

引用格式: XU Lü, YANG Yan-nan. Laser-mode Simulation of Corner Cube Resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1):0114001

徐律, 杨雁南. 角锥棱镜谐振腔激光模式模拟研究[J]. 光子学报, 2020, 49(1):0114001

角锥棱镜谐振腔激光模式模拟研究

徐律, 杨雁南

(南京航空航天大学 理学院, 南京 211106)

摘 要:为了探究角锥棱镜谐振腔激光模式,以角锥-平面镜腔为例,将角锥棱镜等效为衍射光栅,考虑角锥棱镜宽在谐振腔中的衍射效应以及二面角误差引起的附加相位分布对谐振腔激光模式的影响,在光学谐振腔理论的基础上,建立了求解本征模式的理论分析模型.采用快速傅里叶法数值模拟不同腔长、角锥棱镜宽和二面角误差情况下该无源谐振腔激光输出模式分布情况.结果表明,在腔长 30 cm、角锥棱镜宽小于 $75\ \mu\text{m}$ 、二面角误差在 $-10'\sim 5'$ 之间时,可实现光斑完整的圆形分布输出模式,且有较好的光束质量;棱宽不小于 0.4 mm,二面角误差在 $-40'\sim 10'$ 之间时,光斑为 TEM_{03} 阶横模,光场呈六瓣分布;当角锥棱镜宽为 0.4 mm、二面角误差为 $3'$,腔长从 30~90 cm 范围内增加时,该谐振腔输出的激光模式从 TEM_{03} 转换成 TEM_{10} .

关键词:激光;谐振腔;角锥棱镜;二面角误差;附加相位;快速傅里叶变换;输出模式

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204901.0114001

Laser-mode Simulation of Corner Cube Resonator

XU Lü, YANG Yan-nan

(College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106 China)

Abstract: In order to explore the mode of corner cube resonator, taking the cone plane mirror cavity as an example, the corner cube prism is equivalent to a diffraction grating. Considering the influence of the diffraction effect of the corner pyramid width in the resonator and the additional phase distribution caused by the dihedral angle error on the laser mode of the resonator, a theoretical analysis model for solving the intrinsic mode is established based on the theory of the optical resonant cavity. The fast Fourier transform method is adopted to simulate the distribution of the laser oscillation modes of the passive corner cube cavity in different cavity length, apex widths and dihedral angle error. When the cavity length is 30 cm, the width of the corner cube is less than $75\ \mu\text{m}$, and the angle error of the two sides is between $-10'$ and $5'$, the complete circular distribution output mode of the light spot can be realized, and the beam quality is good. When the width of the edge is not less than 0.4 mm and the dihedral angle error is between $-40'$ and $10'$, the spot is a transverse mode of TEM_{03} and the light field is a six-lobe distribution. When the width of the corner cone mirror is 0.4 mm, the error of the dihedral angle is $3'$ and the cavity length increases in the range of 30~90 cm, the laser mode of the resonator is converted from TEM_{03} to TEM_{10} .

Key words: Laser; Resonator; Corner cube; Dihedral angle error; Additional phase; Fast Fourier transform; Output mode

OCIS Codes: 140.0140; 140.3410; 030.4070

基金项目:国家自然科学基金(No. 51577091)

第一作者:徐律(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向为激光无线能量传输及激光器件. Email: xulv@nuaa.edu.cn

导师(通讯作者):杨雁南(1963-),女,教授,博士,主要研究方向为光电技术. Email: yangyn@nuaa.edu.cn

收稿日期:2019-07-19;录用日期:2019-09-05

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

传统的固体激光谐振腔结构主要有平行平面腔、平凹腔、直角棱镜腔等.这些腔型具有输出光束方向性好、模体积大、易实现单横模振荡的优点,但同时也存在调整困难、稳定性差、修理不方便、需要专用的腔镜精密调节机构调试等缺点.因此,在一些实际应用场景中有一定的局限性.在激光器研究与发展过程中,改善与提高激光谐振腔稳定性及光斑质量一直是重要课题之一.角锥棱镜是由三个互相垂直的平面镜组成的光学器件,它可以任何角度入射的光线沿原光路反方向平行射出^[1].利用角锥棱镜作为激光谐振腔镜,不需要严格精准的准直调试,也可实现激光振荡.具有抗干扰能力强、稳定性高的特点,可有效降低外部环境振动、温度突变和冲击对激光输出的影响^[2-4].

多位学者对角锥镜激光谐振腔进行了相关研究.程勇等^[5]利用角锥镜作为固体激光器腔镜,实现了腔长 80 mm 时棱镜角度失调允量 20° 、发散角小于 3 mrad 的高稳定激光输出.WANG Y P 等^[6]设计的双角锥谐振腔结构的 Ho:YAG 调 Q 激光器,在角锥水平旋转 6.7° 时仍可稳定工作.王勇等^[7]利用 Fox-Li 数值迭代法,模拟计算了腔长 0.5 m 时角锥镜谐振腔本征振荡模式分布情况,并与平行平面腔等传统腔型输出模式对比,得到角锥镜腔输出模式为近似 TEM_{03} 模,光斑呈六瓣分布的结论.从这些研究中可以看出,角锥棱镜谐振腔有良好的抗失谐能力,但是由于角锥镜在加工过程中棱线存在宽度且各垂直面间存在二面角误差,使得角锥镜谐振腔在实际运行过程中会出现光强分布不均、光斑呈多瓣的激光振荡模式^[8-9].因此有必要对角锥镜棱线宽度、二面角误差与激光输出模式的关联进行研究,找出确保谐振腔输出光斑完整的条件^[10].

本文以角锥-平面镜谐振腔为例,给出了角锥镜等效光栅的光瞳函数,在考虑角锥二面角误差情况下,利用矢量分析,求解出角锥镜出射光矢量公式,建立角锥-平面镜腔理论模型.利用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)方法对角锥棱镜谐振腔进行数值模拟研究,计算无源情况下该腔的光场分布,定量讨论腔长、角锥棱宽和二面角误差对其输出模式的影响,并给出角锥棱镜谐振腔实现近似 TEM_{00} 基横模输出的条件.

