

文章编号: 0253-2239(2010)04-1162-06

小尺度波纹对 KDP 光学元件透射比的影响

陈明君¹ 姜 伟¹ 胡建平² 李明全¹

(¹ 哈尔滨工业大学精密工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)
(² 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要 高精度 KDP 晶体是惯性约束核聚变光路系统中的重要元件, 而已加工表面的小尺度波纹对光学元件的透射比有着重要影响。采用傅里叶模方法理论分析了表面小尺度波纹的幅值及周期对 KDP 光学元件透射比的影响。研究表明, 当小尺度波纹幅值小于 100 nm 时, 透射比随波纹幅值的增加基本呈线性增长, 波纹幅值每提高 10 nm, 透射比可提高近 0.5%; 透射比随着小尺度波纹周期的增加围绕中心透射比上下浮动, 透射比振幅基本保持不变, 且中心透射比及透射比振幅均随着小尺度波纹幅值的增加而增大; 小尺度波纹周期在 10.5~12 μm 区间内时透射比明显很低, 需采取措施避免小尺度波纹的周期出现在此区间。对 KDP 晶体进行了加工、表面形貌检测及透射比检测的实验, 实验结果与理论计算结果基本吻合。

关键词 KDP 光学元件; 透射比; 傅里叶模方法; 小尺度波纹

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1162

Effect of Micro-Waviness on Transmittance of KDP Optical Element

Chen Mingjun¹ Jiang Wei¹ Hu Jianping² Li Mingquan¹

(¹ Center for Precision Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
(² Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract High-precision KDP optical element is a key component in ICF optical system. The micro-waviness on the machined KDP surface has a significant impact on its transmittance. The effect of micro-waviness amplitude and period on the transmittance of KDP optical element is discussed by Fourier modal theory. Results indicate that: the transmittance increases linearly as the micro-waviness amplitude grows (about 0.5% per 10 nm) when the micro-waviness amplitude is less than 100 nm; the transmittance varies around the central value while the transmittance amplitude remains unchanged, and both of them increase as the micro-waviness amplitude grows. The transmittance is very low when micro-waviness period is between 10.5 μm and 12 μm, and measures should be taken to avoid micro-waviness period in such range. Processing, detection experiments of morphological surface and transmittance of KDP crystal are carried out, and the experimental results are consistent with the theoretical calculations basically.

Key words KDP optical element; transmittance; Fourier modal method; micro-waviness

1 引 言

在惯性约束核聚变(ICF)光路系统中,KDP 晶体是目前唯一可用于普克尔斯盒和末端激光倍频的非线性晶体材料。然而,由于其具有质软、脆性高、易潮解和易开裂等一系列不利于光学加工的特性,大尺寸、高精度的 KDP 晶体光学元件也是公认的最难加工的光学零件之一^[1,2]。现阶段,国内外加

工此类元件广泛采用单点金刚石铣削技术(SPDT)^[3]。然而,在加工 KDP 晶体表面时,会在沿飞刀铣削轨迹上形成一定的刀痕,即小尺度波纹。小尺度波纹的存在可能给光学元件的透射比造成负面影响,降低激光能量的输出。此外,在采用功率谱密度法来提取已加工表面的空间频率时可以发现,功率谱密度的极大值位置所对应的空间周期与每转

收稿日期: 2009-04-30; 收到修改稿日期: 2009-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(50875066)和国家 863 计划(2009AA044305)资助课题。

作者简介: 陈明君(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事精密超精密加工、纳米技术和 KDP 晶体激光损伤等方面的研究。E-mail: chenmj@hit.edu.cn

进给量非常接近,这说明可以通过控制机床的进给量来控制小尺度波纹空间周期的分布。因此,深入研究小尺度波纹对 KDP 晶体光学元件透射比的影响,不仅可以为提高其光学性能提供理论基础和参数依据,还可以有效地指导加工参数的合理选择。

