

文章编号: 0258-7025(2005)03-0306-05

立方反射镜失调特性的研究

梁 倩, 施翔春, 付文强

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 结合理想坐标系下立方镜镜面微小倾斜后其三个平面法线坐标, 利用刚体微量转动的反射法线向量公式, 获得非理想立方镜反射矩阵; 为了研究在光斜入射时镜面倾斜对出射光方向的影响, 利用立方镜绕顶点旋转等效于光斜入射的方法, 计算出光束夹角 δ 与单一镜面偏差角 ϵ 和立方镜旋转角 θ 之间的关系式; 对于理想情况下的立方镜, 利用几何光学可以证明出射光与入射光不但平行, 而且过顶点作任意截面交于两光线所得的两个交点关于顶点对称, 从而计算出立方镜绕顶点以外任意轴旋转造成出射光束相对原出射光的偏移量与旋转角关系式, 理论计算值与实验数据吻合得很好; 介绍了立方镜的制作、调整及检测方法, 偏差角的测量与计算。

关键词 光电子学; 失调; 立方镜; 反射矩阵

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Misalignment Property Analysis of Corner Cube Reflector

LIANG Qian, SHI Xiang-chun, FU Wen-qiang

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

Abstract The reflection matrix of non-ideal corner cube is obtained by using the reflecting normal vector equation of rigid body with slight rotation. In order to find the effects of dihedral angle errors on the emerging beam, the equivalent principle of corner cube rotation around apex is used to calculate the angle δ between the incident beam and the emerging beam as a function of dihedral angle errors ϵ and rotation angle θ of corner cube. For an ideal corner cube, the emerging beam is parallel to the incident beam and two intersections that any plane through the apex cuts the two beams must be symmetrical about the apex. After corner cube randomly rotates around apex, the relations between the rotation angle and offset of emerging beam comparing with the original are investigated theoretically and experimentally. The results are in good agreement. The making, adjusting and testing of the corner cube reflector including the measurement and calculation of the dihedral angle errors are presented.

Key words optoelectronics; misalignment; corner cube reflector; reflection matrix

随着激光技术的不断发展, 人们对激光的输出光束质量也有所要求^[1~5]。如何通过改变激光腔结构设计, 提高高功率输出光束质量, 是现在面临的主要研究课题。立方镜负支环形非稳腔中的一个重要组成部分就是立方镜, 它具有稳定性好, 抗扰动性能强, 而且能使腔内激光束产生 180° 旋转等特点, 这就从很大程度上降低了对调整精度的要求。若采用失调灵敏度低, 同时又具有良好的模式控制等特点的立方反射镜负支环形非稳腔, 使光束在自再现周期内发生旋转或翻转, 进而使增益分布不均匀相对

光场得到了均匀化改善, 从而提高了光束质量^[6]。

很多人对立方镜都作过不少有价值的研究^[7~12]。立方反射镜具有立方棱镜的特点, 即最终出射光光轴与入射光光轴平行而与入射角的变化无关。但是, 由于立方镜是由三面全反射平面镜两两垂直放置组合而成的, 当面间角并不是恰好精确为 90° 时, 出射光会发生偏离, 不再平行于入射光。在立方镜的设计和安装调试过程中, 需要了解镜面角度的偏差以及由此造成与出射光偏离之间的关系, 以便有效地将安装精度控制在允许的范围内, 同时

收稿日期: 2003-12-12; 收到修改稿日期: 2004-04-14

作者简介: 梁倩 (1979—), 女, 广西人, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生, 主要从事激光技术研究。

E-mail: kadlingzi@hotmail.com

如何检测三个平面的垂直程度,通过调整来减小偏差,降低由于镜面倾斜造成出射光偏移带来的影响,成了必须解决的一个问题。

本文将对非理想与理想情况下立方镜绕过顶点与不过顶点的任意轴整体旋转进行理论分析,并介绍立方镜的设计、制作、调整与检测方法。

1 理论计算分析

1.1 理想立方镜整体旋转及平移时的特性研究

对于理想情况下的立方镜,通过几何光学可以证明,经其三个面反射后的出射光线以及入射光线不但平行,而且立方镜的顶点一定在这两条光线所组成的平面上,且过顶点作任意截面交于两光线所得的两个交点,一定关于顶点对称。立方镜整体旋转 θ 角,相应地顶点也平移了 $R \cdot \tan(\theta/2)$, R 为旋转前立方镜顶点到旋转轴的距离,由于入射光与出射光总是关于顶点对称,那么,当顶点平移 Δx 时,也就相当于光源沿垂直光轴方向平移了 Δx ,出射光束也会沿光源移动的反方向平移,这样一来,光源与像点的垂直距离增加了 $2\Delta x$ 。根据这个特点,可以用几何方法计算出立方镜旋转造成出射光发生平移的偏移量 Δ 值