1 角锥-平面镜谐振腔的理论建模

1.1 谐振腔模型

由一个角锥棱镜(Corner Cube Resonator, CCR)和一个平行平面输出镜构成的角锥-平面镜谐振腔如图 1 所示.当光线在谐振腔中来回传播时,为了进行定量计算,将角锥镜的横截面简化为如图 2 所示的圆形镜,考虑到角锥镜内彼此垂直的两平面镜接缝处有一条形区域对光无反射(由棱宽和二面角误差共同作用造成),因此角锥镜对光的反射可等效为轴对称光栅^[11].

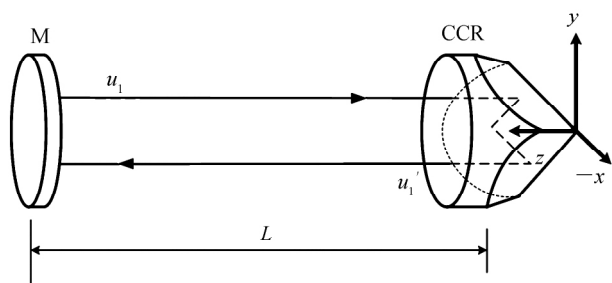


图 1 角锥棱镜谐振腔示意图

Fig.1 Schematic of corner cube resonator

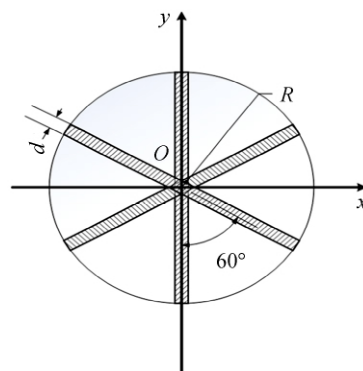


图 2 角锥棱镜的简化

Fig.2 Simplified incident surface of corner cube

取角锥镜底面的横截面为 xy 面,中心点为原点 O ,等效圆形镜半径为 R ,棱宽为 d ,与角锥镜对应的轴对称光栅的光瞳函数为

$$P_1(x, y) = \begin{cases} 1 & x^2 + y^2 \leq R^2, x > \frac{d}{2}, y > \tan 30^\circ x + \frac{\sqrt{3}}{3}d \\ 1 & x^2 + y^2 \leq R^2, x < -\frac{d}{2}, y > -\tan 30^\circ x + \frac{\sqrt{3}}{3}d \\ 1 & x^2 + y^2 \leq R^2, y < -\tan 30^\circ x - \frac{\sqrt{3}}{3}d, y > \tan 30^\circ x + \frac{\sqrt{3}}{3}d \\ 1 & x^2 + y^2 \leq R^2, x < -\frac{d}{2}, y < \tan 30^\circ x - \frac{\sqrt{3}}{3}d \\ 1 & x^2 + y^2 \leq R^2, x > \frac{d}{2}, y < -\tan 30^\circ x - \frac{\sqrt{3}}{3}d \\ 1 & x^2 + y^2 \leq R^2, y > -\tan 30^\circ x + \frac{\sqrt{3}}{3}d, y > \tan 30^\circ x - \frac{\sqrt{3}}{3}d \\ 0 & x^2 + y^2 \leq R^2, -\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2}, \tan 30^\circ x - \frac{\sqrt{3}}{3}d < y < \tan 30^\circ x + \frac{\sqrt{3}}{3}d, \\ & -\tan 30^\circ x - \frac{\sqrt{3}}{3}d < y < -\tan 30^\circ x + \frac{\sqrt{3}}{3}d \\ 0 & x^2 + y^2 > R^2 \end{cases} \quad (1)$$

半径为 R' 的圆形平面镜对应的光瞳函数为

$$P_2(x, y) = \begin{cases} 1 & x^2 + y^2 \leq R'^2 \\ 0 & x^2 + y^2 > R'^2 \end{cases} \quad (2)$$

1.2 激光模式 FFT 求解理论模型的建立

对于激光谐振腔的数值模拟计算方法主要有 Fox-Li 迭代法、有限差分法 (Finite Difference Method, FDM)、有限元光束传播法 (Finite Element Beam Propagation Method, FEM-BPM) 和快速傅里叶变换法。由于采用角锥镜作为腔镜的谐振腔菲涅尔数较大, 结构相对传统谐振腔而言更为复杂, 为了准确获得谐振腔的本征模式分布, 数值模拟中需要对腔镜进行更精细的划分, 因此计算量大, 利用 FFT 法求解相对来说更快捷^[12-13]。FFT 法的实质是在光学传递函数理论的基础上, 利用傅里叶变换将空间域的非涅尔-基尔霍夫衍射积分公式对应到频域, 在自再现条件下得到稳定的模场分布。频域中, 菲涅尔-基尔霍夫衍射公式可表示为

$$F\{u'(x', y')\} = F\{u(x, y)\} \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} L \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}\right] \quad (3)$$

式中, f_x 和 f_y 分别为 x 和 y 的空间频率, F 为傅里叶变换符号, $u(x, y)$ 为镜面初始光场分布, $u'(x', y')$ 为传播 L 距离后的光场分布, λ 为波长。

理论模型建立的思路是: 设在腔镜 M 处初始光场分布为 $u_1(x, y)$, 光线沿着腔轴 z 传播到角锥棱镜 CCR 时, 光场分布为 $u_1'(x, y)$, 光线经过角锥棱镜后, 由于其后向反射特性, 可以得到反射回 M 的光场分布为 $u_1''(x, y)$, 此时谐振腔完成一次往返。根据频域衍射传播函数, 再结合式(1)、(2)可以得到变量之间的关系为^[14]

$$\begin{cases} u_1'(x_2, y_2) = F^{-1} \left\{ F[u_1(x_1, y_1)] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} L \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}\right] \right\} P_1(x, y) \\ u_1''(x_1, y_1) = F^{-1} \left\{ F[u_1'(x_2, y_2)] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} L \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}\right] \right\} P_2(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

对腔内光场不断进行循环迭代, 谐振腔内光场往返次数足够大时, 根据自再现理论, 第 i 次往返时腔镜 M 上的振幅分布 $u_i(x, y)$ 与第 $i+1$ 次往返时的振幅只相差一个复常数因子, 光场的相对振幅和相位不再发生变化, 最终得到稳定后的光场分布^[15]。