由于小尺度波纹尺度较小,且所研究区域沿光波传播方向尺度较小(近场),因此标量衍射理论和近似条件不再成立,只能采用基于严格电磁场理论的矢量计算方法^[4,5]。傅里叶模方法的基础是严格的电磁场理论,不作任何的近似和假设,使电磁场严格满足麦克斯韦方程组和边界条件。其基本思想是:将相位调制区的电磁场按本征模式展开,建立起本征矩阵方程,利用边界条件求解本征模式系数,从而求得整个电场的分布^[6]。本文采用傅里叶模方法,深入研究了小尺度波纹的周期及幅值对 KDP 晶体光学元件透射比的影响。

2 物理模型

小尺度波纹的物理模型如图 1 所示,图中给出了小尺度波纹一个半周期的形貌,小尺度波纹截面在 xz 平面, y 方向为小尺度波纹线方向,基底平面垂直 z 轴,沿 x 轴方向周期变化,周期为 T 。计算时波纹形貌用水平多分层形状对其进行拟合,拟合的近似程度与分层数及剖分方法有关^[7]。为便于计算,这里采用阶梯进行剖分处理^[8]。沿 z 轴将所求空间分成 P_0 层,第 1, P_0 层分别为入射、出射空气层,第 $P_0 - 1$ 层为基底层,第 2 ~ $P_0 - 2$ 层为小尺度波纹层,整个小尺度波纹近场分布问题分解为求解分层的非均匀介质场。

小尺度波纹层的相对介电常数 $\epsilon(x)$ 及相对磁导率 $\mu(x)$ 具有周期性 T ,即 $\epsilon(x) = \epsilon(x + T)$, $\mu(x) = \mu(x + T)$,对于第 p 层来说有

$$\epsilon(x)^p, \mu(x)^p = \begin{cases} 1, & x \in (0, T^p) \cup (T - T^p, T) \\ \epsilon_b, \mu_b, & x \in (T^p, T - T^p) \end{cases} \quad (1)$$

式中 T^p 表示第 p 层一个周期内介质与空气分界面的坐标,第 p 层的实际介电常数、磁导率分别为 $\epsilon(x)\epsilon_0, \mu(x)\mu_0$ 。将第 p 层相对介电常数和相对磁导率一起表示为傅里叶模形式为

$$[\epsilon, \mu]^p = [\epsilon_n, \mu_n]^p \exp\left(i \frac{2\pi n}{T} x\right), \quad (2)$$

由几何关系可推出

$$T^p = \frac{T}{2\pi} \arccos[(z^p + z^{p-1} - 1)/a], \quad (3)$$

式中 z^p 代表第 p 层上界面的 z 坐标, a 代表小尺度波纹幅值。由于小尺度波纹带来的介电常数与磁导率的周期性,使得电磁场空间分布也具有周期性,即 $\mathbf{E}(x) = \mathbf{E}(x + T), \mathbf{H}(x) = \mathbf{H}(x + T)$ 。因此,只需在一个周期内讨论电场与磁场的分布情况,对于第 p 层电磁场一起表示为傅里叶模形式为

$$[\mathbf{E}, \sigma\mathbf{H}]^p = \exp(ik_0\alpha_m x) [e_{x_m} \ e_{y_m} \ e_{z_m}, -h_{x_m} \ h_{y_m} \ h_{z_m}]^p \times \exp[ik_0\gamma^p(z - z^p)], \quad (4)$$

式中 $\alpha_m = \alpha_0 + \lambda m/T, m$ 为傅里叶模编号, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M, \dots, \gamma^p$ 为待求值,与第 p 层波数的 z 分量有关, $\alpha_0 = \sin \theta, \theta$ 为入射光与 z 轴夹角^[9]。