$$\Delta = 2R\sin\theta, \quad (1)$$

其中 θ 为立方镜的旋转角。

理想立方镜绕不过顶点的任意轴作整体旋转,并不改变光的出射方向,只是光束发生了平移,平移量可由(1)式求出。

1.2 非理想立方镜整体微量旋转理论计算

为了具体指定三个全反射面的法线,对应于 Cartesian 坐标系必须给立方镜指明特定方向。我们建立的坐标系与 Thomas 和 Wyant 所介绍的完全一致 $(i, j, k)^{[13]}$,从底面开始将立方镜的三个面依次以逆时针编号,沿对称轴侧视时,立方镜看上去可以分为六个全等三角部分。如图 1(a),(b)所示。定义平面 1(A)的法线 N_A 平行于 x 轴,平面 1(A)与平面 3(C)之间的边缘交线平行于 y 轴,则平面 1(A)与平面 2(B)的边缘交线平行于 z 轴。

假设两垂直平面间有一微小误差倾角,记为 $(\pi/2 + \epsilon)$, ϵ 为非理想情况下立方镜的各镜面的微小差角,并且指定平面的法线间角误差为 ω ,这样可以得出一系列 ω 值,作一阶小角度近似,有 $\cos\epsilon \approx 1$, $\sin\epsilon \approx \epsilon$ 。在立方镜镜面微角倾斜的情况下,三个平面的法线在坐标系中的坐标为

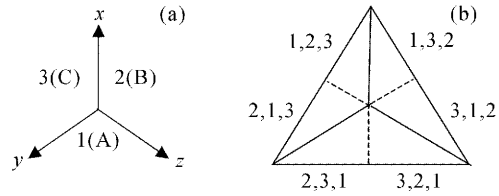


图 1 立方反射图

(a) 坐标系和反射面编号;(b) 对应的反射顺序

Fig. 1 Corner cube reflections

(a) coordinate system and numbering sequence for reflecting surface; (b) prism apertures with the associated reflection sequence

$$N_{A_x} = 1, N_{A_y} = 0, N_{A_z} = 0;$$

$$N_{B_x} = \epsilon_{12}, N_{B_y} = 1, N_{B_z} = 0;$$

$$N_{C_x} = \epsilon_{13}, N_{C_y} = \epsilon_{23}, N_{C_z} = 1. \quad (2)$$

以上忽略了立方镜作为一个整体旋转时的情况(入射光方向与立方镜对称轴,即光轴方向的偏移)。考虑镜面倾斜伴随有立方镜整体旋转,三条法线绕着任意轴 (a, b, c) 转动 θ 角(不过立方镜的顶点),假设旋转为微量转动。运用求刚体微量转动后的反射的法线向量公式^[14]

$$\mathbf{N}' = \mathbf{N} + \Delta\theta[\mathbf{P} \times \mathbf{N}], \quad (3)$$

式中, \mathbf{N} 和 \mathbf{N}' 代表刚体微量转动前后的反射面的法线向量。将(2)式代入(3)式,忽略二次方项

$$N'_{A_x} = 1, N'_{A_y} = c\theta, N'_{A_z} = -b\theta;$$

$$N'_{B_x} = \epsilon_{12} - c\theta, N'_{B_y} = 1, N'_{B_z} = a\theta;$$

$$N'_{C_x} = \epsilon_{13} + b\theta, N'_{C_y} = \epsilon_{23} - a\theta, N'_{C_z} = 1. \quad (4)$$

由反射公式

$$\begin{bmatrix} B'_x \\ B'_y \\ B'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1 - 2N_z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

