

精密光学元件的现状

摘 要

由于光电技术以及其它各技术的综合发展,使精密光学元件正在形成一个技术领域,下面就精密光学元件的内容及有关技术问题,用几个具体的实例加以叙述。

1. 绪 言

对于折射和反射用的光学元件要求高精度是理所当然的,但是,其中特别是高精度的,例如平面精度为 $1/10$ 个波长以及角精度在 $5'$ 以上的均应称之为精密光学元件,因此,目前它正在形成一个领域。同时,由于这些部件的产品通用性很大,因此人们的注意力着眼于精密光学元件(*Loose Optics*)。

这些光学元件致所以成为一个技术领域,这主要是自从1960年以来,由于美国宇宙事业的发展,需要各种各样高精度的光学元件。因此,促使制造这些元件的材料及加工工艺获得大力发展,发展的结果就作为一个新的技术领域而出现。随着宇宙开发事业的发展而出现的精密光学元件在美国已经得到飞快发展,同时在激光、分光光学、光学信息处理、测量、工业计量以及各种光学研究等领域里都出现了新的用途,由于对这类精密光学元件的需要急剧增加,所以在美国制造精密光学元件的厂商是很多的。而在日本,这类精密光学元件的市场到目前为止,规模还没有像美国那样大,可是,有些光学制造厂商,为了制造各种高精度的光学元件,需要进行高精度技术方面的研究。

2. 精密光学元件的特点

通常所采用的单个精密光学元件,多数为平板、棱镜以及多面体,构成其形状主

要是以平面为主,而球面透镜式的是很少的。虽然它们使用的目的不同,不管对光的折射或反射,但作为精密光学元件的必备条件,其光路应受到严格的限制,也就是说,光的波面应无畸变。根据这一点,构成单个精密光学元件的条件是:

- (1) 元件的平面与角度应具备高的精度;
- (2) 元件材料的光学均匀性应十分高;
- (3) 必须保证光学元件产品的光学性能。

综合以上三项精度,可以说是完全应该的。

3. 精密光学元件的技术问题

3.1 平面的加工与测定

作为精密光学元件制造的首要问题,就是怎样能获得高精度的平面件。在以前,一般的光学平面加工时,玻璃盘旋转,在其表面上涂有沥青或相应的合成树脂材料作为研磨器具,在研磨器具上加以氧化铈之类的研磨剂,研磨器具作摆动,一直到玻璃盘所要达到的平面精度。这种方法最大的缺点是消耗量取决于手,由于被加工的光学玻璃和研磨器具的相对运动速度不可能完全一样,从原理上来讲,都达到一致的平面是困难的,偶而一次,既使有机会达到平面要求,而要保持它们的形状不变是不可能的。实际上,以前的加工精度是依靠熟练工人的经验来得到

的，精心调整各种加工条件而进行精密研磨，其精度最大可以达到1/10个波长（或牛顿环——一个色），对于直径大于100毫米以上者，那就更困难了。但是，在最近出现了完全改革了老式研磨机缺点的高精密加工的设备，如果采用这种设备，被加工工件的平面精度可以比较随意控制，就日本的经验来说，直径在300毫米时，其精度可达1/20个波长；直径为150毫米时，其精度可达1/150个波长，直径为100毫米时，其精度可达1/200个波长的平面精度。

平面精度的测定，多数是以非涅尔干涉法进行的，其测量原理如图1所示。在被测

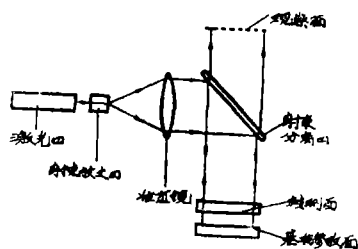


图1

定面与基准参考面之间产生干涉，然而，假如把被测定面对应于参考面稍微倾斜一下，那么就要产生如图2所示的图形，它基本上为直线形状的干涉图形，在观察面上可以进行观察。图2中所示，从干涉条纹的间隔 p 和条纹的弯曲量 b 就可求出 S ：

