

红外折射率精密测试方法的研究

张兆兰 段文琴 王佳路

摘要: 本文阐述了应用最小偏向角法及自准直法测定红外波段折射率的基本原理。并较详细地讨论了最小偏向角的定位问题,探索了用逐渐逼近的光电接收方法测定最小偏向角的规律。对两种方法做了比较。

实验装置由GSJ—A型数字测角仪加红外反射系统构成。叙述了消除杂光方面所做的工作,保证了测试精度的提高。

文中列举了对0.935微米、1.014微米、1.129微米、1.3622微米、1.5295微米、1.7012微米波长测得的晶体材料(CaF₂)、红外光学玻璃(N—344)、普通光学玻璃(Lak₂)及铝酸盐红外材料的折射率典型数据,并对测试结果进行了分析和讨论。本方法获得了 $\pm 2 \times 10^{-5}$ 的测试精度,与国外相比已达到了同量级的精度。

前 言

随着光学仪器的发展,特别是近年来空间光学的发展,要求有较高精度的红外波段折射率的数据。因此探讨红外折射率的精密测试方法成为重要的课题。

这一方面的工作国外开展较早。近年来对红外折射率的测试工作已有较多的报导,有些已成为定型的测试仪器。比如利用莫尔条纹技术测量连续角度的方法测量宽波段区域折射率的记录式折射计^[1],测量范围为2100埃—5微米,精度为 $\pm 3 \times 10^{-5}$ 。还有用Littrow棱镜测量方法的介绍^[2],其特点是固定样品而旋转接收器,分别测得光的准直位置及各谱线的最小偏向位置,计算其最小偏向角,求得折射率值,精度达 $\pm 1 \times 10^{-4}$,并研究了红外折射率的温度系数。日本采取了测定最小偏向角来测定折射率值,并报导了成熟的方法,达到了较高的精度^[3]。

目前我国对于紫外及红外波段折射率的测量,仍然是一个薄弱环节。虽然在过去已搞过一套测试装置,但是精度只达 $\pm 1 \times 10^{-4}$ ^[4],距光学设计要求差距较大。

本工作目的,为探讨红外折射率的精密测试方法。下边具体介绍最小偏向角方法和自准直方法在红外折射率测试中的应用。

一、基本 原 理

对于自准直方法。如图1所示,测试样品为直角棱镜,AC表面镀有金属反射膜。当一束准直光以最小偏向角*i*入射到AB面时,其折射光束垂直投射到AC反射面上,则光束沿原光路返回。

按照斯涅尔定律,

$$n = \frac{\sin i}{\sin i'}$$

因为 $i' = \theta$

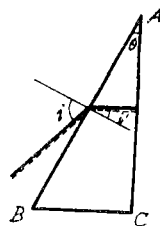


图1 自准直法原理图

所以 $n = \frac{\sin i}{\sin \theta}$ (1)

式中, i 为入射角, i' 为折射角, θ 为顶角。

对于最小偏向角法: 如图 2 所示。测试样品为三棱镜。

当一束平行光入射到棱镜的一个表面 AB , 而由 AC 表面出射时, 其出射光与入射光的夹角 θ 称为偏向角。 θ 随入射角 i 而变化, 当 i 为某一数值时, θ 为最小, 此时的 θ 称为最小偏向角 $\theta_{\text{最小}}$ 。此时棱镜的折射率由下式计算:

$$n = \frac{\sin\left(\frac{A + \theta_{\text{最小}}}{2}\right)}{\sin\frac{A}{2}} \text{ (2)}$$

式中 A 为棱镜顶角, 对于一个样品为定值, 所以当测得 $\theta_{\text{最小}}$ 时, 就能求得 n 值。

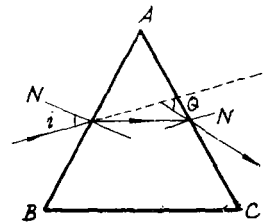


图 2 最小偏向角法原理图

二、实验装置

两种方法的实验装置, 除接收系统不同外, 基本相同。

用 $GSJ-A$ 型精密测角仪, 配一套自准直反射系统。 $GSJ-A$ 型测角仪系采用莫尔条纹、数字自动显示等新技术制成。其精度为 0.5 秒, 为红外折射率的精密测试提供了有利条件。光源使用砷化镓发光器和 HV 型高压水银灯, 接收器使用半导体真空热电偶。