上式表明了反射镜特点:一个 3×3 的反射矩阵 \mathbf{R} 可以将入射光与反射光联系起来。有

$$\mathbf{R}_{ijk} = \mathbf{R}_k \mathbf{R}_j \mathbf{R}_i, \quad (6)$$

这里, $i, j, k = 1, 2, 3$ 且 $i \neq j \neq k$ 。

对于三次反射,将(4)式代入(5)式,立方镜三个面的反射矩阵分别表示为

$$\mathbf{R}_{N'_A} = \begin{bmatrix} -1 & -2c\theta & 2b\theta \\ -2c\theta & 1 & 0 \\ 2b\theta & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_{N'_B} = \begin{bmatrix} 1 & -2(\epsilon_{12} - c\theta) & 0 \\ -2(\epsilon_{12} - c\theta) & -1 & -2a\theta \\ 0 & -2a\theta & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_{N'_C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -2(\epsilon_{13} + b\theta) \\ 0 & 1 & -2(\epsilon_{23} - a\theta) \\ -2(\epsilon_{13} + b\theta) & -2(\epsilon_{23} - a\theta) & -1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据三面全反射镜的反射顺序不同,可将以上三个反射矩阵先后相乘,比如,先从反射镜 B 入射,再反射到镜 A ,最后由镜 C 出射,则小角度镜面倾斜且微量转动的立方镜反射矩阵可分别表示为

$$\mathbf{R}_{CAB} = \mathbf{R}_B \mathbf{R}_A \mathbf{R}_C = \begin{bmatrix} -1 & -2\epsilon_{12} & 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{12} & -1 & 2\epsilon_{23} \\ -2\epsilon_{13} & -2\epsilon_{23} & -1 \end{bmatrix};$$

类似地

$$\mathbf{R}_{BCA} = \mathbf{R}_A \mathbf{R}_C \mathbf{R}_B = \begin{bmatrix} -1 & 2\epsilon_{12} & 2\epsilon_{13} \\ -2\epsilon_{12} & -1 & -2\epsilon_{23} \\ -2\epsilon_{13} & 2\epsilon_{23} & -1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_{ABC} = \mathbf{R}_C \mathbf{R}_B \mathbf{R}_A = \begin{bmatrix} -1 & -2\epsilon_{12} & -2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{12} & -1 & -2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{13} & 2\epsilon_{23} & -1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

由上述三个反射矩阵转置可得出另外三个反射矩阵,它们分别为 \mathbf{R}_{BAC} , \mathbf{R}_{ACB} , \mathbf{R}_{CBA} 。以不同顺序进行反射,出射光偏离的方向都不同,说明出射光束的方向对立方镜的反射顺序具有依赖性。针对这种依赖性,在实验中应选取偏离入射光最小的一组反射顺序,以获得最接近理想情况的反射状态。

一旦照明光束 \mathbf{S}_0 给定,就可以通过 $\mathbf{R} \times \mathbf{S}_0$ 计算出反射光向量 \mathbf{S}_{ijk} 。当光束沿立方镜的对称轴入射时,即 \mathbf{S}_0 的三个方向余弦值都为 $-\sqrt{3}/3$,对应的 \mathbf{S}_{CAB} 为

$$\begin{aligned} S_{x_{CAB}} &= \sqrt{3}/3 + 2\sqrt{3}/3(\epsilon_{12} - \epsilon_{13}); \\ S_{y_{CAB}} &= \sqrt{3}/3 - 2\sqrt{3}/3(\epsilon_{12} + \epsilon_{23}); \\ S_{z_{CAB}} &= \sqrt{3}/3 + 2\sqrt{3}/3(\epsilon_{13} - \epsilon_{23}). \end{aligned} \quad (9)$$

从以上的反射矩阵可以看出,微量 θ 角由于出现二次方项均已忽略不计,只存在非理想情况下立方镜的各镜面的微小差角 ϵ 。可以看出,立方镜的镜面倾斜对出射光束有相当的影响,而相对于立方镜的镜面倾斜,整体微量旋转对出射光束的影响几乎可以不考虑,因此,在一定程度上可以对于车载或机载出现的微震荡有抗干扰性。也就是说,如果三个平面反射镜之间的角度稍微有点偏离 90° ,对应于三面镜子上的六种不同反射顺序组合,出射光束被分为六个部分沿不同方向进行传播。若入射光方向平行