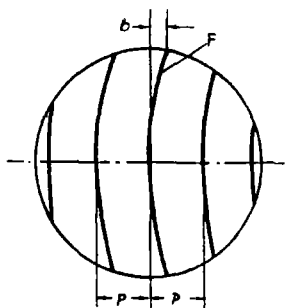


图2

$$S = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{b}{p}$$

(λ 为激光波长)

S 为沿条纹 F 方向被测面与参考面之间

偏差。总之，如果有一个正确的参考平面， S 就有表示被测量平面度的意义了。在没有正确的参考平面时，这样是不行的，但是，特别是具有任意二块平面组成的，它们与被测物的关系为三个面，依次记录3种一组相配合的干涉条纹。由于分析其结果，三个面每个面的形状是可以知道的（参考后面图5）。被测物尽管超出了参考基准里面的平行度，但是这个面上增强了干涉，得不出必要的测定值。因此两者都在内，把里面的平行度故意失调是有必要的，其量为10分以上是适宜的。

为了增强干涉条纹的可见度和提高其测量精度，就要在被测面（或参考基准面）上镀一层银铝等高的反射膜以进行多光束干涉。反射率若高，线的锋度就增加。镀银膜层的干涉图像最适宜的反射率一般为70~80%。

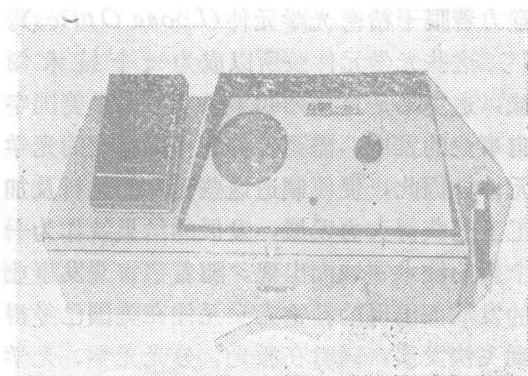


图3 美国楚哥公司生产的GH-1型干涉仪外观

最近，研制成功一种以干涉法测定表面形状的新的方便的装置。美国楚哥(Zygo)公司生产的GH-1型干涉仪就是其中的一种，它不属于非涅尔干涉仪，它是一种多用途的干涉仪，而且它既用来测定球面，亦用来测定曲率半径。它的另一个特点就是操作容易，为获得必要的适宜的干涉条纹，只要细心调整光学系统（部件），在屏幕上几秒钟以内就可以观察出结果。现行的干涉条纹测量装置都附带有摄影装置，以便进行记

录, 其外形如图 3 所示。

美国楚哥公司也是精密光学元件的制造厂商之一。

3.2 角度的加工与测量

关于精密光学元件的角度问题, 通常是由两个平面所决定的, 假如这两个平面的精度与位置可以任意控制的话, 又可以达到其测量精度范围, 那么不管怎样高的角精度都是能够测量的。在加工平面的时候, 使其平面作一倾斜, 控制被加工面是没有什么困难的。总之, 根据测量精度就决定了角度零件的精度范围。

三角棱镜、立方棱镜以及多面体等, 可以等分角度面, 采用一个回转台和两个自准直仪, 可以按下列方法进行分割测定。

如图 4 所示, 将一块多面体装置在与回

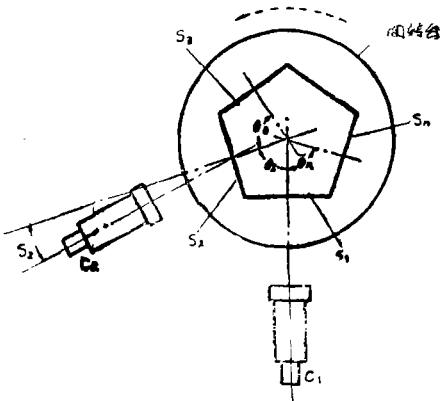


图 4

转台回转轴相平行的台面上, 其任意的两个面 (如图 4 中所示的 \$S_1\$ 与 \$S_2\$ 相邻的两个面), 对二个自准直仪 \$C_1\$ 与 \$C_2\$ 调准。最低限度 \$C_1\$ 与 \$S_1\$ 反射回来在视场中的像要完全一致是有必要的。自准直仪 \$C_2\$ 的方位大体上对准就行了, 此时自准直仪 \$C_2\$ 的基准线对 \$S_2\$ 的偏离 / \$\delta_2\$ 的读数取值。下面再把回转台按逆时针回转, 首先接着上面分割的角度回转, 而使 \$S_2\$ 的反射像对 \$C_1\$ 的基准线完全一致地微调回转台。这时, 读取了对 \$C_2\$ 轴的 \$S_2\$ 偏离值。再将它反复回转几次, 以下面的计算方法, 即可求得出正确分割的