对于自准直方法, 其装置如图 3 所示。

由光源 S 发出的光, 经凹面反射镜 M_1 聚焦在处于自准镜 M_2 焦点上的狭缝 S_1 上, 由 M_2 产生的平行光束落在置于测角仪载物台 G 上的待测样品 P 上, 折回来的光由平面反射镜 M_3 反射至狭缝 S_2 , 再经凹面反射镜 M_4 , 聚焦在接收器 D 上。光调制器 C 将光讯号斩波成 $10c/s$ 的脉冲讯号, 经前置放大器 B , 由主放大器 A 指示其测试讯号。所得测试角度由角度显示器 E 给出。

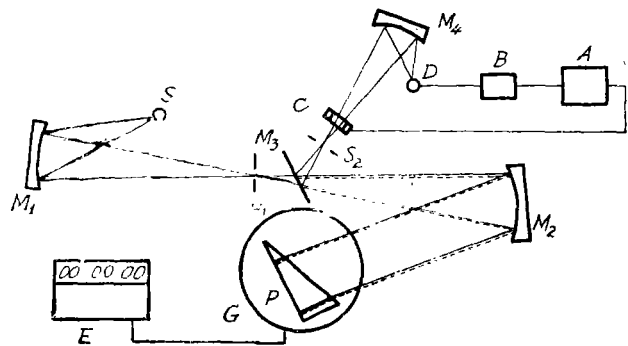


图 3 自准直法测试装置

对于最小偏向角方法, 其装置如图 4 所示。

前一部分与图 3 相同。平行光束入射到样品 P 上, 被分光后由固定在度盘外罩上的聚光镜 L 会聚在红外接收器 D 的接收表面上。讯号的接收、

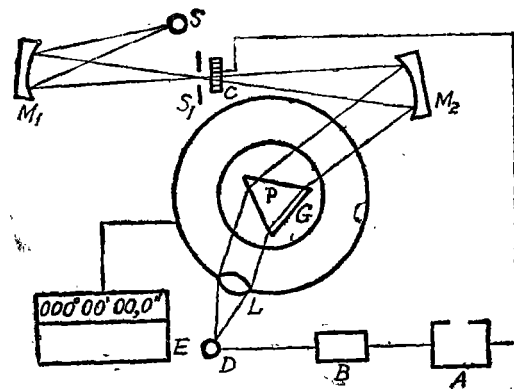


图 4 最小偏向角法测试装置

放大、显示同图3。

三、测试方法

在使用直角棱镜样品，采用自准直方法测量时，测试方法是简单的，只要测得工作面的法线位置及各谱线的自准位置，即可求得入射角 i 值。再测得顶角 θ ，则按公式 (1)，即可求得各谱线的折射率值。

在使用 60° 三棱镜，采用最小偏向角方法测量时，则比较复杂。本部分着重介绍最小偏向位置的测定。

最小偏向角的测试方法，一直成功地应用在可见光折射率的测定中。其最小偏向位置的确定，是使其折射象置于 $\frac{r_{内}}{r_{外}} = 2$ 的位置^[5] (即三象法，其中 $r_{内}$ 与 $r_{外}$ 分别为折射象距内反射象与外反射象的距离)。而在非可见光测试中需采取逐渐逼近的方法。

对于如图 2 所示的三棱镜样品， A 为顶角， i 为入射角， θ 为偏向角。根据图中各角的关系，可以推导出如下的关系式：

$$\theta = i - A + \sin^{-1} \left[n \cdot \sin \left(A - \sin^{-1} \frac{\sin i}{n} \right) \right] \dots \dots \dots (3)$$

式中 A 为定值，对于固定谱线， n 也为定值，所以 θ 是 i 的函数。

首先根据公式 (3)，计算出 $i \sim \theta$ 对应关系表 (如表 1)，大致确定 θ_{min} 位置。表中黑体字为最小偏向角大致位置。

表(1) $i \sim \theta$ 对应关系表.ZK₄, 0.935微米, n = 1.5984, A = 60°0'15.9"

i (度)	θ	2θ	i (度)	θ	2θ
52.6	46°7'2.31"	92°14'4.6"	53.2	46°6'49.3"	92°13'38.5"
52.7	46°6'56.7"	92°13'53.4"	53.3	46°6'51.8"	92°13'43.7"
52.8	46°6'52.5"	92°13'44.9"	53.4	46°6'55.8"	92°13'51.5"
52.9	46°6'49.6"	92°13'39.2"	53.5	46°7'1.0"	92°14'2.0"
53.0	46°6'48.1"	92°13'36.3"	53.6	46°7'7.6"	92°14'15.2"
53.1	46°6'48.0"	92°13'36.0"			