1.3 角锥棱镜二面角误差对光场分布的影响

除了棱宽对光场分布的影响, 当角锥棱镜三个相互垂直的反射面存在角度误差时, 光线出射方向将不能严格按照平行于入射光方向返回, 存在一定角度的偏离, 进而产生附加相位^[16]。圆形的入射光斑会因此产生

变形,再经过谐振腔内多次往返,最终输出光斑将产生分瓣现象。

如图 3 所示,角锥镜三个互相垂直的反射面分别为 I、II、III,三个二面角加工误差分别为 θ_{12} (面 I、II)、 θ_{13} (面 I、III)、 θ_{23} (面 II、III),以角锥镜顶点为原点建立坐标系,光线从角锥底面垂直入射,按序通过三个面反射出底面.假设入射光 A_0 空间矢量为^[17]

$$A_0 = -(ai + bj + ck) \quad (5)$$

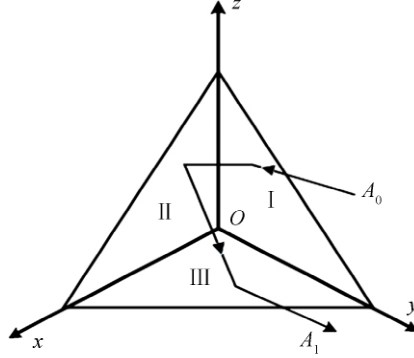


图 3 存在误差时的角锥示意图

Fig.3 Schematic of corner cube with dihedral angle error

光线以不同顺序依次经过三个反射面反射后的出射光矢量有 6 种情况,每种情况下 i 、 j 、 k 分量分别为

$$\begin{cases} A_{1i} = -[1 + 2n(\theta_{23} - \theta_{12})]a/\sqrt{3} \\ A_{1j} = -[1 + 2n(\theta_{12} + \theta_{13})]b/\sqrt{3} \\ A_{1k} = -[1 - 2n(\theta_{13} + \theta_{23})]c/\sqrt{3} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} A_{2i} = -[1 - 2n(\theta_{23} - \theta_{12})]a/\sqrt{3} \\ A_{2j} = -[1 + 2n(\theta_{12} + \theta_{13})]a/\sqrt{3} \\ A_{2k} = -[1 + 2n(\theta_{13} - \theta_{23})]a/\sqrt{3} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} A_{3i} = -[1 + 2n(\theta_{12} + \theta_{23})]a/\sqrt{3} \\ A_{3j} = -[1 - 2n(\theta_{12} + \theta_{13})]a/\sqrt{3} \\ A_{3k} = -[1 + 2n(\theta_{13} - \theta_{23})]a/\sqrt{3} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} A_{4i} = -[1 + 2n(\theta_{12} + \theta_{23})]a/\sqrt{3} \\ A_{4j} = -[1 + 2n(\theta_{13} - \theta_{12})]a/\sqrt{3} \\ A_{4k} = -[1 - 2n(\theta_{13} + \theta_{23})]a/\sqrt{3} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} A_{5i} = -[1 - 2n(\theta_{12} + \theta_{23})]a/\sqrt{3} \\ A_{5j} = -[1 + 2n(\theta_{12} - \theta_{13})]a/\sqrt{3} \\ A_{5k} = -[1 + 2n(\theta_{13} + \theta_{23})]a/\sqrt{3} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} A_{6i} = -[1 + 2n(\theta_{12} - \theta_{23})]a/\sqrt{3} \\ A_{6j} = -[1 - 2n(\theta_{12} + \theta_{13})]a/\sqrt{3} \\ A_{6k} = -[1 + 2n(\theta_{13} + \theta_{23})]a/\sqrt{3} \end{cases} \quad (11)$$

式中, a 、 b 、 c 分别为单位矢量系数,满足

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1 \quad (12)$$

为了与图 1 谐振腔中 CCR 的坐标系相对应,在数值模拟谐振腔模式分布时,需要采用坐标转换矩阵,对角锥镜坐标系进行转换,其中坐标转换矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{6}}{3} & -\frac{\sqrt{6}}{6} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{pmatrix} \quad (13)$$

结合矢量形式的折射定律, 对式(12)近似取单位矢量系数 $a = b = c = \frac{\sqrt{3}}{3}$, 可以计算任意一入射方向的光线经角锥棱镜出射后的方向余弦. 整理计算得到各区域出射光线的光程差分布为

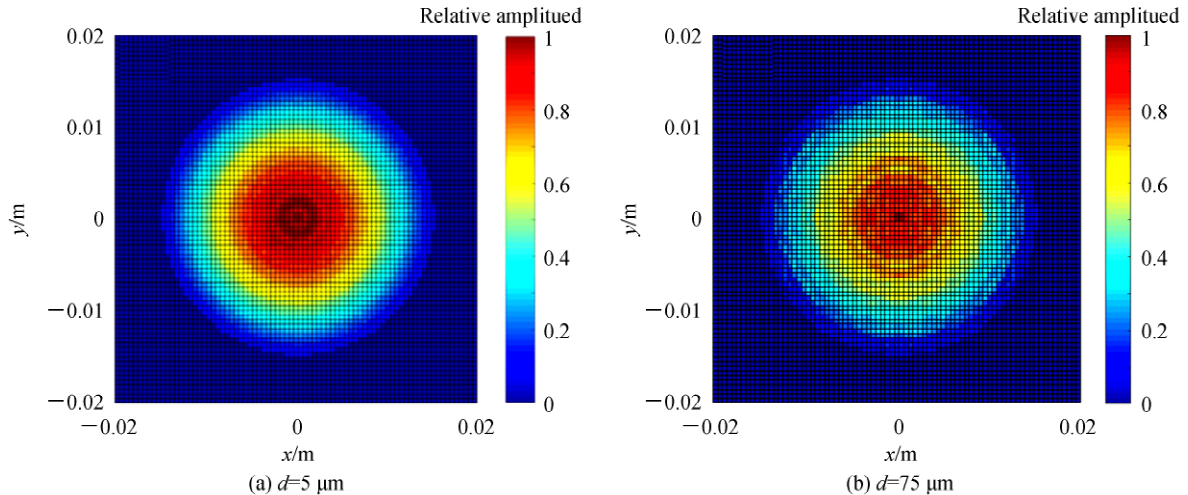
$$w(x, y) = \begin{cases} \frac{\sqrt{6}}{3}(\theta_{12} + \theta_{23} + 2\theta_{13})x - \sqrt{2}(\theta_{12} - \theta_{23})y & x \geq 0, -x \tan 30^\circ \leq y < x \tan 30^\circ \\ \frac{\sqrt{6}}{3}(\theta_{12} - \theta_{23} + 2\theta_{13})x + \sqrt{2}(\theta_{12} + \theta_{23})y & x \geq 0, y \geq x \tan 30^\circ \\ \frac{\sqrt{6}}{3}(\theta_{12} - \theta_{23} - 2\theta_{13})x + \sqrt{2}(\theta_{12} + \theta_{23})y & x < 0, y \geq -x \tan 30^\circ \\ -\frac{\sqrt{6}}{3}(\theta_{12} + \theta_{23} + 2\theta_{13})x - \sqrt{2}(-\theta_{12} + \theta_{23})y & x < 0, x \tan 30^\circ \leq y < -x \tan 30^\circ \\ -\frac{\sqrt{6}}{3}(\theta_{12} - \theta_{23} + 2\theta_{13})x - \sqrt{2}(\theta_{12} + \theta_{23})y & x < 0, y < -x \tan 30^\circ \\ \frac{\sqrt{6}}{3}(-\theta_{12} + \theta_{23} + 2\theta_{13})x - \sqrt{2}(\theta_{12} + \theta_{23})y & x \geq 0, y < -x \tan 30^\circ \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)得到由角锥镜二面角误差引起的出射波面的附加相位分布 $w' = |\mathbf{p}| \cdot w(x, y)$, 其中 \mathbf{p} 是波矢. 再结合 1.2 节中快速傅里叶衍射传播公式(3)可得到角锥镜存在二面角误差时谐振腔的光场分布为

