

HL-2M 装置 CO₂ 色散干涉仪的金属角锥反射镜特性研究

李 远, 周 艳, 王浩西, 李永高, 易 江, 邓中朝

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

摘 要: 针对金属角锥反射镜的加工装配误差对传输光路的影响, 研究了金属角锥反射镜二面角误差与反射光束的关系。详细分析了金属角锥反射镜表面面型及形态对反射特性的影响, 并对不同角锥反射镜各个区域的反射率进行测量对比, 对金属角锥反射镜的偏振特性也进行分析。研究表明, 应用于 HL-2M 装置 CO₂ 色散干涉仪中金属角锥反射镜的表面面形加工精度应在 0.3 μ m 之内, 二面角的装调误差宜为正公差且控制在 30°内, 且表面镀膜的膜层牢固不易脱落。

关键词: 金属角锥反射镜; 二面角误差; 反射特性; 偏振特性

中图分类号: O539

文献标识码: A

1 引言

金属角锥反射镜是一种在加工和装配精度方面要求较高的空心光学元件, 它是由 3 个相互垂直的平面反射镜构成, 基质为特殊的金属材料(目前主要有 CuCrZr 合金、CuCr 合金、Cu、Mo、W 等)。角锥反射镜具有光束沿原方向返回的光学特性, 受机械和电磁振动的影响较弱, 因而避免了在机械结构上多次重复调试。基于角锥反射镜的上述优点, 目前国内外众多核聚变装置的偏振仪和干涉仪诊断系统, 如 C-Mod 托卡马克^[1]、Tore Supra 装置^[2]、EAST 装置^[3]、LHD 装置^[4]等, 均采用金属角锥反射镜结构, 包括 ITER 装置^[5-7]也将会引入金属角锥反射镜。

金属角锥反射镜一般安装在装置真空室内的第一壁强场侧位置。真空室辉光放电清洗及装置等离子体放电都会造成金属角锥反射镜表面的侵蚀及杂质沉积, 长时间工作后会降低角锥反射镜的有

效反射率^[8, 9]。文献[10, 11]研究了长期暴露在等离子体中被等离子体溅射轰击后的金属角锥反射镜的光学性质的变化, 在文献[12]中对未来要应用在 ITER 中的金属角锥反射镜在模拟环境下对其光学特性作了一些研究。文献[13]从理论上推导了金属角锥反射镜表面的偏振态的变化并进行了讨论。目前, 由加工装调误差导致金属角锥反射镜对实际测量的影响还少有报道。

在未来 HL-2M 装置的远红外激光偏振干涉仪和 CO₂ 色散干涉仪中也将使用金属角锥反射镜^[14]。目前国内外核聚变装置中所采用的金属角锥反射镜均为国外研制产品且价格高昂, 本文分析研究的金属角锥反射镜是国内研制产品且专门为干涉仪设计加工。在金属角锥反射镜的研制过程中会存在着二面角误差, 其二面角误差会影响光束在传输过程中的反射和衍射等光学特性。本文给出带有二面角误差的角锥反射镜反射光线矢量公式, 从理论上

收稿日期: 2017-11-23; 修订日期: 2018-05-30

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2014GB109001)

作者简介: 李远(1981-), 女, 河南驻马店人, 硕士, 工程师, 主要从事托卡马克装置光学机械设计及相关技术研究。

计算了角锥反射镜不同二面角误差下反射光束偏移量,并测量多个金属角锥反射镜的反射光束偏移误差。在金属角锥反射镜表面面型对反射率的影响方面进行分析,对金属角锥反射镜的不同反射区域进行反射率测量对比,并对其表面形态进行扫描观测。同时在金属角锥反射镜对传输光束偏振的影响上也进行了全面研究。

2 CO₂ 色散干涉仪布局及金属角锥反射镜结构

由于 HL-2M 装置大厅空间条件的限制,CO₂ 色散干涉仪的测量光路采用经过等离子体中心上下对穿并且经过折返反射镜后原光路返回的布局,如图 1 所示。为了排除人为干涉及达到防震动的目的,折返反射镜采用金属角锥反射镜。探测光源为波长 10.6μm 的高斯光束,为了保证探测光束进出等离子体的光学特性一致性,高斯光束束腰设计在角锥反射镜上。从发射光束经反射镜 M₁ 进入等离子体后,经过金属角锥反射镜后光束折回到反射镜 M₂ 的传输光路至少长达 11m,而传输光路 L₁、L₂ 需要保持平行并且近乎垂直于真空窗口。这不仅加大了光路调节难度,而且增加了对金属角锥反射镜的加工要求。