角度值 \$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\$:

$$\theta_1 = \frac{360^\circ - \sum \delta_n}{n} + \delta_2$$

$$\theta_2 = \frac{360^\circ - \sum \delta_n}{n} + \delta_3$$

$$\theta_3 = \frac{360^\circ - \sum \delta_n}{n} + \delta_1$$

以这种方法来测定角的精度, 实质上是取决于自准直仪的瞄准精度和角读数的精度, 其误差由于采用平均值而得到提高, 但是, 如果考虑到测量人员的误差, 其极限值为 \$\pm 2''\$。在需要更高的角精度时, 采用绝对角度基准和高精度的光电自准直仪是有效的, 在这种情况下, 可以获得 \$\pm 0.2''\$ 的精度。对任意角的测定可采用量规堆积法和测角仪或者采用分光计的方式。

3.3 表面性质

关于被加工光学零件的表面性质 (微观意义的平滑度) 问题, 在一般光学零件中是没有什么问题的, 然而, 对精密光学元件, 根据它的用途, 特别是那些高精度的表面, 就要有一个很严格的要求。例如, 一块用于法布里·珀罗 (Fabry-Perot) 干涉仪中的基准样板, 它的表面形状对光洁度有很大的影响 (计算上的表面光洁度是由表面的反射率来决定的)。把强的激光光束照射在玻璃零件上时, 这时表面光洁度对破坏强度有着显著的影响。此外, 在精密光学元件中, 如果选用的不适当, 容易出现散乱。

一般的光学玻璃加工程序为: 先用金刚石进行成型磨削 (粗磨), 其次采用氧化铝等微粉进行精磨。最后用氧化铈进行抛光, 最终即可获得成品的光学零件。从以上几个方面来考虑, 光学零件最后加工的表面形状, 要受到各工序中所采用的研磨剂的粒度、种类等方面极大的影响, 这一点是很明显的, 但是除此之外, 在各道工序中所使用的加工设备、加工速度以及温度等条件对光学零件加工精度影响也是很大的。一般的光学零件的表面光洁度为 \$50A^\circ\$ 左右。但是, 我们如果

采用特殊的研磨设备，借助于研磨剂的浓度及温度等任意调节，特别是高精度研磨机的研制成功，使被加工元件的表面光洁度可达 $10A^{\circ}$ 以下。

在研磨过的光学零件的表面，一般情况下，由于大气或大气水分等而引起化学变化，使其表面变了质。其变化程度要由玻璃材料之种类、零件研磨后的处理以及周围的条件所决定。根据零件的用途选择上述条件是很有必要的。

3.4 材料的问题

对于精密光学元件的材料，有两点应特别注意。第一点，首先要考虑到光通过材料内部时，波面不应发生畸变，应具备很好的光学均匀性。光学材料在加工前应该采用干涉仪测定一下材料折射率的不均匀性，这个值不应该超过根据用途而计算出来的界限。如图5所示，把直径为100毫米的平面板的

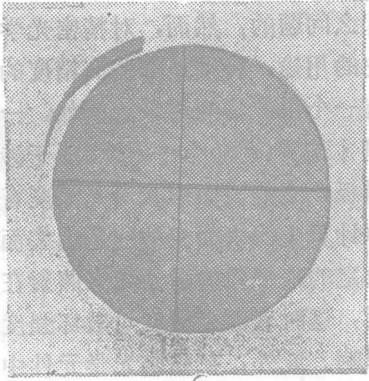


图5

两个面研磨得基本平行，用照像的方法拍摄其两个面间所产生的干涉条纹，它根本就不是精密光学元件，特别是均匀性是很坏的。例如，经远距多次反射的光而使用的直角棱镜时，波面的畸变由于发生波束的扩大，而使反射光的能量成为变小的原因，作为这种材料，要求很高的均匀性。