$$u'(x, y) = u(x, y) \exp[i|\mathbf{p}|w(x, y)] \quad (15)$$

2 数值模拟结果与分析

设角锥镜谐振腔的腔长 L 为 30 cm, 波长为 1 064 nm, 角锥镜尺寸为 15 mm, 菲涅尔数 $N = 176$, 初始光场分布为平面波 $u_1(x, y, 0) = 1$, 当光场分布不随迭代次数发生变化时, 达到稳定输出. 首先考虑角锥镜棱线宽度对光场分布的影响, 数值模拟结果如图 4 所示, 当棱线宽度为 5 μm , 光场为高斯分布, 可认为模式为 TEM_{00} 基横模; 棱宽增加到 75 μm 时光斑形状仍保持完整的圆形分布; 当棱线宽度为 80 μm 左右时, 光斑分裂成均匀分布的两瓣, 可认为是 TEM_{10} 高阶模; 棱宽增大至 400 μm 时, 从图 4(d) 可以看出输出光斑分裂成六瓣, 可认为是 TEM_{03} 高阶模, 此时衍射损耗变大, 相应的复振幅分布如图 5 所示.



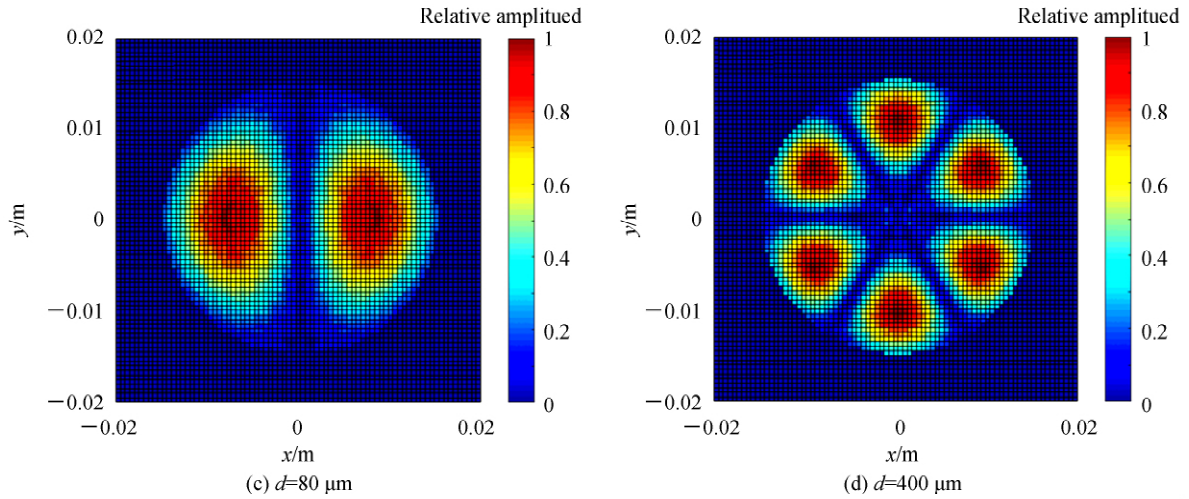


图 4 不同棱宽下角锥棱镜谐振腔输出光斑