金属角锥反射镜的安装位置靠近烘烤设备组件,必须考虑温度对金属角锥反射镜的影响,因此进行了温度烘烤检测实验。把金属角锥反射镜放进烘烤炉经过 12h、200℃ 的烘烤后,测量角锥反射镜的反射率发现其反射率并未发生明显改变。

图 2 给出了专门为 CO₂ 色散干涉仪设计且国内加工的金属角锥反射镜样品。图 2a 为金属角锥反射镜及安装基座,图 2b 为金属角锥反射镜保护罩。其中反射镜的基质材料为 Cu,表面镀 Au 膜,通光口径 54mm。倾斜深度为 38.2mm。基座及保护罩材料为不锈钢。

根据 HL-2M 装置 CO₂ 色散干涉仪系统对光路传输和光学元件的设计要求,金属角锥反射镜的二面角误差、面型误差及镀膜情况对反射特性、偏振特性以及光束传输等方面的影响必须研究和分析。

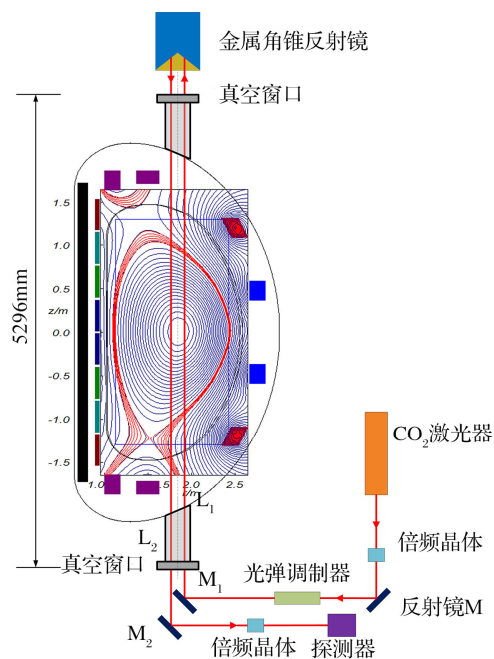


图 1 HL-2M 装置中 CO₂ 色散干涉仪示意图

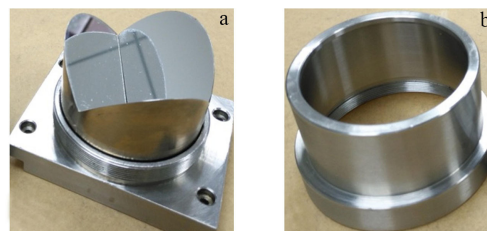


图 2 金属角锥反射镜(a)及保护罩样品(b)

3 二面角误差对角锥反射镜反射光束的影响

3.1 反射光线的几何计算

角锥反射镜是由三个独立且相互垂直的平面反射镜构成,任意光线入射到角锥反射镜,经过三次反射后出射,其工作原理如图 3a 所示,若入射光线以矢量 A_i 表示,出射光线以矢量 A_r 表示,则由反射定律的矢量表达式^[15]为:

$$A' = A - 2(A \cdot N)N \quad (1)$$

式中, A 、 A' 、 N 分别为入射光线、反射光线和法线的单位矢量。

理想情况下,出射光线为:

$$A_r = -A_i \quad (2)$$

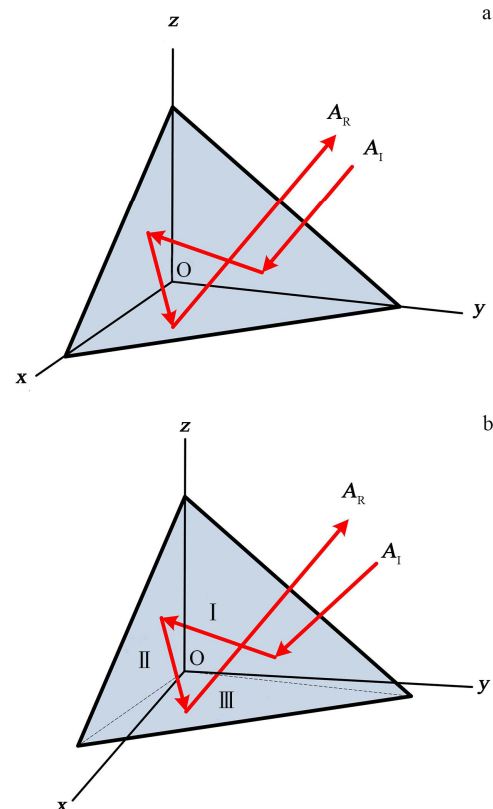


图 3 角锥反射镜入射光线和反射光线关系图
a——理想角锥反射镜；b——有二面角误差的角锥反射镜。

对于理想的角锥反射镜来说，其反射光线与入射光线的传输方向相反。角锥反射镜具有逆向反射特性。

在金属角锥反射镜的加工和装配过程中，两两反射面之间会存在二面角误差，设误差角度值分别为 δ_{12} 、 δ_{23} 、 δ_{13} 。如图 3b 所示，角锥反射镜的三个反射面为分别设为 I、II、III，以 I 面为 $yo z$ 面，I 面和 II 面的相交棱为 oz 轴建立坐标系^[16]。

假设入射光线矢量为：

$$A_i = -ai - bj - ck \tag{3}$$

式中， a 、 b 、 c 均为任意正数； i 、 j 、 k 分别为 x 、 y 、 z 轴上的单位矢量。

由反射定律矢量表达式可以推导出：

$$A_r \approx (a + 2b\delta_{12} + 2c\delta_{13})i + (-2a\delta_{12} + b + 2c\delta_{23})j + (-2a\delta_{13} - 2b\delta_{23} + c)k \tag{4}$$

当角锥反射镜存在二面角误差时，反射光线与入射光线之间不再是反向关系，反射光线的传输方向与每个二面角误差值均有关。

另外，角锥反射镜存在一个有效反射面，入射光束必须在角锥反射镜的有效反射面内入射，才能全部反射回来。有效反射面与光束入射角及角锥反射镜的结构尺寸有关^[17]。

3.2 反射光束偏离误差的模拟与测量

通过建立角锥反射镜模型来模拟分析不同二面角误差情况下的反射光线的传输方向。如图 4 所示，中轴线通过角锥反射镜中心并垂直于底面。入射光线平行于中轴线为正入射光线，其它均为斜入射光线。 Δd 为反射光束偏离误差，是与理想情况下相比的反射光束的水平偏移量。

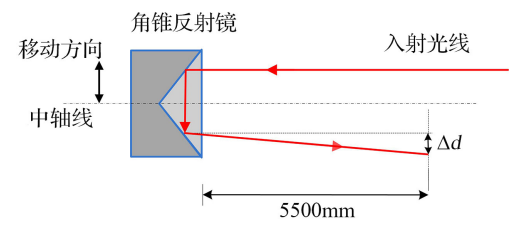


图 4 带有二面角误差的角锥反射镜反射光束偏离量示意图

设角锥反射镜三个二面角误差相同，发现当光束正入射到角锥反射镜的其中一镜面且二面角误差为负(二面角小于 90°)时，反射光线靠近角锥反射镜中心；当二面角误差为正(二面角大于 90°)时，反射光线偏离角锥反射镜中心。数值列于表 1 中。

表 1 不同二面角误差下反射光束 5500mm 的光束偏离值			
二面角误差	$\Delta d/\text{mm}$	二面角误差	$\Delta d/\text{mm}$
20"	2.78	-20"	-2.78
30"	4.17	-30"	-4.17
40"	5.56	-40"	-5.55
50"	6.93	-50"	-6.94

图 1 中光束传输到反射镜 M_2 的偏移量大小决定反射光束能否从下端真空窗口全部传输，所以须考虑在角锥反射镜反射光束传输到 M_2 (距离约为 5500mm)时的光束偏离误差 Δd 。在不同二面角误差