每一分层中的电磁场满足麦克斯韦方程组

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}. \quad (5)$$

考虑到小尺度波纹层在 x 方向上一个周期内两种介质的结合部的连续性,利用傅里叶因式分解“逆规则”原理^[10],将(2)式,(4)式代入(5)式,可得 TE 波的本征方程:

$$\begin{cases} \mathbf{A}e_y = e_y\gamma^2, \\ h_x = \mu e_y\gamma, \quad h_z = \mu^{-1}\alpha e_y, \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{A} = \boldsymbol{\mu}^{-1}(\boldsymbol{\epsilon} - \boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\mu}^{-1}\boldsymbol{\alpha}), \boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\mu}$ 分别是根据傅里叶因式分解原理得到的系数矩阵,上标 -1 代表求逆运算。(6)式为广义本征方程^[11],解本征方程可得到由 $2M+1$ 个本征矢组成的矩阵 \mathbf{W}_y 和由正负各 $2M+1$ 个本征值组成的对角阵 $\boldsymbol{\Gamma}_+$ 和 $\boldsymbol{\Gamma}_-$,正值代表上行波,负值代表下行波。

当各分层区域的本征模式场确定后,模式场的通解即为这些本征模式场的线性叠加,对于第 p 层,电场强度 y 分量和磁场强度 x 分量的最终表达式为

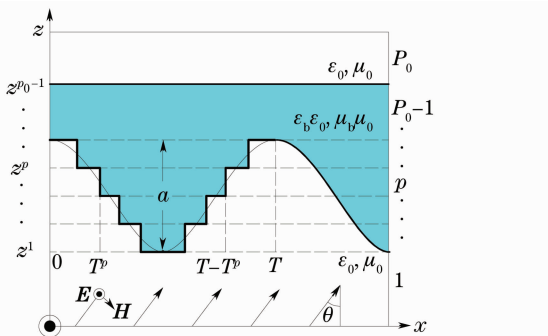


图 1 小尺度波纹物理模型(一个半周期)

Fig.1 Physical model of micro-waveness with one and a half periods

$$\begin{cases} \mathbf{E}_y^p = \exp(ik_0 \mathbf{a}x) \mathbf{W}_{cy}^p \{ \exp[ik_0 \mathbf{\Gamma}_+^p (z - z^p)] \mathbf{u}^p + \exp[ik_0 \mathbf{\Gamma}_-^p (z - z^p)] \mathbf{d}^p \}, \\ \mathbf{H}_x^p = \exp(ik_0 \mathbf{a}x) (-\mathbf{W}_{hx}^p) \{ \exp[ik_0 \mathbf{\Gamma}_+^p (z - z^p)] \mathbf{u}^p - \exp[ik_0 \mathbf{\Gamma}_-^p (z - z^p)] \mathbf{d}^p \}, \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{u}^p, \mathbf{d}^p$ 为两个列矢量, 分别由上行波和下行波的本征模式场的振幅系数组成, 可利用反射透射系数阵递推算法 (RTCM) 求解, 从而确定整个模式场^[7,12]。

根据第 m 级透射波的透射比 η_m^T 的定义, 可以得到透射比的表达式为

$$\eta^T = \sum_{m=-M}^M \eta_m^T = \sum_{m=-M}^M \bar{S}_{mz}^T / \bar{S}_{1z}, \quad (8)$$

式中 \bar{S}_{1z} 和 \bar{S}_{mz}^T 分别代表第一层中的入射波和第 P_0 层中第 m 级透射波的能量密度的 z 方向分量对时间的平均值。

3 数值模拟与实验分析

3.1 数值模拟

为深刻研究小尺度波纹对 KDP 晶体光学元件透射比的影响和简化数学模型, 入射光波采用单位线偏振光垂直入射, 电场振动方向为 y , 即单位 TE 波垂直入射。入射光线平行于 KDP 晶体主轴, 晶体的折射率为 $n_o = 1.49$, 入射光波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, 晶体厚度为 10 mm , 设 $z_1 = 0$ 。下面分别讨论小尺度波纹的周期及幅值对 KDP 晶体光学元件透射比的影响。

