

光学玻璃的折射率测定

摘 要

本文介绍测定光学玻璃的折射率用的两种仪器的设计。制造光学玻璃的生产单位必需有两种测定折射率的方法。这些方法是：(1)给出折射率的精度为 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 的快速和精确的方法，和(2)能得到 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 的较精确的系统。介绍的第一种方法是光电V块系统，而第二种是利用电子条纹计数的双光束干涉系统。

绪 言

过去十年光学设计者取得重要的进展是没有疑问的。在规格和透镜结构的试验方面(在英联邦中由科学仪器研究协会(S.I.R.A)进行,继续取得进展。大约在两年前我们就明确,作为玻璃的生产者,我们应当进行实验室工作,以便改进光学玻璃的特性测定。折射率的测定必然是必须考虑的头一个问题。情况的研究表明,有两种测定折射率的主要方法,即精密的测角计和V块的折射计(Hilger-Chance 折射计)。确定用测角计测定的基本原理并且在许多年前 Guild (1929)和 Tilton (1935)就有记录。除例如国家物理实验室的记录测角计(Flude, Habell 和 Jackson 1961)以外取得的进展非常微小。在1917年F.E.Lamp'ough(参阅1945 Holmes)想出了V块折射计,在1937年由Chance Brothers Limited展出并且大约在1947年具有当前方式投入生产(The Hilgerchance 折射计)。推荐各种修改(即1941年Hughes, 1956年Forrest 和 Straat),但是在多面性和精度方面没有显著的改进。

应认为上述的两种方法是常用于测定的仅有主要的方法。拒绝用临界角的方法,因为它们取决于玻璃表面,并且特别当在整个

波长宽范围内作折射率的测定的时候,认为油浸的方法是慢的。

必须强调,测角计和V块折射计不应认为替换物,因为可达到的精度是不同的,而宁可说是满足不同要求的仪器。这些不同要求在光学玻璃工业中是存在的并且规定如下:

(1)得到折射率为 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 和在色散方面要较好的可靠测定的一种快速、精确的方法;和(2)得到折射率和色散为第六位数测定的高精度方法。

当小心用 Hilger-Chance 折射计的时候,能给出精度达 $\pm 2 \times 10^{-5}$ 的结果。但是,达到这种精度意味着引进一些程序,对快速的日常规定几乎是不适合的。

用测角计可以达到第6位精度,但是要求达到的程序是漫长并且麻烦。理想的是需要一种仪器,它得到同样精度(或者比测角计少许好点),而且具有较短、不复杂的测定程序。

应当看到测定折射率达 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 是不容易的。测到这级就能满足关于V-值和色散精度的大多数要求。达到第六位测定范围意味着要考虑与基本要求之一(即容易使用的矛盾。从我们自己的研究与国家物理实验室讨论两方面出发,所得结论都是,非常难于研制一种满足上述标准的各种用途的仪器。

在这里应指出,对最高精度的测定,为

什么绝对折射率的“目标”被限到 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 。觉察到，想把绝对折射率测到第七位精度是不现实的。除去得到的色散几乎必定只应用于用一块要测定的玻璃以外，均匀性（或是化学原因或是由于退火效应）和对样品的要求公差使所作测定，只在学术上而不是实用上有意义。目的不在于示出在一块选择的玻璃上能测定高精确的折射率，而宁可说是显示出，用许多生产的光学玻璃的样品可能到什么样的灵敏精度。