于立方镜的对称轴,那么,任意两束反射光都相对于入射方向而对称。如果入射光方向偏离立方镜对称轴小于几度时,这种对称并没有发生变形。因此,只要出射光近似地平行于对称轴,出射光方向就由镜间偏离 90° 的微小差角决定,而不必知道那入射光偏离对称轴之间的精确差角。立方镜对入射光位置的不敏感性,使得工作效率大大提高了。如果 ϵ_{12} , ϵ_{13} 和 ϵ_{23} 全为零,可以看出矩阵的主对角线上的元素全是 -1 ,其余全是 0 ,说明了立方镜可使光束旋转 180° 的特点。

1.3 偏差角与光束偏转角的关系

当光线是斜入射时,如果立方镜没有镜面倾斜,经过三个面的反射后出射光仍会平行于入射光,然而,实际制作的立方镜总会存在偏差角,下面研究偏差角对出射光方向的影响。

光束斜入射到非理想立方镜,可以等效为立方镜整体绕顶点作相等角度的旋转。对坐标进行变换

$$\mathbf{T} = \mathbf{M}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{M}^{-1}, \quad (10)$$

\mathbf{M} 为立方镜坐标系变换到定义坐标系的变换矩阵, \mathbf{B} 为坐标系绕其中一条轴转动 θ 角后的变换矩阵

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 2/\sqrt{6} & 0 & 1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{3} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (12)$$

通过坐标变换,正入射光矢量在坐标轴旋转后可以变化为以下形式

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}}\cos\theta \\ -\frac{1}{\sqrt{3}}\left(\cos\theta - \frac{3}{\sqrt{6}}\sin\theta\right) \\ -\frac{1}{\sqrt{3}}\left(\cos\theta + \frac{3}{\sqrt{6}}\sin\theta\right) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中 α, β, γ 为正入射光矢量的三个方向余弦,代入 (9) 式即求出出射光方向矢量。入射光与出射光方向夹角 δ 可以通过下式求出

$$\cos\delta = \frac{\mathbf{S}_0 \cdot \mathbf{S}_{CAB}}{|\mathbf{S}_0| \cdot |\mathbf{S}_{CAB}|}. \quad (14)$$

为了方便,令 ϵ_{12} 不等于零, ϵ_{12} 和 ϵ_{23} 为零,计算出光束偏离角与偏差角和立方镜旋转角的关系式

$$\cos\delta = \left[\sqrt{1 + \epsilon_{12}^2 \left(\frac{8}{3}\cos^2\theta + 2\sin^2\theta - \frac{8}{\sqrt{6}}\sin\theta \right)} \right]^{-1}. \quad (15)$$

当立方镜存在偏差角时,出射光方向发生了偏移, ϵ_{12} 愈大,立方镜旋转愈厉害,出射光束偏离入射方向也愈大。当 ϵ_{12} 为零时,立方镜绕顶点旋转并不改变出射方向。要减少镜面倾斜对出射光的影响,必须调整好镜间角。

2 实验装置

实验中所用的立方反射镜是由三块边长为 7 cm 的正方形平面反射镜组装而成。先将一块反射镜紧粘在一块铝板上,再将两个粘有另外两块全反射镜的螺旋微调装置分别紧挨着底面镜两邻边用螺钉固定在铝板上,垂直放置的两面反射镜可作二维调整。安装有该立方镜的底板固定在与水平面成 35.26° 的斜面底座上,以使该立方镜的轴线同水平方向入射的激光束平行。斜面底座再固定在上海联谊光纤激光器械厂生产的 ARB4 型精密旋转平台上,因而立方镜整体可作水平方向旋转,以研究其存在失调时对激光器性能的影响。

3 立方镜的调整和偏差角的测量

先将三面全反射平面镜两两垂直地固定在一起构成一个立方镜。调整过程中,需要获得较大的调整精度(mrad 量级)。每面镜子上都有旋钮,通过观察线性极化的反射光的远场强度分布,用微调旋钮对立方镜三镜面进行精细调节^[15]。调整测量系统如图 2 所示。激光束经过望远镜扩束后正入射到立方镜上,经反射后从半透半反镜反射到功率计上,可以检测反射后的光强度;光束从望远镜原路反射回来,这时可以观察到六个分散的小光点。