Fig.4 Output spot patterns of corner cube resonator under different prism width

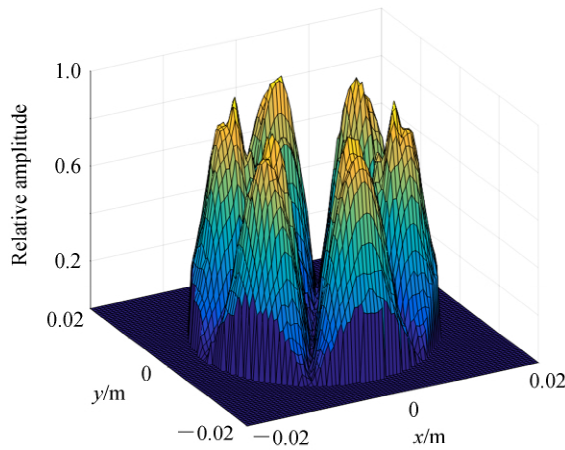
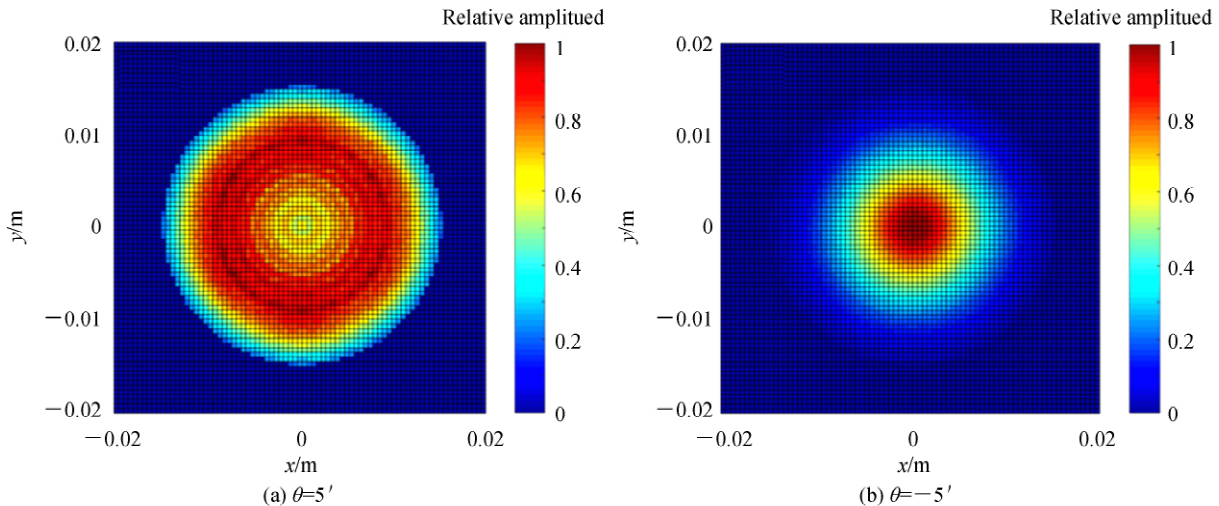


图 5 棱线宽度为 400 μm 时角锥谐振腔复振幅分布

Fig.5 Amplitude distribution of corner cube resonator with prism width of 400 μm

考虑角锥镜二面角误差对光场分布的影响,假设棱线宽度是理想的情况下,选取不同的二面角误差(角锥三个误差取相等值),进行谐振腔仿真,谐振腔其他参数不变.由图 6 可以看到,在正二面角误差下,光线经角锥镜后向外发散.当误差增大到 10'时,输出光斑逐渐变成圆环状;当误差大于 20'时,经过角锥镜理想棱线处的光线无法依次经过三个反射面平行于入射方向反向射出造成损耗,经过多次振荡后,光斑分裂成六瓣,



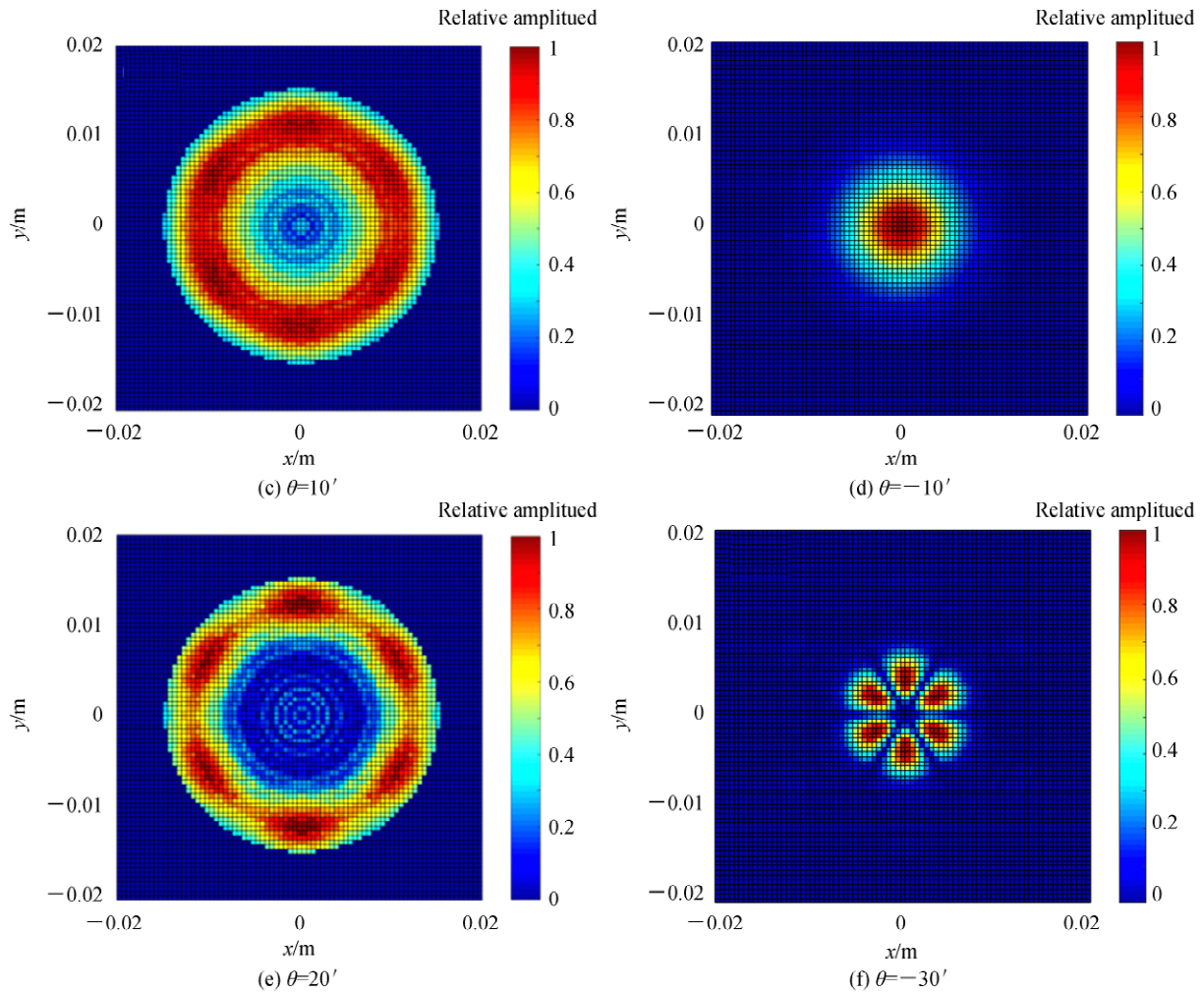
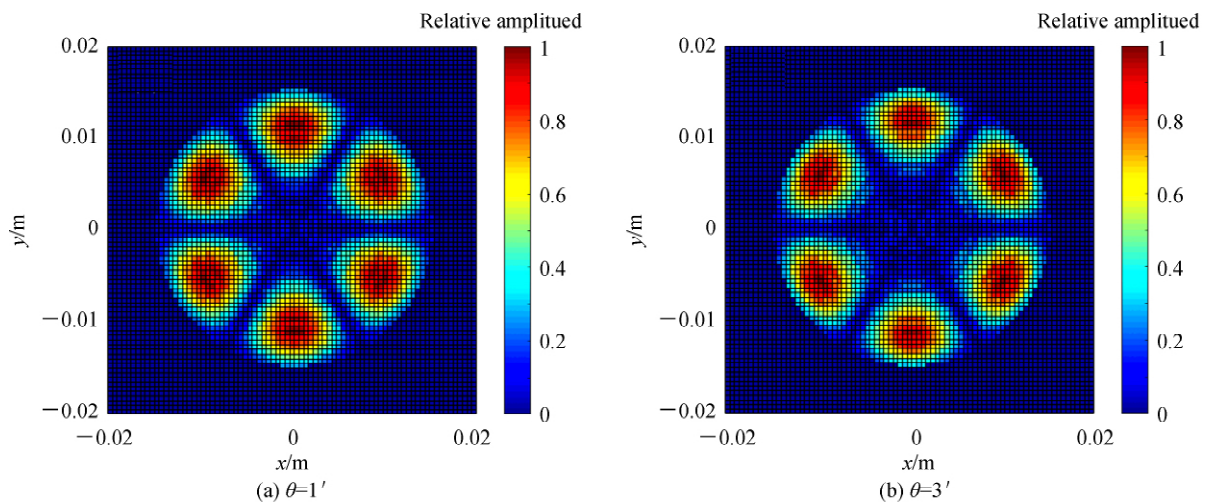