一种光电V-块的折射计

为了满足诸言中所讨论的要求，设计并正在制造两种仪器。头一种仪器适用于快速测定，精度达 $\pm 1 \times 10^{-5}$ ，它就是光电V块折射计。在判断应用什么样的方法时非常强调在：(1)样品制备要容易和(2)对操作者要求的熟练和努力的程度。在研究各种可能测定方法和所需要的样品之后判断，具有细磨表面的直角样品（如用在Higer-Chance折射计）是最容易制备的样品。这方法的用处大部分决定于按要求的精度去作和试验这种样品的能力。V-块折射计的误差分析表示，只从这方面测定 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 的误差来说，关系式

$$\Delta n \Delta A = 0.15$$

必须满足，其中 Δn 是样品和匹配液体的折射率之差，而 ΔA 是用弧秒表示的样品与直角的偏差。只要可能，决定应用这种原理，即只用一种液体于所有有关的光谱线。对样品液体的折射率差为0.02来说，要求样品角为 $90^\circ \pm 8''$ 。对试验样品作这种精度，文献中介绍了一种方法(Harper 1968)。本方法是一种光学方法。应用接近入射于细磨玻璃得到镜反射的这种情况。

Hilger-Chance 折射计的主要误差源之一是由于(a)目镜处狭缝图象的调整，(b)由于视觉过程对刻度偏心率效应的平均和(c)溶剂的实际读出的综合引起的。通过

对几个有经验的操作者作大量读数的统计分析表明，拿任何一种折射率的值的五次读数来说，一个“平均”的操作者的误差将是介于 $\pm 3 \times 10^{-6}$ 和 $\pm 4 \times 10^{-6}$ 之间。显然需要作重要的改进。通过作光-电的调整和应用一个刻度达0.2弧秒的度盘（在Hilger-Chance折射计的底盘的最小分度为3弧秒，这个问题就容易些了。作光电调整的最容易方法是使V-块在自动准直的光学系统中和应用振荡狭缝和光探测器。光学系统在图1示出。

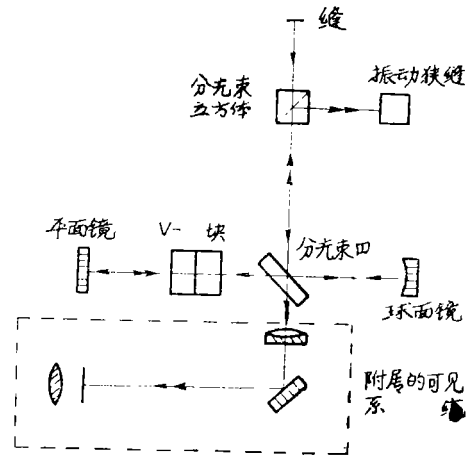


图1 V块折射计的光学系统

自准直光学系统还有另外的优点：(1)能快速地检查V-块的入口面对准光束；和(2)消除光束偏向点的“运动”的问题。在图2上示出这第二点。当偏向角 θ 从O开始增大的时候，偏向点从A移动到B。望远镜的一个固定旋转点意味着，光束只以一个 θ 值对称照明物镜。用平面镜（具有其表面的适宜公差的）代替图2上的透镜表明，这种问题被消除。

在这种折射计主要的是，一个V块应按所要求精度测量折射率至少为1.50—1.75的范围。如果不是这种情况，需要为折射率各种范围变换V-块便降低仪器的用处。这种特征的主要限制就是狭缝曲率。但是，应当用一块折射率为1.620的V块和缝隙长度为1.5毫米的时候，引起的误差在折射率为

1.50—1.80范围内低于 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 。

在系统光学设计中必须解决的问题是关于各种光学元件的公差及其调准。所采用的方法是计算振荡狭缝的响应，首先对理想的受衍射限制的狭缝图象，而然后对带有少量象差时的图象，图象非对称的象差出现最严重的问题。V块的引出端面要有特别小的平梯度公差（小于每毫米 $1/150\lambda$ ）和平面镜（小于每毫米 $1/500\lambda$ ）。

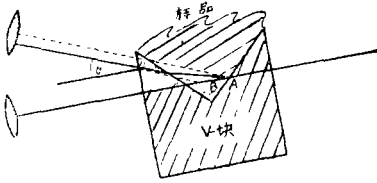


图2 通过V-块的光线途径

振荡狭缝探测器的响应很严厉地取决于物方狭缝宽度、振荡狭缝宽度和振幅之间关系。为了保证在365—1014微米波长范围内适当响应，或者狭缝宽度之一，或者振幅必须改变。判断出，改变振幅是比较实际。应用一个Hewlettchance硅PIN光二极管作探测器便得到良好的灵敏度。电子设备基本上是由在基本上42是赫兹工作与小于5赫兹带宽工作的同步探测系统组成的。