下模拟计算值列于表 1 中, 经过图 1 中反射镜 M_1 和 M_2 的位置计算可知, 二面角误差宜为正公差且控制在 $30''$ 内为佳。

分别选取两个金属角锥反射镜样品 1#和 2#作为测试目标来测量反射光束的偏离量的光学平台布局如图 5 所示, 模拟金属角锥反射镜在 HL-2M 色散干涉仪中的位置, F 为球面反射镜, M 为平面反射镜。图 5a 中以 HeNe 激光为光源, 光束正入射到金属角锥反射镜中心, 带有刻度的靶标中心在角锥反射镜中心轴线方向上。通过图 5b 中的方向水平移动金属角锥反射镜, 使光束分别照射在角锥反射镜其中一个反光面的不同位置, 并在刻度靶标上记录光束传输的位置。其中, s 为角锥反射镜移动的距离; z 为刻度靶标上光束偏离中心的距离, 反射光束偏离误差 Δd 为 $z-2s$ 。

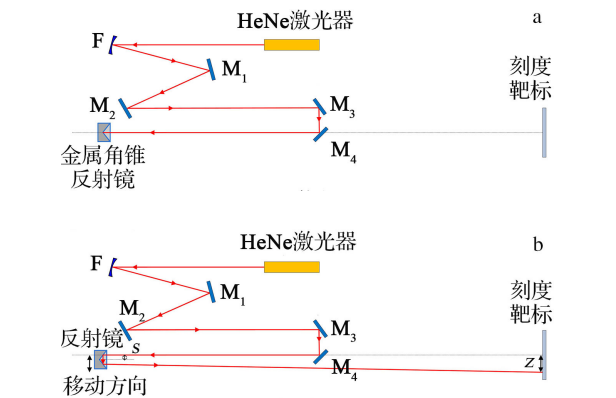


图 5 金属角锥反射镜反射光束偏离量测量图
a——以刻度靶标中心为参考基准的光路布局; b——移动金属角锥反射镜后的光束偏离量示意图。

金属角锥反射光束偏离误差测量值列于表 2 中, 它们主要是由角锥反射镜的二面角误差造成的。当入射光束越靠近角锥反射镜的边缘位置, 反射光束的偏离误差值越大。其中, 1#样品加工的三个二面角误差正负公差都有, 由于误差值较小, 通过实际测量得出 1#样品可以达到实际应用要求。2#样品的二面角误差虽均为正公差, 但是误差较大, 为不合格品。通过这种测量方法可以对金属角锥反射镜的装配精度做一个衡量标准。

表 2 金属角锥反射镜样品的反射光束偏离误差测量值

s/mm	1#/ $\Delta d/\text{mm}$	2#/ $\Delta d/\text{mm}$
9	-5.5	7.5
11	-6.5	10.5
13	-5.0	11.5
15	0.0	13.0
17	2.0	14.5
19	5.0	17.0
21	6.5	19.5
23	9.0	20.5

4 金属角锥反射镜的反射率测量

在 HL-2M 装置中的 CO_2 色散干涉仪的传输光路长达 $\sim 30\text{m}$, 光束传输距离很长, 保证金属角锥反射镜有较高的反射率也是至关重要。

当反射镜的基质为金属材料时, 其表面的相对反射率^[18]为:

$$R/R_0 = \exp\left[-(4\pi\sigma)^2/\lambda^2\right]$$
 (5)

式中, R 为粗糙表面的反射率; R_0 为理想光滑表面的反射率; σ 为表面粗糙度; λ 为入射光波长。

对于金属角锥反射镜来说, 光束经过三次反射, 因此, 金属角锥反射镜的相对反射率为:

$$R_r = (R/R_0)^3$$
 (6)

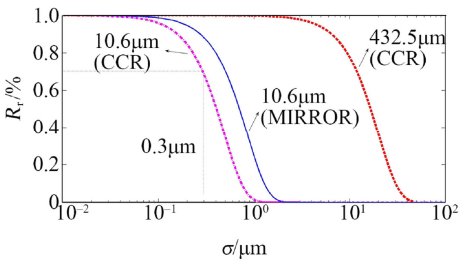


图 6 相对反射率随表面粗糙度的变化图

金属角锥反射镜是 HL-2M 装置偏振干涉仪和色散 CO_2 干涉仪中的一种反射器件, 干涉仪工作波长分别为 $432.5\mu\text{m}$ 和 $10.6\mu\text{m}$ 。图 6 为角锥反射镜 (CCR) 和平面反射镜 (MIRROR) 在两种波长下的反射率和表面粗糙度的关系变化曲线图。镜面表面粗糙度对 $432.5\mu\text{m}$ 波长光束的反射率影响很小, 对 $10.6\mu\text{m}$ 波长影响很大, 因此短波长应用中对镜面面型的加工精度要求更高。