小尺度波纹幅值 ($10 \sim 500 \text{ nm}$) 与 KDP 光学元件透射比的关系如图 2 所示。可以看出, 当小尺度波纹幅值小于 150 nm 时, 透射比随着波纹幅值的增加而增大; 当波纹幅值超过 150 nm 后, 不同周期对应的透射比曲线开始出现不同形式的波动; 特别地, 当小尺度波纹周期在入射光波长附近时 (如图 2 中 $T = 1 \mu\text{m}$ 对应的曲线) 变化最为剧烈, 大于 150 nm 后开始锐减直到大于 400 nm 后才恢复正常。小尺度波纹的面形主要与机床每转进给量、刀具圆弧半径、KDP 晶体材料的最小切削厚度等加工因素有关, 由于 KDP 是软脆晶体材料, 在其塑性域模式进行加工时, 其表面形貌特征以加工参数的几何因素影响为主。通常采用超精密单点金刚石铣削加工 KDP 晶体, 选择专用机床、优化的加工参数组合及合理的加工方向, 小尺度波纹幅值 a 一般小于 100 nm , 面形偏差约 $3 \sim 5 \text{ nm}$, 因此在此范围内讨论更具有实际意义^[13-15]。从图 2 插可见, 当波纹幅值小于 100 nm 时, 透射比随幅值的增加基本呈线性增长, 波纹幅值每提高 10 nm , 透射比可提高近 0.5% 。因此, 从透射比的角度考虑, 较大的波纹幅

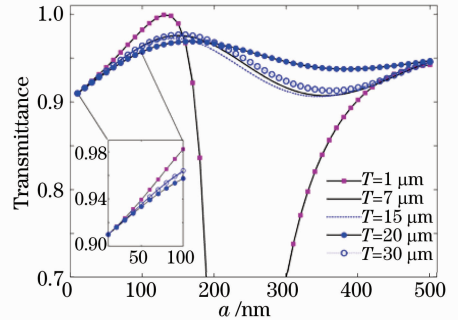


图 2 小尺度波纹幅值与 KDP 光学元件透射比的关系
Fig. 2 Relation of transmittance and micro-waviness amplitude for KDP optical element

值对光学元件的透射性能是有利的。

小尺度波纹周期 ($1 \sim 50 \mu\text{m}$) 与 KDP 光学元件透射比的关系如图 3 所示。从图 3 中可以明显看出, 对于每个固定的小尺度波纹幅值都存在着一个中心透射比, 透射比随着小尺度波纹周期的增加围绕中心透射比上下浮动, 且透射比浮动的大小 (透射比振幅) 基本保持不变。此外, 中心透射比及透射比振幅均随着小尺度波纹幅值的增加而增大。在实际的超精密加工中, KDP 晶体已加工表面的小尺度波纹周期一般在 $1 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间, 而在 $3 \sim 20 \mu\text{m}$ 范围内则更经常出现, 因此我们主要针对这个区间内进行研究^[13-15]。在小尺度波纹常见区间内, 除了在 $10.5 \sim 12 \mu\text{m}$ 区间内透射比明显很低外, 其他位置透射比随小尺度波纹周期的变化频率较快, 不易控制, 因此应主要采取措施避免小尺度波纹的周期出现在 $10.5 \sim 12 \mu\text{m}$ 之间。

较大的小尺度波纹幅值可以提高 KDP 光学元件的透射比, 这对于元件的加工是有利的, 亦即降低

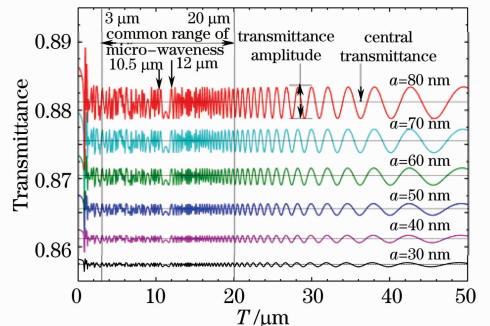


图 3 小尺度波纹周期与 KDP 光学元件透射比的关系
Fig. 3 Relation of transmittance and micro-waviness period for KDP optical element

了元件的加工难度,同时可以间接提高加工效率。然而,较大的波纹幅值会使得晶体内部的衍射场发生较大的畸变,若某些区域光波干涉相长、光强增大,则会降低晶体的抗诱导损伤能力^[16]。图 4 为 KDP 光学元件距表面 100 μm 范围内的近场的光强分布。从图 4(a)和(b)的对比中发现,较大的波纹