在系统中的最主要光学元件明显地是V-块。由于下列原因可能引起严重的误差：

- (a) 缺乏对V-块折射率的知识
- (b) V-块的不完善结构；和
- (c) 光学系统中调准不完善。

制作V块的玻璃折射率已知为 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 。这些数值可以检查并且通过在准确已

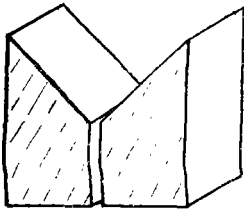


图3 V块结构

知的折射率的样品上多次测定而改进。最初样品将是棱镜。其折射率是在国家物理实验室的测角计系统上作测定的。以后，将用在干涉折射计上测定过的样品。

新的结构方法被用于V-块。目前应用的方法使用光学接触。V-块的热处理需要作永久的接触。因为用于V-块的玻璃必须是最高质量的（即按均匀性和双折射的要求），认识到，必须取消这种热处理。图3上示出的V-块是通过在机械上可装配调准的方式来作成的。它是由一个精确做出 $45^\circ-45^\circ-90^\circ$ 的棱镜构成的。棱镜的 90° 角已经去掉，用作“零位”的样品。这是确定和检查仪器零位的最好方法，因为V-块的组件保留着原样。

把V-块材料选具有折射率的温度系数（对e-线而言）大约每 $^\circ\text{C}$ 为 5×10^{-6} 。既然大多数有关的玻璃的折射率温度系数在约为每 $^\circ\text{C}$ 1×10^{-5} 范围内，这意味着， $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 的温度控制将给出这些玻璃的误差为 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 。实际上，仪器将控制在温度达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 之内。

这种折射计误差的主要来源是由于缺乏V-块的折射率精确数据，装配和角偏向的读数。发觉到，用适合标准的样品，第一种误差可以减少到 $\pm 3 \times 10^{-6}$ 以上，而第二种误差将少于 $\pm 2 \times 10^{-6}$ 。所有其它的误差降到 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 或强些，因此可以看到，用这种折射计得到的结果将准确到 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 或强些。

干涉折射计

用于测定折射率和色散达第6小数位的第二种仪器是干涉折射计。在这种情况下的主要判据是关系到准确度和精密性，而不是测定的时间标度。经断定，以给定绝对测定的系统为目标是主要的，即这种测定不须要相对于任何其它的折射计进行校准。同样决定设法脱离依靠成象的光学系统的任何设计。这个必然导致对干涉仪系统的研究，并产生

最终的设计，在这种设计方面主要的光学制造本质上是生产许多的光学平面。

在气体研究方面干涉折射计是众所周知的，但是对测定玻璃的绝对折射率不太引人注意。然而，用双光束干涉仪作测定，在这种干涉仪上一块已知厚度的板在一个臂上转动着，通过测量角和产生的条纹偏移来测定 (Hakoila 1952; Shumate 1966)。角测量的公差是非常严格的，0.1 弧秒误差产生折射率为 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 误差。

在研制中的仪器采用借助于移动通过双光束干涉仪中的一束的棱镜样品使光程作稳定变化。图 4 示出干涉仪的光学系统。样品棱镜在两个方便的末端点之间移动，基面保持与其原来的方向平行。它移动沿着第二个固定棱镜的斜边面移动，这个棱镜有提供光程连续性的匹配液体。用这种系统，折射率测定的精密度和准确度依靠线性测量技术，该原理发展到光学计量的最高标准。

用两台干涉仪取得关于光程变化 $(n - 1)t$ 和玻璃的厚度化 t 的信息。上方干涉仪测量光程变化，光束两次通过样品。通过把全反射膜涂在棱镜基面的下半部并用这个作为第二台下方干涉仪的活动镜得到厚度变化的测定。