而对于 10.6 μm 波长的光束, 角锥反射镜相对于平面反射镜来说, 相同的反射率要求更小的表面粗糙度。当实际加工的表面粗糙度为 0.3 μm 时, 平面反射镜的反射率几乎达到 90%, 而金属角锥反射镜的相对反射率只接近 70%, 表面镀金属膜可以满足要求。因此金属角锥反射镜的表面加工精度控制在 0.3 μm 以内。

为了检测金属角锥反射镜加工样品的镜面反射特性, 用短波长激光光源在光学平台上进行了反射率的测试实验。检测光源为 10.6 μm 的 CO₂ 激光束, 选用两个不同的角锥反射镜样品分别为 1#和 2#(与表 2 中相同)测得反射镜面不同位置的反射情况。

图 7a 为反射率测量的实验布置图, HeNe 激光束为参考光束。激光束通过反射镜 M 传输一定的距离到功率计, 测得激光功率值 P_1 。移除反射镜 M, 使得激光束经过角锥反射镜到达功率计传输相同的距离。按图中方向移动角锥反射镜使得光束正入射, 测的不同的功率值 P_2 , 相对反射率 R 为 P_2 与 P_1 的比值。在移动角锥反射镜的过程中, 通过参考光束来确定功率计的探测位置, 图 7a 中所用功率计为同一个器件。反复多次测量后取平均值得到角锥反射镜不同测量点的反射率, 如图 7b 所示。

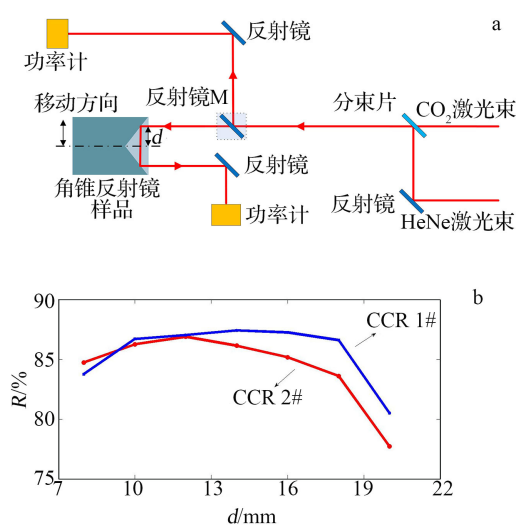


图 7 角锥反射镜反射率测量的实验布局(a)及结果图(b)

由图 7b 中的测量结果可知, 样品角锥反射镜边缘区域的反射率较低, 部分原因是由于二面角误差引起的反射光束偏离造成了光束斜入射到功率计探头上, 导致少量接收能量损失。其中样品 2# 的反射率较低是由于二面角误差较大造成的。

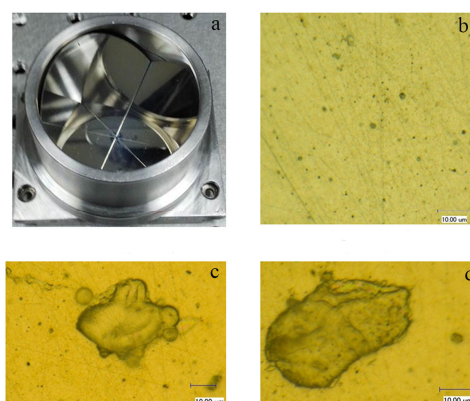


图 8 扫描电镜(SEM)在 2#样品角锥反射镜的表面观测图
a——检测样品; b——样品表面扫描图; c——样品局部图片 1;
d——样品局部图片 2。

为了进一步检测样品 2#金属角锥反射镜的表面膜层是否会造成反射率下降, 用扫描电镜(SEM)对样品 2#角锥反射镜进行扫描观测如图 8 所示。图 8a 扫描电镜所要扫描的角锥反射镜样品, 图 8b 在扫描电镜的高放大倍率下的角锥反射镜表面情况, 可以看到表面有划痕及直径大小为 1~2 μm 的斑点, 是由于表面镀膜造成的。图 8c 和图 8d 分别是在角锥反射镜边缘区域扫描到的图片, 有少量尺寸为 10~20 μm 的斑坑, 这是由于角锥反射镜表面的膜层剥落, 可能是造成样品 2#反射率下降的其中一个原因。因此金属角锥反射镜的镀膜要求膜层牢固, 避免可能造成反射率下降。