幅值会使得光强分布发生严重畸变,局部区域光强非常高,其峰值位置的光强值可达理想情况(无小尺度波纹)时的 1.3 倍,这将导致其损伤阈值降低到原来的 77%。因此,需要合理设计加工参数以保证已加工表面的小尺度波纹既能提高 KDP 光学元件的透射比,又不至于降低其抗诱导损伤性能。

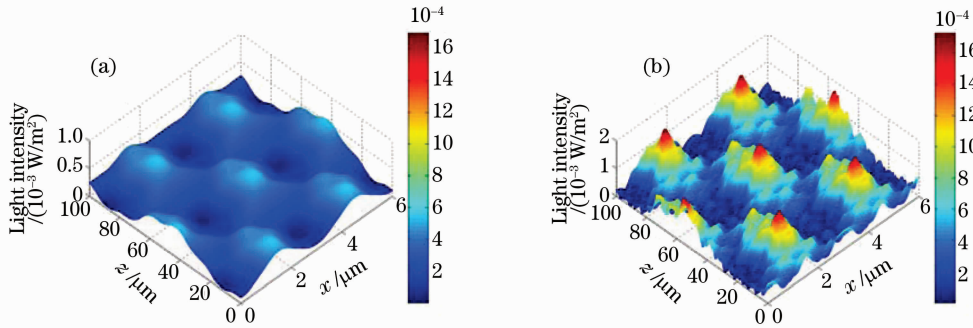


图 4 KDP 光学元件表面近场光强分布。(a) $a=30\text{ nm}$, $T=3\text{ }\mu\text{m}$; (b) $a=80\text{ nm}$, $T=3\text{ }\mu\text{m}$

Fig. 4 Near-field light intensity distribution on KDP optical element's surface. (a) $a=30\text{ nm}$, $T=3\text{ }\mu\text{m}$; (b) $a=80\text{ nm}$, $T=3\text{ }\mu\text{m}$

3.2 实验分析

为验证 KDP 晶体小尺度波纹对透射比影响模型的正确性,分别进行了 KDP 晶体的 SPDT 加工、原子力显微镜表面三维形貌检测及透射比检测的实验研究。KDP 晶体加工实验是在哈尔滨工业大学精密工程研究所自行研制的 KDP 晶体单点金刚石铣削专用机床上完成的。为获得具有不同周期和幅值的小尺度波纹,选择了 7 组不同的进给量对 KDP

晶体进行加工实验。机床采用高精度气浮轴承和气浮导轨,工作台由直流伺服直线电机控制,进给量的标准差为 $\pm 0.004\text{ }\mu\text{m/r}$ (采样频率 2 Hz),主要加工参数如表 1 所示。图 5 为采用原子力显微镜(AFM)测得的 KDP 晶体已加工表面的三维形貌,采样面积为 $80\text{ }\mu\text{m}\times 80\text{ }\mu\text{m}$,进给量为 $30\text{ }\mu\text{m/r}$ 。从图 5 中可以明显看出小尺度波纹的存在,且其周期基本与进给量相近。

表 1 KDP 晶体单点金刚石飞刀切削加工参数

Table1 Processing parameters of KDP crystal machined by single-point diamond turning

Spindle speed /(v/min)	Cutting speed /(m/min)	Feed /($\mu\text{m/r}$)	Cutting depth / μm	Assembly stress aging treatment time/h	Diamond cutting tool Rake /($^\circ$)	Corner radius/mm
400	792	1,3,7,11,15,20,30	20	24	-45	5

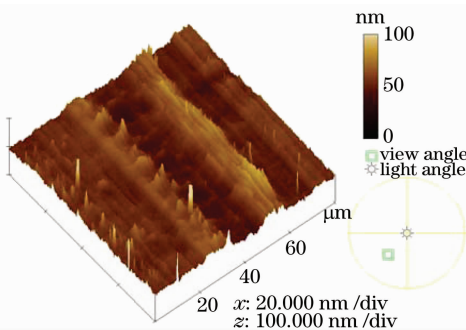


图 5 KDP 晶体表面小尺度波纹 AFM 检测形貌

Fig. 5 Morphological surface of micro-waveness on KDP crystal surface detected by AFM