在精密光学元件中，必须注意材料的第二个问题，就是关于温度特性的问题。特别重要的是热膨胀系数的问题。例如，把一块

直径为300毫米的BK7型玻璃圆板，研磨成平面精度为 $1/30$ 个波长时，几乎是不可能达到的事。其理由是：即使在完全恒温的条件下进行研磨，在研磨平面上由于材料内部不均匀性而产生的摩擦热，温度分布不均，因此，这种材料决不能在变形中进行加工，加工后，当内部的温度梯度消失时，由于恢复原来的状态而产生了变形。这种温度分布不均匀性的影响，在零件大的场合下，例如，尽管以研磨剂液全部浸渍中研磨，完全消除这个毛病是不可能的。对于小型的零件也存在着热膨胀的问题，采用不出现加工精度变化的研磨方法或者由于预料到加工后温度分布均匀时的表面形状变化，对一些存在的畸变加工，经过时效后，最后即可获得高精度的平面零件。为了避免在加工或者在使用时温度变化对精度的影响，精密光学元件的材料要尽可能地选择热膨胀系数小的材料。为了达到这个目的，最好采用熔石英(*fused Silica*)。它是由石英熔融的材料或由成份高的二氧化硅合成的。然而，就其均匀性上来说，后者是比较容易实现的，同时它的紫外透过率也是很高的。在热膨胀系数方面，两者基本是一样的，大约为 5×10^{-7} 。比一般光学材料，如BK7的热膨胀系数(75×10^{-7})要小。优质的熔石英玻璃要比一般的光学玻璃高的多(为BK7的20倍)，由于这种材料对大气有很高的抗蚀性能，这样就比较容易地保持精度，它是一种值得推荐的材料。作为光学材料的熔石英玻璃国内外都在生产，然而，目前已经有一些光学玻璃制造厂商研制出一些膨胀系数很低的材料，而且都发表了产品的目录。这些，对实际中的应用起了很大的作用。

精密光学元件的材料，几乎都是含有融石英的玻璃材料，此外，合金钢、不锈钢、硅以及锆等制品也是属于这类的材料。

3.5 产品问题

从上面的介绍中可以看出，所谓精密光学元件的产品问题，它与一般的工业产品是

有点不一样的。对于精密光学元件，要想利用相适应的基准机床、依规定的程序一次进行检测，稳定地生产出无缺陷的产品是不可能的。必须要经反复地测定和修正。然而，这种测量方法，如果以一般的机械测量方法单纯的与基准量相比较就获得结果，那是不行的，多数情况下都是采用光学的方法进行的，这种方法有时候是非常复杂的。由此看来，对精密光学元件产品真正的大量生产是比较困难的。除此之外，在所使用的材料上，对最后的加工精度有很大影响，而对其他的产品就不必那么严格考虑了。

精密光学元件的造价较高的理由，正是有着这样的一个原因，在设计产品时，必须要根据其用途来选用相适宜的精度等级。如果过高地提出精度等级时，其造价就要提高，这样就很经济了，这些问题必须要注意的。

4. 具体的精密光学元件

4.1 平面镜

平面镜，在外观上看，在精密光学元件中它是最简单的一种。可是，平面标准仪器、平行平面、参考基准面以及分光棱镜等方面所应用的光学元件，多数都要求很高的平面精度。特别是对称形的平面。作成圆形的时候，高精度是比较容易获得的，如果采用低膨胀系数的材料，如上面所介绍的那样，直径用300毫米，精度可获得1/20个波长，当直径用150毫米时，精度可达到1/150个波长，直径用100毫米时，其精度基本上可以达到1/200个波长。但是，如果采用膨胀系数高的材料，那么它的精度就要降低了。