5 金属角锥反射镜的偏振特性

CO₂ 色散干涉仪系统中有倍频晶体和光弹调制器等重要的光学器件, 倍频晶体和光弹调制器均对入射光束的偏振性有很高要求, 需要带有特定角度偏振方向的入射光束通过。传输过程中光束偏振方向的改变会给最终测量结果带来误差。

图 9a 是为了检测角锥反射镜对光路偏振特性影响而搭建的实验光路。入射光源采用波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 激光, 激光束为高偏振度的线偏振光, 偏振片采用中波红外高透射的硅基底材质。以偏振片不同偏振角度测量的平面反射镜功率值作为参考基准, 为了排除不必要的误差因素, 移去反射镜 M, 激光束经过角锥反射镜样品反射传输到功率计, 并在同一偏振方向开始旋转偏振片, 得到不同偏振角度的功率值如图 9b 所示。

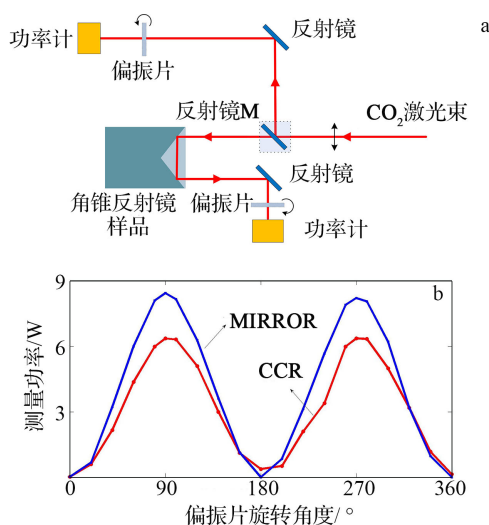


图 9 角锥反射镜偏振特性测量的实验布局(a)及结果图(b)

从图 9b 中的测量曲线可以看到, 对平面反射镜的测量结果显示平面反射镜不会改变激光束的偏振态。在光束正入射到金属角锥反射镜的情况下, 当偏振片旋转到 180° 时的测量值不归零及部分测量值的偏差可能是测量误差造成的。角锥反射镜基本上不影响传输光束的线偏振特性。

6 总结

金属角锥反射镜具有反射光束沿原方向返回的光学特性, 而且对机械振动和电磁振动均不敏感, 使其免于极其精确的机械调试, 金属角锥反射镜也越来越广泛地应用在核聚变装置的诊断系统中。本文主要分析在 CO_2 色散干涉仪的应用中金属角锥反射镜的反射和偏振等光束传输过程中的光

学特性。金属角锥反射镜二面角误差会影响光路的传输方向, 造成反射光束传输路径的偏离, 角锥反射镜的二面角误差宜为正公差且误差角度控制在 $30''$ 以内。当 $10.6\mu\text{m}$ 波长的激光束照射金属角锥反射镜时, 其表面粗糙度对反射率的影响更为明显, 镜面面型加工精度要求控制在 $0.3\mu\text{m}$ 内。金属角锥反射镜表面膜层不均匀及镀膜不牢固也会降低表面反射率。金属角锥反射镜基本上不影响线偏振光的偏振特性。金属角锥反射镜是一个应用前景很好的反射光学器件, 未来的一些聚变装置的诊断系统也将会越来越多地引入金属角锥反射镜。

参考文献:

- [1] Irby J H, Bergerson W F, Brower D L, et al. FIR polarimetry diagnostic for the C-Mod tokamak [J]. JINST, 2012, 7: C02033.
- [2] Gil C, Elbeze D, Portafaix C. Development of the IR interfero-polarimeter for long pulse operation at Tore Supra [J]. Fusion Engineering and Design, 2001, 56-57: 969-973.
- [3] Liu H Q, Jie Y X, Ding W X, et al. Faraday-effect polarimeter-interferometer system for current density measurement on EAST [J]. Rev. Sci. Instrum., 2014, 85: 11D405.
- [4] Akiyama T, Yasuhara R, Kawahata K, et al. Dispersion interferometer using modulation amplitudes on LHD [J]. Rev. Sci. Instrum., 2014, 85: 11D301.
- [5] Donné A J H, Graswinckel M F. Poloidal polarimeter for current density measurements in ITER [J]. Rev. Sci. Instrum., 2004, 75(11): 4694-4699.
- [6] Litnovsky A, Wienhold P, Philipps V, et al. Diagnostic mirrors for ITER: A material choice and the impact of erosion and deposition on their performance [J]. J. Nucl. Mater., 2007, 363-365: 1395-1402.
- [7] Imazawa R, Kawano Y, Ono T, et al. Terrace retro-reflector array for poloidal polarimeter on ITER [J]. Rev. Sci. Instrum., 2011, 82: 023116.
- [8] Gil C, Elbeze D, Beraud A, et al. Retro-reflected channels of the Tore Supra FIR interfero-polarimeter for long pulse plasma operation [J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82: 1238-1244.
- [9] Akiyama T, Yoshida N, Kawahata K, et al. Studies of reflectivity degradation of retroreflectors in LHD and mitigation of impurity deposition using shaped diagnostic ducts and protective windows [J]. Nucl. Fusion, 2012, 52: 063014.
- [10] Giudicotti L, Brombin M, Prunty S L, et al. Far-infrared polarimetric characterization of metallic mirrors exposed to a tokamak plasma [J]. Rev. Sci. Instrum., 2006, 77: 123504.
- [11] Akiyama T, Kawahata K, Ashikawa N, et al. Changes of

- optical properties of retroreflector installed in LHD [J]. Rev. Sci. Instrum., 2007, 78: 103501.
- [12] Voitsenya V S, Donné A J H, Bardamid A F, et al. Simulation of environment effects on retroreflectors in ITER [J]. Rev. Sci. Instrum., 2005, 76: 083502.
- [13] Bieg B. Polarization properties of a metal corner-cube retroreflector [J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 96–97: 729–732.
- [14] Zhou Y, Wang H X, Li Y G, et al. The conceptual design of interferometer/polarimeter system on HL-2M [J]. Rev. Sci. Instrum., 2016, 87: 11E107.
- [15] Marija S Scholl. Ray trace through a corner-cube retro-reflector with complex reflection coefficients [J]. Opt. Soc. Am. A, 1995, 1(7): 1589–1592.
- [16] 匡萃方, 冯其波, 刘欣. 用矢量方法分析角锥棱镜直角误差对其光路反射特性的影响 [J]. 光学仪器, 2003, 25(4): 55–58.
- [17] 焦仲科, 岳永坚. 角锥棱镜的入射角及有效反射面积分析 [J]. 半导体光电, 2014, 35(5): 811–816.
- [18] Bennett H E, Porteus J O. Relation between surface roughness and specular reflectance [J]. Journal of the Optical Society of America, 1961, 51(2): 123–129.

The retroreflector characteristics study in CO₂ dispersion interferometer on HL-2M tokamak

LI Yuan, ZHOU Yan, WANG Hao-xi, LI Yong-gao, YI Jiang, DENG Zhong-chao
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041)

Abstract: For the influence of the mental retroreflector processing and installation error on the optical propagation, the relationship between the dihedral angle error of the retroreflector and the reflected beam was studied. The impacts of the surface and morphology of retroreflector on reflection properties was analyzed, and the reflectivity of different retroreflector cone was measured and compared. The polarization characteristics of retroreflector was also analyzed. According to the study results, for the retroreflector in CO₂ dispersion interferometer on HL-2M tokamak, the surface machining accuracy should be within 0.3μm, the dihedral angle error should be a positive tolerance and controlled within 30", the surface coating is firm and uneasy to fall off.

Key words: Metal retroreflector; Dihedral angle error; Reflection properties; Polarization properties