

# 聚合物透镜的远红外色差和有效透射光谱

J.R. Birch

(Division of Electrical Science, National Physical Laboratory, Teddington,  
Middlesex TW11 0LW, UK)

在  $50\sim 500\text{ cm}^{-1}$  光谱范围, 计算了用高密度和低密度聚乙烯, 聚4-甲基戊烯1(TPX), 聚丙烯, 聚四氟乙烯(PTFE)和聚苯乙烯制作的平面-凸透镜的色差和有效功率透射光谱. 计算基于由色散傅里叶变换光谱测量结果推导出的光学参数.

关键词: 聚合物, 远红外, 透镜, 色差, 有效透射率.

## 1 前 言

由于非极性的聚合物具有低吸收损耗, 材料容易得到, 低成本, 便于机械加工和模压成型等优点, 所以, 用于远红外光谱范围 ( $\lambda < 500\text{ cm}^{-1}$ ) 的透镜几乎全是用这类材料制作的. 而聚合物中的聚乙烯和聚4-甲基戊烯1(TPX)在这一光谱范围内的总吸收损耗被公认为是最低的<sup>[1~3]</sup>, 因此这两种材料是用得最广泛的聚合物材料. 但对于某些特殊应用, 基于对材料性质的考虑, 也使用另外一些聚合物材料. 例如, 聚四氟乙烯(PTFE)的重要特性是它的惰性和耐腐蚀抗吸附性, 适用于与液体接触的场所, 譬如对电解质的研究<sup>[4]</sup>; 而对  $70\sim 80\text{ cm}^{-1}$  的应用范围则常常用聚丙烯代替聚乙烯, 以避免由于聚乙烯中  $B_{1u}$  模引起的  $73\text{ cm}^{-1}$  的局部损耗.

虽然这类聚合物的损耗都比较低, 但它们的远红外吸收光谱的结构很丰富, 都有一些局部晶格模迭加在强的中红外谱带的吸收升翼部分, 所以, 相应的折射率光谱中呈现出的局部的和大的色散可认为是由此而引起. 在远红外波段, 这类聚合物的典型的折射率光谱均位于  $1.4\sim 1.6$  之间, 色散小于总值的  $\sim 1\%$ , 一般情况下都明显低于这一比值. 以往测量聚合物远红外光谱大多采用变换波道条纹的方法, 其随机误差一般在百分之几水平, 这样就不能分辨色散的细节, 导致测得的这些材料的远红外透射率值几乎都相同. 现已有一种测量技术, 即色散傅里叶变换光谱技术<sup>[6~9]</sup>, 对理想样品的折射率测量精度可达到  $10^5\sim 10^6$ , 这样的精度已足以分辨出聚合物折射率光谱中的细节部分, 因此, 这种方法广泛用于研究聚合物在近毫米波<sup>[10~14]</sup> 和远红外范围<sup>[2, 8, 15, 16]</sup> 的光学常数. 有了对这些透镜材料的光学常数的详细和定量的分析, 就能够根据透镜的两个重要参数, 即色差和有效透射率损耗合理地评价透镜设计方案. 本文利用以前已发表过的色散傅里叶变换光谱研究结果<sup>[1, 3, 17, 18]</sup>, 对于高

密度聚乙烯 (HDPE), 低密度聚乙烯 (LDPE), TPX, 聚丙烯, PTFE 和聚苯烯在  $50 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$  光谱范围的透镜设计进行了评价。

## 2 理 论

用一个同轴小目标发出的多色光照射一个单透镜, 将会在稍微不同的轴向位置上产生一连串放大倍数略有差别的图象, 这就是透镜材料的折射率色散的表现形式, 是由于色差引起的。在这一系列图象中任意两者之间在轴向上的位移称之为纵向色差, 而在垂直于轴方向上的位移则称之为横向色差。可以由一般的薄透镜公式推导出纵向色差的表达式

$$\Delta = \frac{u [f(\nu_1) - f(\nu_0)]}{[u - f(\nu_1)][u - f(\nu_0)]} \quad (1)$$