平板以水平位置应用时，要注意其挠度。例如，一个直径为150毫米、厚度为15毫米的圆板，圆周自由支承在一个水平状态时，这圆板的中央所产生的挠度是：

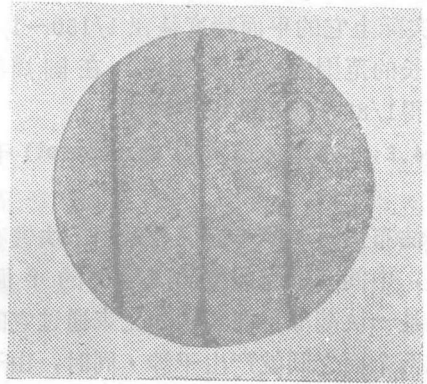
融石英玻璃为 0.028μ 。

BK 7 型玻璃为 0.035μ 。（近似于1/10波长）。

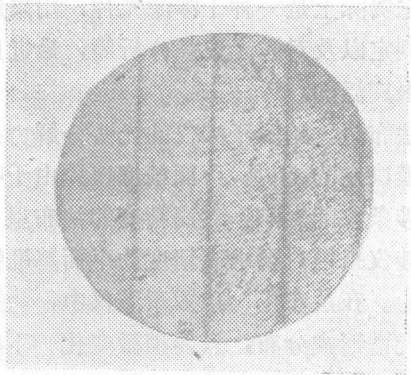
最大的挠度 w_{max} 与工作直径 d 和厚度 t 之间的关系为：

$$w_{max} \propto \frac{d^4}{t^2}$$

从这个关系式上可以看出，为了缩小挠度而加大厚度是必要的。



A-B



B-C

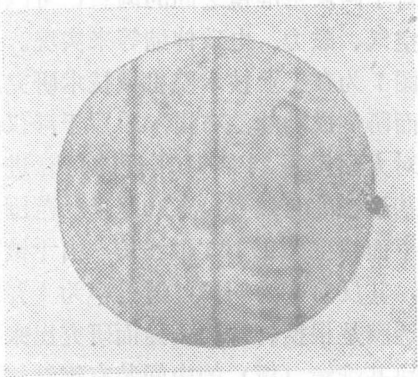


图 6

除此之外，如果把一块圆板垂直地立起来使用，其挠度值，圆板的断面可以依照变化的柱来计算；在一般情况下，其挠度可以忽略不计。

图 6 为被加工零件直径为 60 毫米，厚度为 15 毫米的 3 个平面标准仪而组成的非涅尔干涉条纹，但是，这里的基准器 A 和 B 的平面精度误差可以认为不存在（根据目前所限定的测量方法，干涉条纹的畸变可以忽略，实际上它的平面精度是在 $1/150 \sim 1/200$ 个波长的范围内）。对 C 来说，在圆周部位可获得 $1/82$ 个波长的塌边精度。

4.2 法布里·珀罗 (Fabry-perot) 干涉仪

法布里·珀罗干涉仪是采用二块镀有半透膜，中间有适当间隙的高精度的平面镜（它是一块基准平面），假如光束通过它时，光在两个面之间就产生干涉。同时，由于它们之间的间隙大小而决定了透过的波长。这里，它实际上是一种干涉滤光片，用来进行光谱测定以及对激光波长分析等，最近应用的是很广泛的。

法布里·珀罗干涉仪的光谱分解力是由半透膜决定的，但是，平面精度误差由于噪音对干涉条纹的影响，对高精度的法布里·珀罗干涉仪来说，要求高精度的平面基准镜是必要的。在法布里·珀罗干涉仪中，为了使光以光谱形式分布，只要稍微变化一下两块基准镜，即可观察出透过波长强度变化。但是，对于两块基准镜之间的调整，可以利用压缩空气、磁力、电致伸缩等来实现。

图 7 为在工业技术院机械技术研究所指导下而研制成功的法布里·珀罗干涉仪。用它可对太阳光的 2800Å 附近的光谱进行分析。基准镜的有效直径在 30 毫米的范围内，它的平面精度为 $1/100$ 个波长，由于镀有半透膜，其反射率为 94%，透过率为 4%。这种半透膜是根据特殊的用途而研究出来的。在两块基准镜（板）的中间装有铌钴氧化铅电致伸缩元件，用它可在波长为 0.25μ 的范