图 6 不同二面角误差下角锥棱镜谐振腔光斑

Fig.6 Output spot patterns of corner cube resonator under different angle errors

并随着正二面角误差的增大而继续向外扩展,直到光斑消失.在负的二面角误差下,随着误差的增大谐振腔光斑仍为一大小逐渐减小的完整圆形光斑,直到误差为 $-30'$ 时,光斑分裂成六小瓣.

在实际加工过程中角锥镜既存在棱宽也有二面角误差.图 7、8 为棱宽 0.4 mm 、 $L = 30 \text{ cm}$ 情况下不同正、负二面角误差下谐振腔输出光斑的仿真计算结果.由此看出,二面角误差为正时,从角锥镜中心反射光线的程小于从棱镜边缘反射光的光程,因此光场分布向外发散.随着误差值的增加,均匀分布的六瓣光斑逐渐向外扩散,光斑质量较差,当误差大于 $20'$ 时,部分光线在腔内多次往返后逃逸出谐振腔,光斑逐渐消失.而



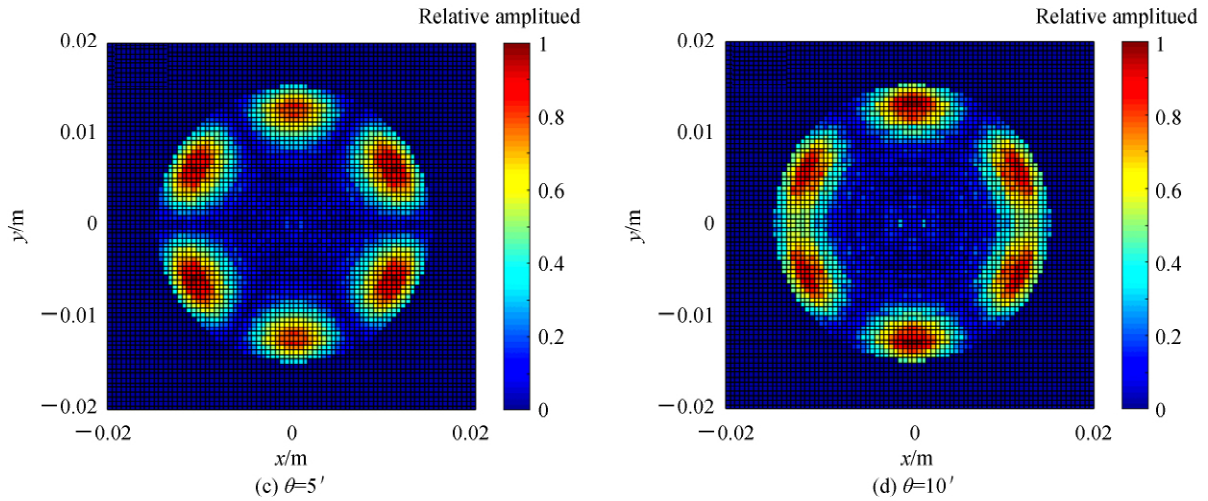


图7 不同正二面角误差下角锥棱镜谐振腔光斑

Fig.7 Output spot patterns of corner cube resonator under different positive angle error

对于负二面角误差的角锥镜,经其中心反射光的光程大于经其边缘反射光的光程,则反射后的光线向光轴会聚,此时即使有较大的负二面角误差,光斑仍可维持在 TEM_{03} 模的六瓣分布,但负二面角误差增大到一定程度时,光斑也逐渐发生形变.