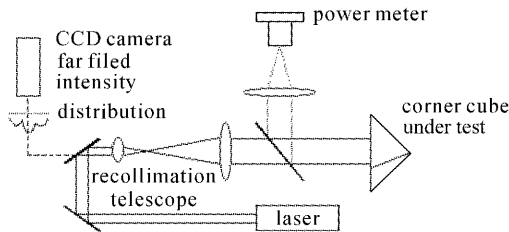


图 2 立方镜的调整测量系统

Fig. 2 The schematic of apparatus used to align and test corner cube mirrors

当调整偏差大于 1 mrad 时,出射光的方向余弦值由出现在焦距为 1 m 的透镜焦平面上的六个反射光点几何确定。

立方镜的反射光点总是对立方镜的对称轴形成对称像。在调整中,观察像点的位置,调节三面反射镜,尽可能将所有的反射光点调节重合在一起。用 CCD 接收观察时,当一个像点达到调整目标时,其他点很有可能就落到了探测器能探测到的范围之外。

调整立方镜三个平面两两垂直的时候,当偏差角小于 $1'$ 时,用普通的几何方法来测定已经不可能了,这时可采用干涉法来进行调整并且测量^[16,17]。将立方镜(或立方棱镜)作为迈克尔逊干涉仪的一个支臂,用波长为 532 nm 绿光激光器作为光源,经过扩束望远系统,扩束后的光斑直径为 24 mm,然后照射到立方镜的中心顶点上;另一支光路中,参考光从一个平面镜反射回来,两束光在纸屏上形成干涉条纹。实验装置如图 3 所示。调节平面反射镜,使干涉条纹越来越宽,直到获得清晰的均匀场。

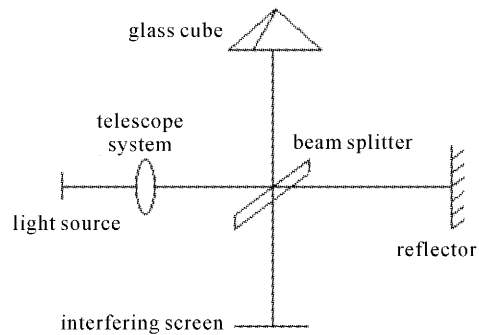


图 3 迈克尔逊干涉仪测量立方镜

Fig. 3 Schematic diagram of the Michelson interferometer measuring corner cube

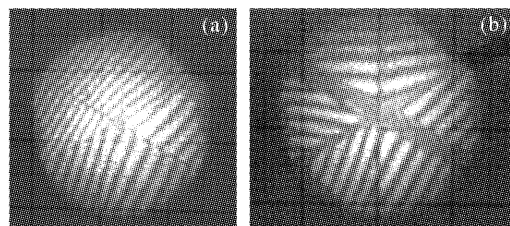


图 4 两种立方镜的干涉图样

(a) BK-7 立方棱镜;(b) 立方反射镜

Fig. 4 Michelson interferogram of two corner cubes

(a) BK-7 glass corner cube; (b) mirror corner cube

由于立方镜将光路弯折了,灵敏度则为普通干涉仪的 2 倍,而立方镜的面倾斜引起的光路侧向平移导致光路径偏移也不会影响到条纹的稳定性^[16]。装置产生的干涉图样由六块不同条纹间隔及条纹方向的扇形组成,图 4 为实验中 CCD 在干涉屏上拍摄到的条纹图样。

条纹间隔以及条纹方向都与相应的角偏差 ϵ 有着紧密的关联^[17]。所有的条纹频率都可以由测量间隔计算出来,实验数据如表 1 给出。利用余弦定理可求出同一镜面出射的反射向量(单位矢量)的矢量差 L_{ij} 。则角偏差 ϵ 与 L 成比例关系可表示为

$$\epsilon_{ij} = ML_{ij}/4\sqrt{2/3n}; \quad i = 1, 2; j = 2, 3. \quad (16)$$

其中 M 为拍摄到的图样尺寸大小与实际图样尺寸大小的比率, n 为光的折射率(λ 为 532 nm 的光在 BK-7 及空气中传播时 n 分别为 1.52 和 1)。

表 1 图 4 中干涉条纹的测量数据和两立方镜的对应角偏差

Table 1 Data for interferogram in Fig. 4 and computed dihedral angle errors for two corner cubes