围内进行光谱扫描。图 8 为法布里·珀罗干涉仪的外观图。

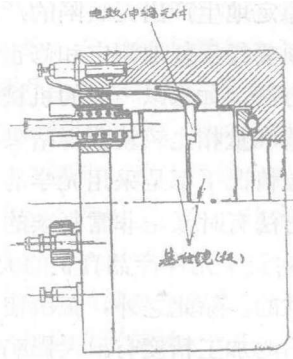


图 7

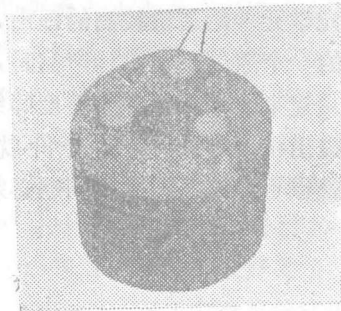


图 8 法布里·珀罗干涉仪外观图

4.3 角立方棱镜

如图 9 所示，角立方棱镜是由三个面相互相交而构成的一种反射镜，众所周知，入射光同入射方向的关系由于光的反转而构成 180° ，也就是说与入射光完全平行的方式而反射。因此，当光需从远距离往反传播的时候，或从几个地方同时照准一个点时，作为标指点，或者在光学测量仪器等设备中入射、反射光需要平行的情况下被使用。

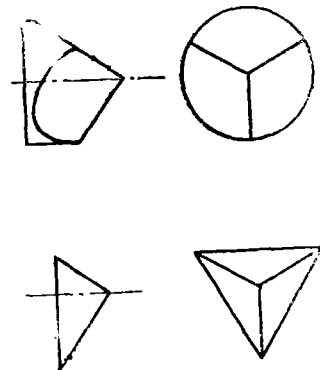


图 9 入射反射面为正方形的场合

角立方棱镜作为典型的应用例子是于1969年美国“阿波罗”11号宇宙飞船第一次降落到月球表面时，作为一个测试仪器而采用了这种角立方棱镜作为反射装置。这是一个很有科学价值的问题。它是由于要测定地球与月球的距离而采用的，从地球上向月球上发射一束激光光束，再借助于月球上放置的反射镜反射到地球上，根据激光脉冲返回到地球的时间，就可以求出地球与月球之间的距离。以前，向月球面发射过激光，根据反射的光束进行距离的测定，由于接受的是从月球表面上几公里扩展反射的光，因此，受到了月球表面曲率的影响，这样几百米的测量误差是不可避免的。然而，如果采用角立方棱镜作为反射装置，那么测量精度就可以提高到±6吋以上。此外，这种装置也可以对地球本身的地形进行测量。举一个例子：假定要测定日本各岛及美国西海岸每年的变迁量为4吋，那么，只要把日本和美国设置的二个测量点同月球上的测量点连成一个三角形，依此进行测量，认为是可以实现的。像这样的测量装置，到目前为止，在月球上有三台是美国的，一台是由法国制造的（由苏联“月球—17号”运载的），共计4台。

关于角立方棱镜的性质，应根据对入射光及反射光的平行度，即平行偏角以及入射光波面被反射而产生的弯曲量来评定。平行偏角是采用自准直仪来测定的。而波面的弯曲可以采用台曼干涉仪来测定。图10为采用台曼干涉仪而获得的干涉条纹，这时候波面的弯曲要在1/20个波长范围内。

在角立方棱镜中，光透过材料中的光路比较长，还有，因为材料折射率的均匀性对入射光的平行偏角以及波面弯曲的直接影响是很大的，所以采用高均匀性的材料是非常必要的。就材料上来讲，多数是采用融石英或者BK7，但是，在温度变化的环境中，采用热膨胀系数低的融石英玻璃是适宜的。

关于角立方棱镜的加工工艺问题，首先

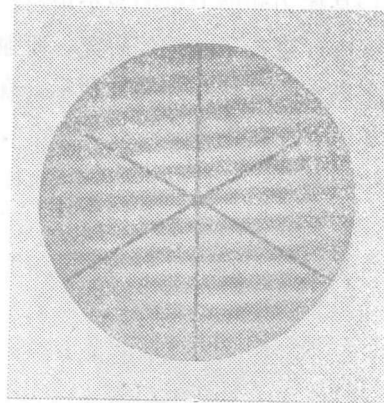


图10

将玻璃磨制成立方体，各个面相互角应准确地研磨成 90° 。对于角立方棱镜的精度问题，基本上取决于这道工序。所以当角立方棱镜在加工的时候，主要是测定立方体的 90° 角。然而，精度上的问题对生产效率是一个重要因素，因此，完全可以采用普通的角度测量方法或用干涉仪的方法， $0.1''$ 的精度是容易获得的。