KDP 晶体光学元件透射比实验光路如图 6 所示,光路由 YAG 激光器、反射镜和能量计等组成。每个加工参数区域对 3 个采样点进行测量,将平均值作为该

区域的透射比。表 2 给出了不同加工参数下,KDP 晶体光学元件的表面平均峰谷值(PV)及透射比 η^T 。

将平均峰谷值作为小尺度波纹的幅值,进给量作为小尺度波纹的周期,利用前面的理论就可以得到 KDP 晶体光学元件的理论透射比(如图 7 所示)。从图 7 中可以看出,两条拟合曲线的变化趋势相似,均随着进给量的增大而增加,这主要是因为随着进给量的增加,小尺度波纹的幅值也随着增大。但实际的透射比要比理论值偏小,这主要是由于加工过程中 KDP 晶体材料的塑性变形及刀具的磨损等因素,使得 KDP 晶体已加工表面的小尺度波纹波面不完全等价于正弦波,且具有一些随机性(如峰谷值变化不均匀等),因此实际结果可能较理论计算值略小。总的来说,实验结果与理论计算结果基本吻合。

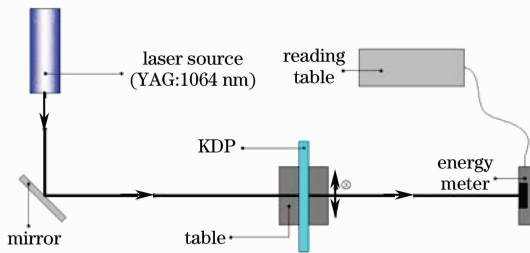


图 6 KDP 晶体透射比实验光路图

Fig. 6 Optical path of KDP transmittance experiment

表 2 KDP 晶体表面平均峰谷值及透射比

Table 2 Average peak value and transmittance of KDP crystal

Feed / ($\mu\text{m}/\text{r}$)	PV / nm	$\eta^T / \%$
1	21.1	91.26
3	11.6	91.34
7	20.2	91.03
11	29.6	91.26
15	27.0	91.65
20	26.9	91.80
30	42.5	90.74

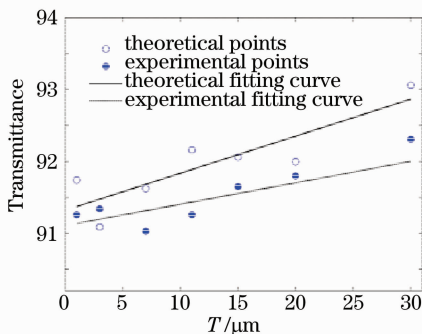


图 7 KDP 晶体透射比理论值与实验值的对比

Fig. 7 Comparison of theoretical and experimental transmittance of KDP crystal

4 结 论

通过傅里叶模方法,深入分析了小尺度波纹幅值在 $10\sim 500\text{ nm}$ 、周期在 $1\sim 50\ \mu\text{m}$ 范围内变化时, KDP 光学元件透射比的变化规律。对理论模型进行了实验验证,且实验结果与理论计算结果基本吻合。研究表明:

1) 当波纹幅值小于 100 nm 时,透射比随幅值的增加基本呈线性增长,波纹幅值每提高 10 nm ,透射比可提高近 0.5% ;

2) 对于固定的小尺度波纹幅值存在一个中心透射比,透射比随着小尺度波纹周期的增加围绕中心透射比上下浮动,透射比振幅基本保持不变,且中心透射比及透射比振幅均随着小尺度波纹幅值的增

加而增大;

3) 小尺度波纹周期在 $10.5\sim 12\ \mu\text{m}$ 区间内时透射比明显很低,需采取措施避免小尺度波纹的周期出现在此区间;