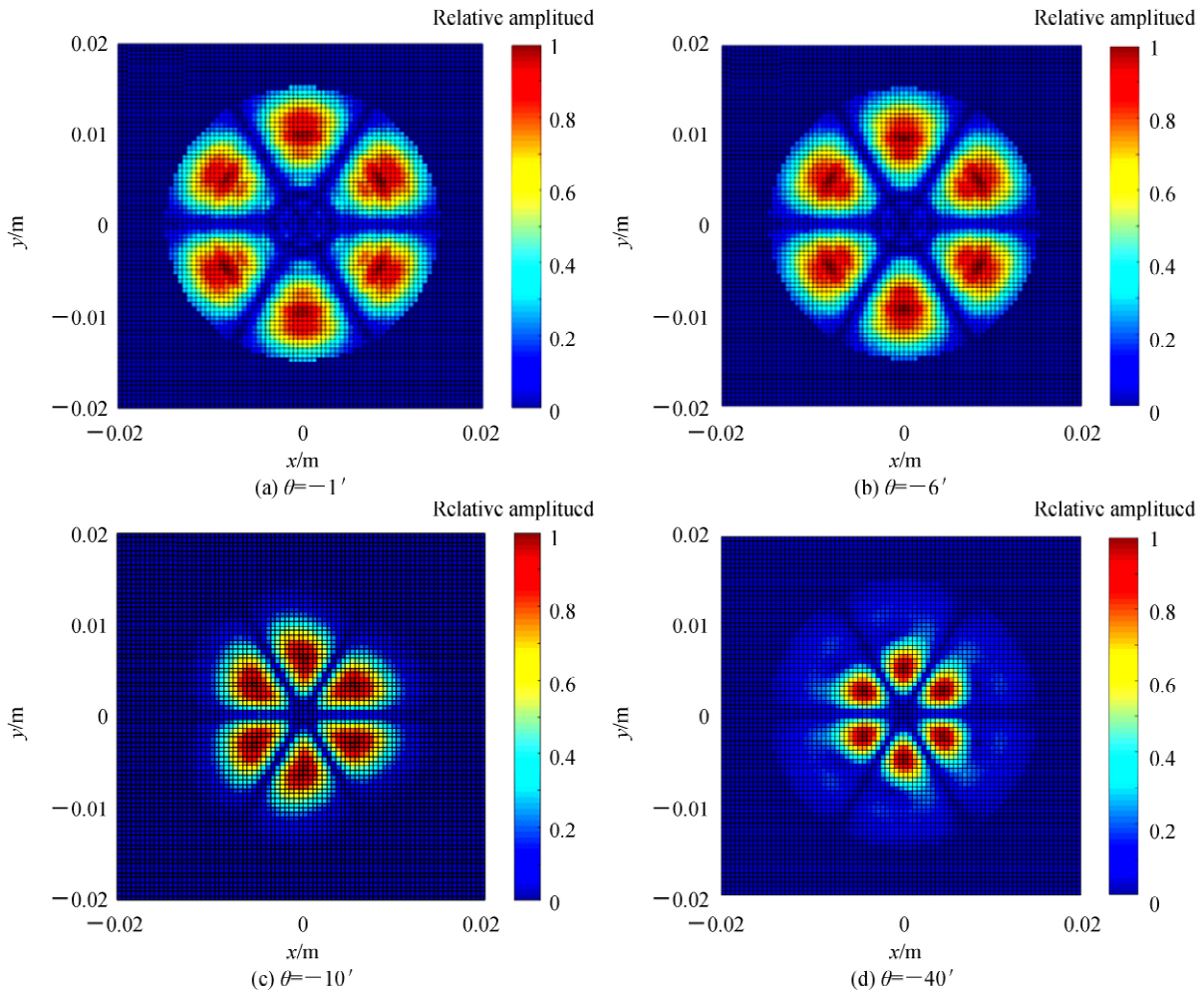


图8 不同负二面角误差下角锥棱镜谐振腔光斑

Fig.8 Output spot patterns of corner cube resonator under different negative angle error

此外,在不同谐振腔长度下,衍射效应对光斑的影响也不同.给定角锥镜棱宽 0.4 mm,二面角误差 $3'$,对

应不同腔长 L 得到谐振腔输出光斑的仿真计算结果如图 9 所示。 $L=0.4$ m 时光场分布由六瓣 TEM_{03} 模变为两瓣 TEM_{10} 模, 该变化的主要原因是腔长增加时, 偏离光轴的光线衍射损耗增大, 使得边缘光场的能量迅速衰减. 由此可以看出, 在一定范围内, 增大腔长可使谐振腔的高阶输出模式向低阶转化.