主要的实验问题是提供精确的线性运动和安置棱镜的方法 (使其斜边面是沿着运动的方向放置)。应用线性滑板把这两个问题都攻下来 (Boulton和Cooper 1969)。这决定

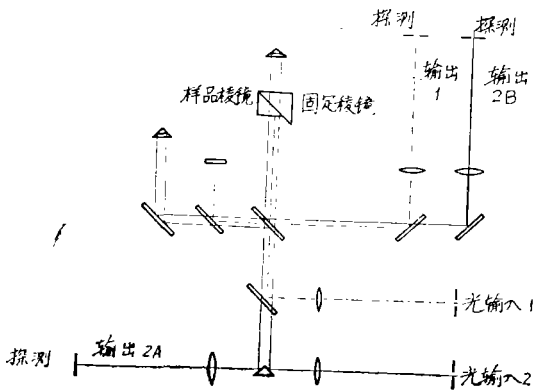


图 4 干涉折射计的光学系统

于把光学玻璃的平面用作活动托架的制导元件。实验系统表明，两个光学平面相对于另一个平面 (在它们之间有很薄的空气膜) 移动是可能的。这种膜给出润滑效应也示出彩色的干涉条纹系统，这可以用来得到滑板的校正调整并且能知道运动是否良好。

仪器方案提供三个按图 5 排列的光学平面，平面 A 放在水平板上并支持着一个托架 B，这个托架靠在三个小的聚四氟乙烯垫圈上。第二个平面 C 固定到托架并且随着彩色纹系的形成使紧密地接触第三个制导表面 D。用疏水硅聚合物 (Midland Silicon, MS 1107 流体) 涂在表面 C 和 D，这种聚合物阻止光学接触的可能性。托架每端的拖着点通过环来控制运动，托架被连接到螺杆的活动螺帽上。当在托架向前运动期间内与当在运动期间内在任何点颠倒行程方向均匀的彩色边纹系都保持不变的时候，就是滑板校正调整。完成了。

上述装置的形式提出解决精确地相对于滑板安置样品的问题。如果平面 C 是准确的磨光平面并且平行，那么它便给出一个参考面，这个面平行于运动方向并且样品能对它搭配。计划研究接触这个表面光学和扭出的两种形式。

建议注视两种测定引入光束中的玻璃厚度测定方法。首先，通过把一只反射标准量具插在比较臂中作为固定的厚度，调到白光条纹显示出终点。通过把较低的干涉仪用作标准尺部件的测量系统，标准量具可以适当地校准，根据在几种波长的最后小数测定得到校准在测量期间的观察空气折射率的任何可能的变化时也可应用这样的装置。另一种方法是应用随着在单色光中作连续条纹计数得出变化值 t 。这后者的方法从自动化观点来看似乎有意义，尽管第一种也多少可以自动化。

所应用的条纹的电子计数的技术是标准的。简单地说，要求两个具有 90° 相移差关系的输出信号，以便发觉方向以及条纹场的

位移。这些可通过把偏振的入射光束对着 $\frac{1}{4}$ 波板的轴作 45° 来得到，这种 $\frac{1}{4}$ 波板在干涉仪的一个臂上。输出信号就是每个各经过一个分析器的信号，这种分析器是与滞后板的某个轴排列或一线的。然后用低噪声光电倍增管探测信号，由于要求在405—644微米区内工作，所以应用S20阴极。

有关这种方法的理论上考虑基本上类似于干涉度量中现有的仪器，完整的分析表明：

(a)通过两台干涉仪的入口孔径的自准直可以使倾斜度的误差成为很小。

(b)由于不理想准直的校准可以使其很小并且不致为害。

(c)来自198Hg和114Cd灯的适当光谱线为长度测量和为光学设计用途的可见光谱的有效区产生足够精度的光波标度。

(d)由于在色散介质中长度测量的标准完全可忽略。

影响这个系统的总准确度和精密度的基本参数是大气条件、样品、其预先加工和在仪器上的安置与滑板运动。

企图用在各个干涉仪的各个臂中的玻璃和空气行程加以平衡，把仪器的温度控制到 $0.02-0.01^\circ\text{C}$ 。也将必须监控大气压接近于水银柱的几分之一毫米并且要注意 CO_2 和水蒸汽的含量。