4) 较大的小尺度波纹幅值可以提高 KDP 光学元件的透射比,有利于元件的加工,但会使光强分布发生严重畸变,降低其抗诱导损伤阈值,设计加工参数时需综合考虑。

参 考 文 献

- Dong Shen, Zhang Xinzhou, Wang Jinghe. Theoretical research on anisotropy of ultra-precision machining KDP crystal[J]. *Tool Engineering*, 2005, **39**(11): 19~21
- 董 申, 张新洲, 王景贺. KDP 晶体超精密切削各向异性的理论研究[J]. *工具技术*, 2005, **39**(11): 19~21
- Liu Qiang, Wu Rong, Zhang Xiaobo *et al.*. Technical optimization of multi-level diffractive optical elements[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1165~1169
- 刘 强, 邬 融, 张晓波 等. 多台阶衍射光学元件的工艺优化[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1165~1169
- Wang Jinghe, Chen Mingjun, Dongshen *et al.*. Study on the mechanism of brittle-ductile transition for turning KDP crystal with single point diamond [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(7): 67~70
- 王景贺, 陈明君, 董 申 等. KDP 晶体单点金刚石切削脆塑转变机理的研究[J]. *光电工程*, 2005, **32**(7): 67~70
- Gao Fuhua, Wang Chengcheng, Tang Xionggui *et al.*. Near field analysis for periodic diffractive gratings using Fourier modal method [J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, **83** (4-9): 1062~1066
- Li Lifeng. Multilayer modal method for diffraction gratings of arbitrary profile, depth and permittivity[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(12): 2581~2591
- Tang Xionggui, Guo Yongkang, Du Jinglei *et al.*. Analysis of diffractive image field in thick film photo-resist by using Fourier modal method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 246~250
- 唐雄贵, 郭永康, 杜惊雷 等. 利用傅里叶模方法分析厚层光刻胶内衍射光场[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 246~250
- Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Zhang Dayue *et al.*. A modal theory and recursion RTCM algorithm for gratings of deep grooves and arbitrary profile[J]. *Science in China Ser. A*, 1999, **42** (6): 636~645
- Kong Weijin, Yun Maojin, Cui Chunling *et al.*. Diffraction property of multi-layer dielectric grating with trapezium groove [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1415~1419
- 孔伟金, 云茂金, 崔春玲. 梯形介质膜光栅衍射特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1415~1419
- Tang Xionggui, Fu Kexiang, Wang Zhiheng *et al.*. Analysis of rigorous modal theory for arbitrary dielectric gratings made with anisotropic materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22** (7): 774~779
- 唐雄贵, 傅克祥, 王植恒 等. 任意各向异性介质光栅的严格模式理论分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 774~779
- Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Zhang Jing *et al.*. Fast processing of Fourier modal method for perpendicularly crossed surface-relief binary-period gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21** (2): 236~241
- 傅克祥, 王植恒, 张 靖 等. 对正交浮雕光栅傅里叶模方法的快速实现[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 236~241
- Thomas Hagen. Asymptotic solutions of characteristic equations

- [J]. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 2005, **6**(3): 429~446
- 12 Fu Kexiang, Zhang Dayue, Wang Zhiheng *et al.*. Rigorous modal theory of phase grating and the total reflection property[J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **47**(8): 1278~1287
傅克祥, 张大跃, 王植恒 等. 相位光栅的严格模式理论及其全反射特性[J]. *物理学报*, 1998, **47**(8): 1278~1287
- 13 Chen Mingjun, Wang Jinghe, Liang Yingchun *et al.*. Research on influence of the cutter rake angle to the surface quality during SPDT machining of crystal KDP[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, **339**: 1~5
- 14 Wang Jinghe, Chen Mingjun, Dong Shen *et al.*. Critical cutting condition for brittle-ductile transition of KDP crystals in ultra-precision machining [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, **329**: 409~414
- 15 Wang Jinghe, Dong Shen, Wang Hongxiang *et al.*. Forecasting of surface roughness and cutting force in single point diamond turning for KDP crystal[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, **339**: 78~83
- 16 Zhao Junpu, Hu Dongxia, Zhou Wei *et al.*. Analysis of near-field power spectral density in high-power solid-state laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 118~122
赵军普, 胡东霞, 周 维 等. 高功率固体激光近场强度功率谱密度特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 118~122