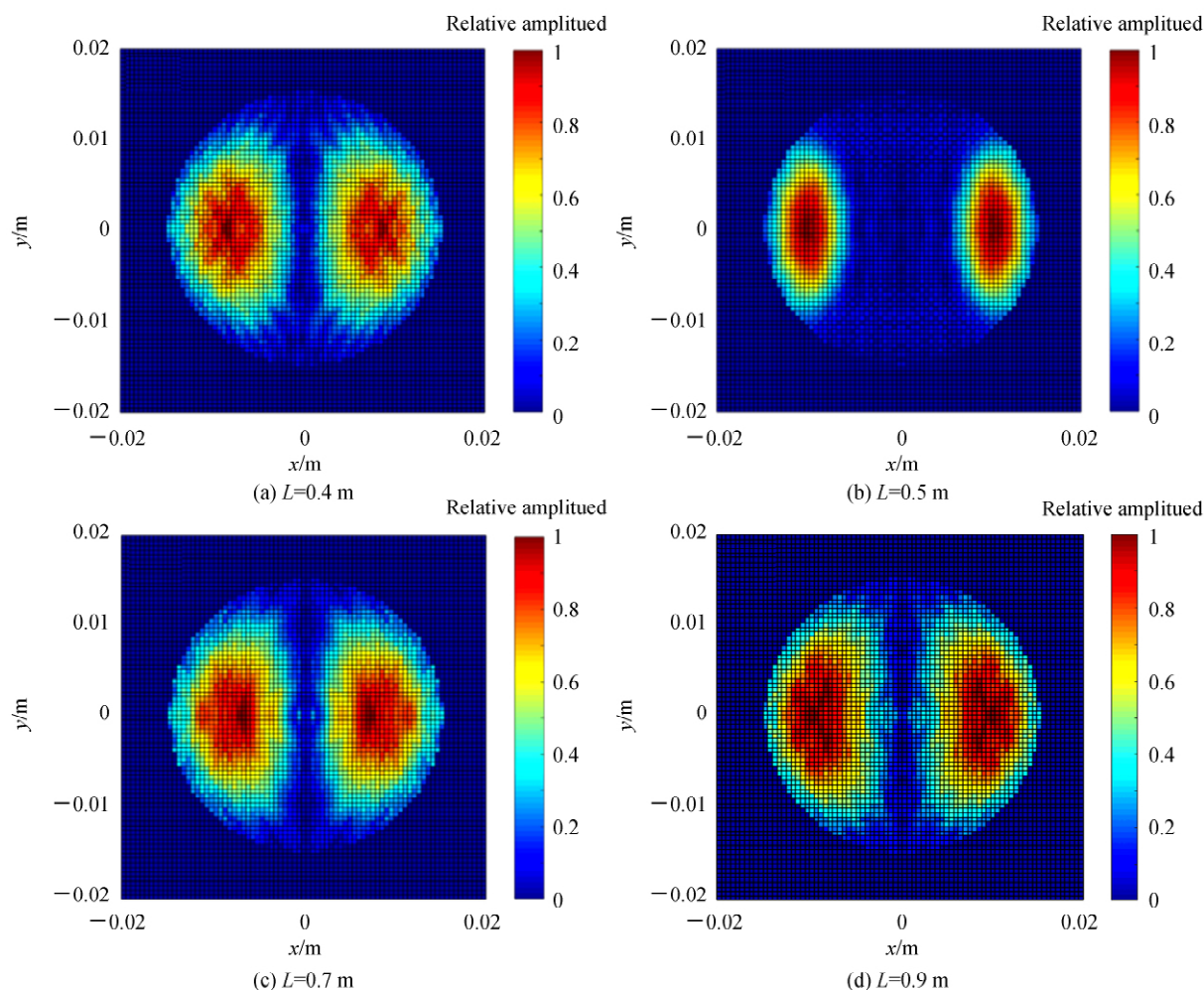


图 9 不同腔长下角锥棱镜谐振腔的光斑

Fig.9 Output spot patterns of corner cube resonator under different cavity length

3 结论

考虑存在角锥镜棱宽及二面角误差的情况下, 利用 FFT 法数值计算了角锥镜-平面镜谐振腔内本征振荡模式的分布情况. 结果表明, 对于腔长较短 (低于 0.3 m) 的角锥镜-平面镜谐振腔, 只要角锥镜棱宽小于 $75 \mu\text{m}$, 且其二面角误差在 $-10' \sim 5'$ 之间, 则输出光斑完整, 可近似为 TEM_{00} 基横模输出. 角锥镜同时有棱宽及二面角误差时, 正二面角误差的增大使得光斑逐渐向外扩展, 光场中心能量降低为零, 光斑质量变差; 在较大负二面角误差范围内谐振腔输出模式保持在光斑呈六瓣分布的 TEM_{03} 高阶横模. 在角锥镜棱宽及二面角误差保持不变时, 输出模式随腔长的适当增加由 TEM_{03} 阶横模变为 TEM_{10} 阶横模, 光斑分裂个数减少. 分析结果可用于角锥棱镜谐振腔的参数设计和应用.

参考文献

- [1] SUN Xue-ping, LIU Wei-guo, LU Jin-jun. Analysis and correction of far-field diffraction pattern for corner-cube reflector [J]. *Journal of Optics*, 2017:1-7.
- [2] ZHANG Qing-qing, SHI Xiao-jun, LIU Qing-wen, et al. Adaptive distributed laser charging for efficient wireless power transfer[C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2018: 24-27.
- [3] KHALID M W, AHMED R, YETISEN A K, et al. Flexible corner cube retroreflector array for temperature and strain sensing.[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(14):7588-7598.
- [4] SUN Bin, ZHU Meng-zhen, TAN Chao-yong, et al. Latest progress of research on adjust-free solid state laser[J].

- Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(10), 3244-3251.
- 孙斌, 朱孟真, 谭朝勇, 等. 免调试激光器研究新进展[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(10), 3244-3251.
- [5] CHENG Yong, MAO Shao-qin, WANG Huai-zhi, *et al.* Avoidance adjust solid state laser[J]. *Laser Technology*, 1999, **23**(2): 68-70.
- 程勇, 毛少卿, 王志怀, 等. 免调试固体激光器的研究[J]. 激光技术, 1999, **23**(2): 68-70.
- [6] WANG Y P, DAI T Y, WU J, *et al.* A Q-switched Ho: YAG laser with double anti-misalignment corner cubes pumped by a diode-pumped Tm: YLF laser[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **91**: 8-11.
- [7] WANG Yong, SUN Bo, REN Zhao-yu, *et al.* Investigation of the misalignment-resistant and eigenmode characteristics of the corner cube resonator[J]. *Laser Journal*, 2013, **34**(4): 8-10.
- 王勇, 孙博, 任兆玉, 等. 角锥棱镜谐振腔抗失调特性及本征模式的研究[J]. 激光杂志, 2013, **34**(4): 8-10.
- [8] MAO Shao-qin, CHENG Yong, WANG Xiao-bing, *et al.* Highly stabilized solid-state laser with direction prism reflector [C]. SPIE, 1999, 3862: 210-214.
- [9] CHANDLER K N. On the effects of small errors in the angles of corner-cube reflectors[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1960, **50**(3): 203-206.
- [10] ECKHARDT H D. Simple model of corner reflector phenomena[J]. *Applied Optics*, 1971, **10**(7): 1559-1566.
- [11] GONG Xin, MENG Jun-qing, CHEN Wei-biao. Output-mode simulation of orthogonal porro prism resonators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, **46**(1): 58-63.
- 龚鑫, 孟俊清, 陈卫标. 正交波罗棱镜谐振腔模式研究[J]. 中国激光, 2019, **46**(1): 58-63.
- [12] 徐银新. 激光谐振腔模式研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010: 20-24.
- [13] SHEN Mei-xiao, WANG Shao-min, HU Lai-gui, *et al.* Mode properties produced by a corner-cube cavity[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(20): 91-94.
- [14] ZHOU G, ALFREY A J, CASPERSON L W. Modes of a laser resonator with a retroreflecting corner cube mirror[J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(9): 1670-4.
- [15] KUO I C, KO T. Laser resonators of a mirror and corner cube reflector analysis by the imaging method[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(1): 53.
- [16] LV Bai-da, FENG Guo-ying, CAI Bang-wei. Mode calculations of resonators for slab lasers: fast Fourier transform[J]. *Laser Technology*, 1993, **17**(6): 355-399.
- 吕百达, 冯国英, 蔡邦维. 板条激光器用光腔的模式计算: 快速傅里叶变换法[J]. 激光技术, 1993, **17**(6): 335-339.
- [17] LI Fu-xian. Mathematical modeling analysis on the measuring for pyramid prism's error[J]. *Journal on Numerical Methods and Computer Applications*, 2013, **34**(2): 123-125.
- 李福先. 角锥棱镜误差检测数学建模分析[J]. 数值计算与计算机应用, 2013, **34**(2): 123-125.