在确定 θ 最小的大致位置后，再用逐渐逼近的方法找 θ 最小的真实位置。即当接收系统置于小于 $\theta_{最小}$ 处时，不管怎样转动样品来改变 i 角，放大器无接收讯号指示。而当接收系统置于大于 $\theta_{最小}$ 位置时，在改变 i 时，将有两次偏折被接收，则放大器出现两次最大指示。在这种情况下，使接收系统逐渐向小的方向趋近，不断出现两次最大指示情况，但两次最大指示间隔逐渐缩小，最后当恰是 $\theta_{最小}$ 位置时，则只出现一次最大指示，此即为最小偏向角位置。这一实验现象可用图 5 来表示。

以同样方法测得另一方向的最小偏向位置，则得到 $2\theta_{最小}$ 。在已测得顶角的情况下，按公式 (2)，即可求得其折射率值。

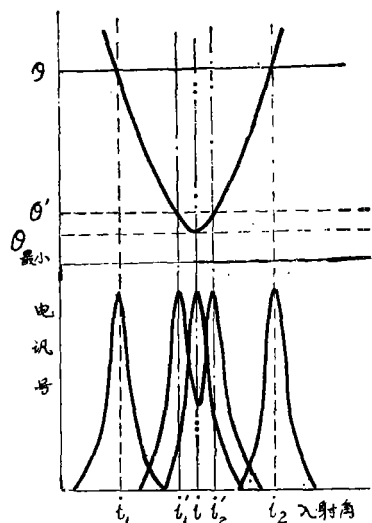


图5 确定最小偏向位置示意图

四、测试结果

用自准直法对于普通光学玻璃(LaK₂)、红外光学玻璃(N-344)、晶体光学材料(CaF₂)以及铝酸盐红外材料(HWC)作了典型测量,各波长的折射率值分别列于表(2)、表(3)、表(4)、表(5)中。

表(2) LaK₂的折射率数据

n N(次)	λ (微米)	0.935	1.014	1.129	1.3622	1.5295	1.7012
1		1.67833	1.67746	1.67533	1.67138	1.66868	1.66567
2		1.67832	1.67746	1.67531	1.67138	1.66871	1.66565
3		1.67833	1.67746	1.67532	1.67137	1.66871	1.66569
平均		1.67833	1.67746	1.67532	1.67138	1.66870	1.66567
标准误差		$\pm 0.7 \times 10^{-5}$	0	$\pm 1.0 \times 10^{-5}$	$\pm 0.7 \times 10^{-5}$	$\pm 1.7 \times 10^{-5}$	$\pm 2 \times 10^{-5}$

表(3) N-344的折射率数据

n N(次)	λ (微米)	0.935	1.014	1.129	1.3622	1.5295	1.7012
1		1.68284	1.68160	1.67931	1.67553	1.67322	1.67084
2		1.68282	1.68160	1.67931	1.67553	1.67323	1.67084
3		1.68282	1.68159	1.67929	1.67552	1.67322	1.67082
平均		1.68283	1.68160	1.67930	1.67553	1.67322	1.67083
标准误差		$\pm 1.2 \times 10^{-5}$	$\pm 0.7 \times 10^{-5}$	$\pm 1.2 \times 10^{-5}$	$\pm 0.7 \times 10^{-5}$	$\pm 0.7 \times 10^{-5}$	$\pm 1.2 \times 10^{-5}$

表(4) CaF₂ 的折射率数据

N(次) \ λ(微米) \ n	λ(微米)					
	0.935	1.014	1.129	1.3622	1.5295	1.7012
1	1.42929	1.42909	1.42838	1.42718	1.42640	1.42560
2	1.42929	1.42907	1.42839	1.42716	1.42641	1.42560
3	1.42930	1.42908	1.42840	1.42720	1.42641	1.42561
平均	1.42929	1.42908	1.42839	1.42718	1.42641	1.42560
标准误差	±0.7×10 ⁻⁵	±1×10 ⁻⁵	±1×10 ⁻⁵	±2×10 ⁻⁵	±0.7×10 ⁻⁵	±0.7×10 ⁻⁵

表(5) 铝酸盐红外材料的折射率数据

样品 \ λ(微米) \ n	λ(微米)			
	1.014	1.129	1.3622	1.7012
HWC ₂₆	1.82233	1.81943	1.81501	1.81017
HWC ₂₇	1.78935	1.78668	1.78269	1.77824
HWC ₂₈	1.76633	1.76385	1.75993	1.75555
HWC ₂₉	1.67978	1.67779	1.67464	1.67077
HWC ₃₀	1.62661	1.62492	1.62211	1.61865