样品预先加工的公差降低到满足于两个磨光面（具有大约在它们之间 45° 角）的要求。实际上，这个角的误差和尖塔差是通过在初调时干涉仪的调整消除的。表面的平滑性必须是在基面上特别好、典型的在 $\frac{1}{50}\lambda$ 之内。斜边面不那么重要，因为在与液体匹配的接近程度可以比例地使不规则性降低。 $\frac{1}{20}\lambda$ 公差给出一个好的定位面。当然，玻璃必须有均匀性和双折射的最高标准，但是表面的折射率变化的影响减少，因为在两个终点上这些明显相等。

如果需要、在每次测定期间内可以监控运动的均匀性、但是从初始结果得出的结论

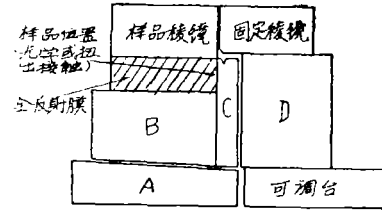


图5 仪器的滑板（沿着运动方向看）

是、在所要求的极限内滑板是符合要求的。

总结和结论

上面提到的两种仪器的设计目前正为 Pilkington 研究和研制实验室的应用而建造。在设计合适的测定系统的时候必须小心检查应用的环境和条件。既然折射率的测定是日常的工作程序，便断定，每个系统应能够用电子纪录或者调整，而不是目视方法，以便减少观察者疲劳的影响。现在的测定方法主要决定于目视装置（例如用 N.P.L. 纪录折射计）从目视测定计取得的读数来校准。再则，企图要求控制每台仪器的温度，而不是只依靠对安置它们的房间的控制。这就减少由于操作者的接近而使温度剧变的影响。最后，企图希望把仪器放在温度变化控制到小于 1°C 的房间里。

本文的目的有两个，即指出，按测定原理来满足什么样的高精度折射率的测定要求，其次，说明，制造公司需要具备两种不同而互相补充特性的仪器。显然，光学玻璃生产单位必须发表折射率数据结果，这个数据应满足光学设计者的大多数的直接要求。在研制新玻璃时有关于小实验熔化方面的精确测定问题。第一种仪器理想地适合于提供这两种用处。但是，也有时要求第六小数位测定。例如，(1)当需要特质成象系统用的玻璃的时候，和(2)在研究精细退火时间表对新的和现有的型号玻璃的折射率和色散影响的时候。在这里感兴趣的主要光谱区是可见的(400微米到700微米)则必须用干涉仪来

进行这些测定。在近红外，光学材料的公差级是下降的并且认为，从V-块仪器的精确第五位的测定足够的。

对这些等级的折射率测定决定于两个因素。首先，准备能够操作和控制到所要求性能限度内的仪器。设计原理极力试制出实现精度的系统。其次，同样重要是考虑要测量的材料。显然希望光学均匀性的最高标准，但是制备一种最小公差条件的样品也有优点。因此，在第一种情况指定角的要求，而清除表面的磨光。角可被检查到公差极限内。用第二种方法时要求非常好的表面磨光

而不规定角或尖塔公差。

当然上述仪器给出的信息是大量光学设计的出发点。对付诸制造的系统来说，要求给设计者关于实际应用材料尽可能精确或完整的数据。不仅要考虑绝对折射率值，而且也要考虑任何不均匀性的大小和特性。在这里所论述的我们的计划部分仅涉及第一点。第二个因素（即均匀性）必须在不久的将来得到周到的考虑。

译自 “Optical Instruments and
Techniques” p.177, 1969.