Aperture segment	Glass cube			Mirror cube		
	Frequency /mm ⁻¹	Relative angle /(^o)	Dihedral angle error (arcsec)	Frequency /mm ⁻¹	Relative angle /(^o)	Dihedral angle error (arcsec)
321	0.19	7.5	$\epsilon_{23} = 3.51$	0.20	10.1	$\epsilon_{23} = 4.66$
231	0.25			0.24		
312	0.20	4.0	$\epsilon_{13} = 3.83$	0.21	30.8	$\epsilon_{13} = 8.75$
132	0.27			0.19		
123	0.33	7.5	$\epsilon_{12} = 2.33$	0.19	10.7	$\epsilon_{12} = 3.97$
213	0.34			0.22		

将数据进行处理,代入(16)式,分别求出两种立方镜三个面的微偏差 ϵ ;将 ϵ 值代入(9)式,即可求出反射光矢量 S_{ijk} ;当光束以一定角度 θ 斜入射时,代入(15)式可求出出射光与入射光的夹角 δ ,这对用立方镜作为激光器光学元件的研究具有实际意义。

参 考 文 献

- Bao Zhao-ri-ge-to, Zhou Shouhuan, Zhao Haixia *et al.*. High beam quality 1.57 μm OPO [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5):395~397
包照日格图,周寿桓,赵海霞等. 高光束质量 1.57 μm 的光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5):395~397
- Ma Haixia, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. A novel resonator to improve the laser beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11):977~980
马海霞,楼祺洪,董景星等. 一种改善激光器输出光束质量的新型谐振腔[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11):977~980
- Shi Peng, Zhang Hengli, Wang Yongdong *et al.*. High repetition rate electro-optically Q-switched Nd:YVO₄ slab laser with high beam quality output [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5):641~644
石 鹏,张恒利,汪永东等. 高重复率电光调 Q 的高光束质量 Nd:YVO₄ 板条激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5):641~644
- Shi Peng, Li Daijun, Zhang Hengli *et al.*. High power partially end-pumped slab laser with hybrid resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):491~494
石 鹏,李代军,张恒利等. 大功率部分端面抽运混合腔板条激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4):491~494
- Wang Xubao, Chen Jimin, Li Gang *et al.*. Study of frequency doubling in a KTP crystal on Q-switch Nd:YAG laser by the resonant external ring cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):477~480
王旭葆,陈继民,李 港等. 调 Q Nd:YAG 环形腔外腔倍频技术研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4):477~480
- Zhao Tong, Han Xinmin, Liu Wanfa *et al.*. Geometric analysis

- on COIL unstable ring resonator with beam reversion [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(Suppl.):12~16
赵 彤,韩新民,刘万发等. COIL 光束翻转环形非稳腔几何特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(增刊):12~16
- P. R. Yoder, Jr.. Study of light deviation errors in triple mirrors and tetrahedral prisms [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1958, **48**(7):496~499
- Reiner Hofmann, Reinhard Katterloher, Peter Essenwanger. Corner cube reflector for cryogenic interferometric use [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(24):4614~4617
- Marija S. Scholl. Ray trace through a corner-cube retroreflector with complex reflection coefficients [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(7):1589~1592
- Xiaoming Zhu, Victor S. Hsu, Joseph M. Kahn. Optical modeling of MEMS corner cube retroreflectors with misalignment and nonflatness [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(1):26~32
- Cai Yanmin, Fang Zhuji, Chen Gang *et al.*. Effective reflection area of a cube corner retroreflector [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **B9**(5):429~433
- Fan Weijun, Zhou Bifang, Wang Haitao *et al.*. Research of Fourier phase in optical synthetic-aperture imaging technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3):408~412
范伟军,周必方,王海涛等. 光学综合孔径成像中的傅里叶相位研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3):408~412
- David A. Thomas, J. C. Wyant. Determination of the dihedral angle errors of a corner cube from its Twyman-Green interferogram [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(4):467~472
- Lian Tongshu. Alignment of Prisms [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1978
连铜淑. 棱镜调整[M]. 北京:国防工业出版社,1978
- C. C. Shih, G. J. Linford, S. W. Quon *et al.*. Image-relayed corner cube ring resonator [C]. *SPIE*, 1990, **1224**:393~408
- George W. Stroke. Interferometry with rotation-insensitive "corner-cube" systems and lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**(3):330~336
- Chiayu Ai, Kenneth L. Smith. Accurate measurement of the dihedral angle of a corner cube [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(4):519~527