对于最小偏向角的测试方法, 本文着重研究其测试方法。因器件均不固定, 所以影响精度, 此文仅列一种样品一条谱线的数据。

表(6) ZK₄玻璃0.935微米的折射率数据

n	1.59835	1.59834	1.59827	1.59828	1.59829	平均: \bar{n} 1.59831
$\bar{n} - n$	+4×10 ⁻⁵	+3×10 ⁻⁵	-4×10 ⁻⁵	-3×10 ⁻⁵	-2×10 ⁻⁵	

五、误差讨论

1. 系统误差: 测角仪的精度较高, 它所带来的误差是 $\pm 1.5 \times 10^{-6}$, 这样的误差对红外折射率的测试是可忽略的。光源的跳动、接收器的灵敏度、放大器的稳定度、杂光等都是产生误差的主要原因。

2. 人为误差: 主要是对最小偏向角的辨认, 它直接影响测试结果。

按照标准误差计算公式:

$$m = \pm \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\bar{n} - n_i)^2}}{\sqrt{N-1}} \dots \dots \dots (4)$$

举LaK₂ 对一条谱线的测试数据为例进行计算。

表(7) Lak₂在1.129微米下折射率多次测试结果

n	1.67533	1.67530	1.67531	1.67532	1.67534	1.67534	1.67533	平均: \bar{n} 1.67532
$\bar{n} - n$	+1×10 ⁻⁵	-2×10 ⁻⁵	-1×10 ⁻⁵	0	+2×10 ⁻⁵	+2×10 ⁻⁵	+1×10 ⁻⁵	

$$m = \pm 1.58 \times 10^{-5} \approx \pm 2 \times 10^{-5}$$

所以自准直方法测试误差为 $\pm 2 \times 10^{-5}$ 。

对于最小偏向角法误差计算如下：

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{\theta}_{\text{最小}} - \theta_{\text{最小}i})^2}{N-1}} \dots\dots\dots (5)$$

用 ZK_4 的 0.935 埃最小偏向角的测试为例。

表(8) ZK_4 0.935 埃最小偏向角的测试数据

$2\theta_{\text{最小}i}$	92°13'3.9"	92°12'54.42"	92°12'8.13"	92°12'12.07"	92°12'20.75"	平均 $2\bar{\theta}_{\text{最小}}$ 92°12'31.85"
d_i	+32.05"	+22.57"	-23.72"	-19.78"	-11.1"	

* d_i 为 $(2\bar{\theta}_{\text{最小}} - 2\theta_{\text{最小}i})$

$$m = \pm 12.78''$$

$$\text{又因 } n = \frac{\sin \frac{A + \theta_{\text{最小}}}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

$$\text{则: } dn = \frac{1}{2} \frac{\cos \frac{A + \theta_{\text{最小}}}{2}}{\sin \frac{A}{2}} d\theta_{\text{最小}}$$

$$d\theta_{\text{最小}} \leq m = \pm 12.78'' = \pm 6.2 \times 10^{-5} \text{ (弧度)}$$

$$dn \leq \pm 0.60 \times 6.2 \times 10^{-5} = \pm 3.72 \times 10^{-5}$$

所以得到 dn 小于 $\pm 4 \times 10^{-5}$ 的测试结果。

六、讨 论

1. 两种方法均为绝对测量的方法。
2. 自准直方法测量简单，操作方便，容易辨认自准直位置，获得了较高的测试精度。
3. 在自准直的装置中采用共轭双狭缝，这有益于消除杂光。
4. 最小偏向角方法操作较复杂，辨认最小偏向位置需有一定的测试经验。此方法本应获得较自准直法更高的精度。但因各器件未固定，又只做单角测量，所以只获得低于自准直法的测试精度。待装置固定后，采用封闭法测量，会达到更高的精度。
5. 本文中只叙述了 0.935~1.7012 微米的折射率值的测量结果。若采用钾灯、铯灯、能斯特灯等光源，可向近红外及远红外扩展测量波段。

参 考 文 献

- [1] M.J.C.Flude et al., Journal of scientific Instruments 1961, 38, No.11, November, 445.
 [2] Ben C.Platt et al., Jour.Opt.Soc.Amer., 1975, 65(11), 1264.
 [3] 早川 惇二等, 大阪工业技术试验所季报, 26, 4, 266.

〔4〕 蔡英时等；中国科学院光学精密机械研究所集刊，1964, 5, 27.

〔5〕 周瑛；中国科学院光学精密机械研究所集刊，1964, 5, 14.

更 正

本刊1980年第5期41页，右上第1行“ $-0.69 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ ”应改为“ $-0.69 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ”。
特此更正。

原文作者 段文琴

81.9. 11、