根据最终研磨出的立方体，以它的对角线作轴切成锥体，按其轴向切开的直角断面进行研磨，即可获得如图9所示的角立方棱镜。要加工平行偏角为 $1''$ ，反射波的弯曲为 $1/12$ 个波长的精度是毫无问题的。

图11为测量大气透过率而采用的角立方棱镜装置，把激光光源装置于相应的两点，从激光光源发出信号，借助于这种装置而反射回来的光能量的变化来对大气的状态进行研究。

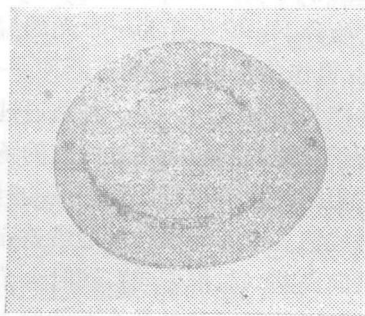


图11

图12是作为测地卫星的一个项目，在日本海军保安厅进行了基础的研究，研制成功卫星反射装置的部件，如图13所示，在一个铅壳里装有6个小的角立方棱镜。

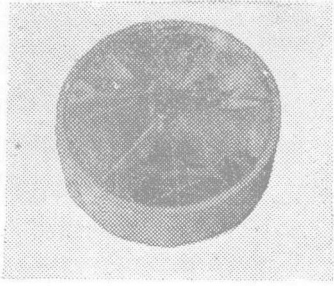


图12

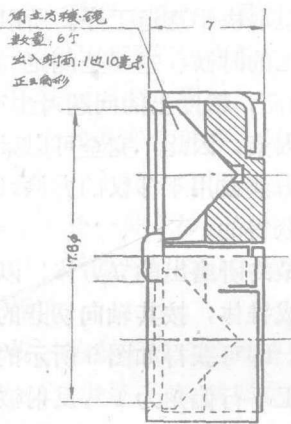


图13

4.4 回转棱镜

当前，在电传真以及电子计算机等设备中，很多都开始采用回转棱镜作为图像输入与输出光束的扫描装置，此外，电影摄影以及间歇式摄影的光学系统中也被采用了。无论在那个场合下，它仅作为一个光的偏向器而采用的，但作为使用的方法有两种：一种是以多面体作为反射偏向，另一种是通过棱镜内部借助于棱镜的回转而透过偏向的场合。

在利用回转棱镜进行图像扫描的时候，由于回转棱镜各个面对回转轴的塔差而产生了像面纵向误差（扫描方向），同时各个面的角分割误差以及对回转轴各个面的偏心而产生了横向场散。棱镜的平面精度对其分解力

是有影响的。

从加工方面来讲，一般的多面棱镜的面数，当为4的倍数时就容易加工，除此之外，就要给加工工艺上带来了复杂化（如，时间长、成本高等）。

图14为用于电传真的激光回转棱镜，棱镜的面数为16，各面的分割精度：塔边在 $2''$ 之内，各个面对中心轴的偏心量为0.03毫米以下，各面的加工精度在 $1/10$ 个波长以内。使用的材料为石英玻璃，精加工后表面上镀有一层铝反射膜。

回转棱镜以高速回转时，要特别注意的是：由于回转时离心力的作用而使材料产生畸变，并且在其中中心部位存在着应力。对于前者来说，回转棱镜的极限圆周速度 V 是由下列公式决定的（可参考文献4）：

$$V = (2 E \varepsilon / \rho)^{1/2}$$

式中 E 为选用材料的弹性系数， ε 为畸变极限值， ρ 为材料的密度。

对于后者，依着一般的弹性力学计算不出它的应力，可以进行强度检验，但是，在中间带有孔的情况下，这部分的应力是很大的，特别是对玻璃等脆性材料，根据加工状态应注意到表面形状引起强度的降低。

