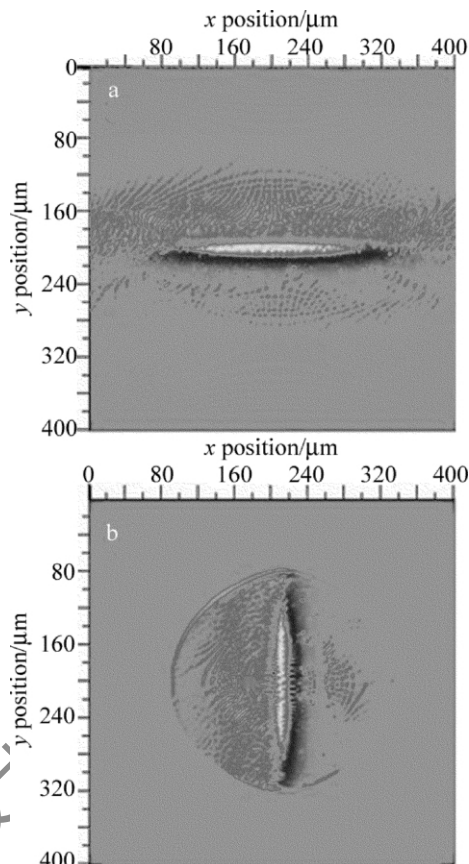


Fig. 7 Spot morphology when angle of optical axis and laser is 30°
a—meridian plane spot morphology of e-polarization b—sagittal plane spot morphology of e-polarization

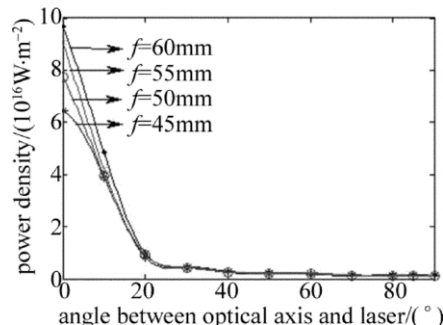


Fig. 8 Relationship between power density and different focal length

小于 20° 时,随着聚焦透镜焦距的增加,e 光焦点等值功率密度呈明显增大趋势。故在利用激光在晶体内部制作 3 维微结构时,采用较长焦距的聚焦透镜能提升 e 光焦点的加工效果。

3 结论

通过对聚焦激光在大尺寸 KDP 晶体中传输特性的数值模拟,作者认为,使用激光在 KDP 晶体中制作 3 维微结构时,激光焦点位置、光斑形貌及峰值功率密度均可以从该数学模型的理论计算得出,利用此模型能有效提高 3 维微结构的加工精度。当晶体光轴与入射激光夹角小于 15° 时,非寻常光焦点的最高峰值功率

密度较大,利用其在 z 轴方向上的焦点分裂和 y 轴方向上的位置偏移能明显地提高微结构的加工效率。当夹角大于 30° 时,在入射激光峰值功率小于 5.67MW 情况下,非寻常光焦点最高峰值功率密度很低,可以忽略其对加工的影响;而在采用飞秒激光器等超快激光器加工较大破坏点的3维微结构时,其输入激光峰值功率往往很大,从而导致 e 光焦点的峰值功率密度大于 F_{th} ,在晶体内部形成两条正交的破坏线,极易造成晶体材料开裂,应对非寻常光进行屏蔽。适当采用较长焦距的聚焦透镜可提高非寻常光焦点的加工效果。

参考文献

- [1] SU G B, ZENG J B, HE Y P, *et al.* Application of large section KDP crystals in the study of laser fusion [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1997, 25(6): 717-719 (in Chinese).
- [2] LINDL J D, ATHERTON L J, AMEDNT P A *et al.* Progress towards ignition on the national ignition facility [J]. *Nuclear Fusion* 2011, 51(9): 094024.
- [3] ZHANG K C, WANG X M. *Nonlinear optical crystal materials science* [M]. Beijing: Science Press, 2005: 117-151 (in Chinese).
- [4] SACKS R A, BARKER C E, ERLICH R B. Stimulated Raman scattering large-aperture, high-fluence frequency-conversion crystals [R]. Washington, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1992, 2(4): 179.
- [5] BARKER C E, SACKS R A, van WONTERGHEM B M, *et al.* Transverse stimulated Raman scattering in KDP [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2633: 501-505.
- [6] BELKOV S A, KONCHEMASOV G C, KULIKOV S M, *et al.* Stimulated Raman scattering in frequency conversion crystal [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2633: 506-512.
- [7] NOVIKOV V N, BELKOV S A, BUIKO S A *et al.* Transverse SRS in KDP and KD^*P crystal [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3493: 1009-1018.
- [8] LI K Y, WEI X F, MA C *et al.* Calculation of stimulated Raman scattering of high power laser driver for ICF inharmonic conversion [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2003, 31(2): 164-168 (in Chinese).
- [9] WANG J. Study on thermal effects and thermal management in high power solid state lasers [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2011: 59-67 (in Chinese).
- [10] WANG K P, FANG CH SH, ZHANG J X, *et al.* Research on laser-induced damage mechanisms of KDP crystals [J]. *Journal of Synthetic Crystals* 2004, 33(1): 48-51 (in Chinese).

版权所有 © 《激光技术》编辑部