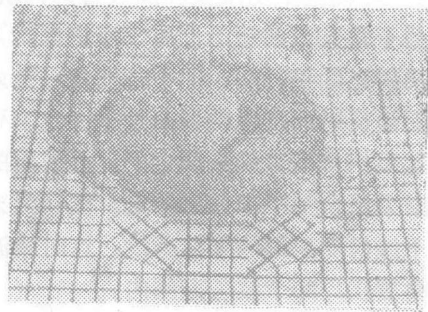


图14

对回转棱镜所采用的材料来说，从容易获得到比较高的精度上来看，采用玻璃或者石英的场合是比较多的，使用回转数高的情况下，除上述材料之外，还可以选用铝、不锈钢，或者铍等金属材料。由于铍的强度与密度比值特别大，它是一种非常有用的材

料, 然而, 它的造价却是很高的, 同时在加工中亦存在着一些问题。

把回转棱镜装置于驱动系统中时, 对于驱动轴的回转精度 (偏心等) 以及回转棱镜固定的畸变都要特殊注意。

对于高精度的回转棱镜, 因为回转速度也要求高的精度, 最理想的是由电机直接驱动棱镜、但是, 采用一般的电机轴驱动时, 即使是采用超精密的轴承, 要想得到 $3''$ 以内的倾斜度是很困难的。鉴于这种情况下, 驱动系统中的轴承如果采用空气轴承还是能够保障回转精度的。棱镜轴的直径以及棱镜的法兰面应按着驱动系统本身的轴承一起进行加工。由于棱镜的变形比较小, 所以法兰盘的直径应尽可能做小, 而且, 由于所使用的法兰面不是整个的面, 所以采用狭小的环状面还是有必要的。

5. 结 束 语

精密光学部件或者说精密光学元件, 目前正在形成一个新的技术领域。对于这项技术的出现, 前面仅以 2~3 个具体的实例予以介绍, 并对其内容和技术特性等方面的问题作了简要说明。今后, 对于它的产品, 随着科学技术与光电技术的飞跃发展、就越发需要增加其品种了。目前日本在这个新的技术领域中的经验还不足, 还需要进一步继续努力, 以满足于新的要求。

此外, 从另一个方面来说, 这种技术不仅是对光学仪器的发展有利, 而它又给更广泛的各种各样的精密技术奠定了极为有利的条件。

译自日本《画像技术》 Vol.5, 1975, p32—40。

(王历译, 韩昌元, 缪祥松校)

(上接第 20 页)

一次完成, 即镀完光学膜后接着镀三防膜一锅出。前阶段我们进行了初步实验认为是可行的; 这项工作, 有待今后进一步通过实验来实现。

六、小 结

在现在的工艺条件下, 乙基含氢硅油或聚全氟乙丙烯镀在单层膜 (MgF_2) 双层膜 (SiO_2 、 MgF_2 、 TiO_2 、 SiO_3) 上, 不改变其光学性质, 经过环境实验后其光性仍然不变, 光学玻璃基底也没有被腐蚀。不镀乙基含氢硅油或聚全氟乙丙烯三防膜的光学膜层, 经过环境实验后基本上玻璃基底被腐蚀或者光学膜层被腐蚀, 甚至脱落。特别是软质玻璃为基底的更为明显。

在目前条件下, 如从乙基含氢硅油和聚

全氟乙丙烯对比来看, 凡底膜为 SiO_2 膜层者镀乙基含氢硅油较好, 凡底膜为 MgF_2 膜的, 镀聚全氟乙丙烯较好。但底膜为 SiO_2 膜的镀聚全氟乙丙烯膜的潜力相当大, 待今后进一步探讨。

运用真空法原理镀有机高分子膜是行之有效, 虽然我们所得结果是初步的, 但为光学三防膜在制备原理上提供了新的途径; 在光学薄膜新材料的研制增加了新的内容。

关于膜层性质、结构、反应机理等问题待今后深入开展研究工作时逐步加以探讨。

我们镀三防膜的镀膜机是专用, 因为目前对清洗的问题尚未解决但是我们所采用的三防膜材料对机械泵油, 扩散泵油无影响, 我们的镀膜机从 1972 年开始镀三防膜, 至今没有清洗过一次, 其真空度未见有变化, 仍然很好用。(在 1×10^{-5} 以上)。