式中  $\Delta$  为用焦距  $f(\nu_0)$  和  $f(\nu_1)$  表示的波数  $\nu_0$  和  $\nu_1$  之间的透镜纵向色差,  $u$  为目标距离。式(1)的缺点是: 对于一种给定的材料, 它针对的是由  $u$  和两个焦距之一确定的某一种几何结构。但可以由透镜制造公式推导出两个不同波数处焦距之间的关系式

$$\frac{f(\nu_1)}{f(\nu_0)} = \frac{n(\nu_0) - 1}{n(\nu_1) - 1} \quad (2)$$

式(2)中  $n(\nu)$  项表示指定波数值处的折射率。在透镜被平面波 ( $u \rightarrow \infty$ ) 照射的极限条件下, 式(1)简化成  $\Delta = f(\nu_1) - f(\nu_0)$ , 式(2)的焦距比可作为与几何结构无关的纵向色差的表达式。

与色差表达式不同的是, 透镜的透射率损耗不是唯一取决于光谱的量, 而是与透镜的形状和它所在的光学配置的几何位形有关, 因此, 在计算透射率损耗时必须计入由此引起的损耗。一种比较普遍采用的方法是, 当透镜被一束  $N$  元的光束照射时, 计算透镜的有效透射光谱。即

$$T(\nu) = N^{-1} \Sigma \{ [1 - R_{1,N}(\nu)] [1 - R_{2,N}(\nu)] \exp[-\alpha(\nu)d_N] \}, \quad (3)$$

式中包含了透镜形状,  $d_N$  表示第  $N$  元光在透镜内的光程长度,  $R_{e,N}(\nu)$  项表示由于入射角度不同, 各光元素在透镜表面上的反射损耗的微小差别。如果忽略反射项对角度的依赖关系, 式(3)就可以扩展, 只要引入透镜的有效光学厚度  $\bar{d}$ , 其定义为

$$\exp[-\alpha(\nu)\bar{d}] = N^{-1} \Sigma \exp[-\alpha(\nu)d_N] \quad (4)$$

厚度  $\bar{d}$  与波数相关, 反映出所属材料的吸收系数的厚度。透射光谱仅涉及到透镜损耗, 而与透镜的光通量聚集状态无关, 它作为透射光谱的一个倍增因子可看作透镜的总的品质因数。

对于这类低损耗聚合物材料, 可以用一种简化的近似代替上文的方法, 只要假设照射透镜的是平面波, 并计算透镜的等效几何厚度, 考虑到透镜的体积, 这是可行的。由此, 可得到当平面-凸透镜的曲率半径为  $r$ , 孔径直径为  $2a$  时, 等效厚度

$$\bar{d} = \frac{[2r^3 - \sqrt{r^2 - a^2} (2r^2 + a^2)]}{3a^2} \quad (5)$$

考虑有效厚度为  $\bar{d}$  的透镜的一个单程, 并假定标称入射反射损耗, 可得到透镜的透射损耗简

单表达式.

### 3 实 验

本工作涉及的 6 种聚合物的远红外折射率谱和吸收光谱已经发表过<sup>[2,3,17,18]</sup>, 光谱测量均是用色散傅里叶变换光谱仪进行的<sup>[6~9]</sup>. 用这种方法测得的在样品内传播的光波的衰减和相位移动具有很高的精度, 并且是波数的函数. 这样, 利用两个不同介质的界面菲涅耳推出的反射和透射系数的表达式, 根据测得的参数即可以正确地计算出样品的折射率谱和吸收谱.

### 4 结 果

图 1~6 是我们计算的色差和有效透射光谱. 计算式(2)描述的色差光谱是根据每种材料在  $100\text{ cm}^{-1}$  (即  $\nu_0 = 100\text{ cm}^{-1}$ ) 的折射率测量结果. 计算透镜的有效透射光谱时, 透镜的

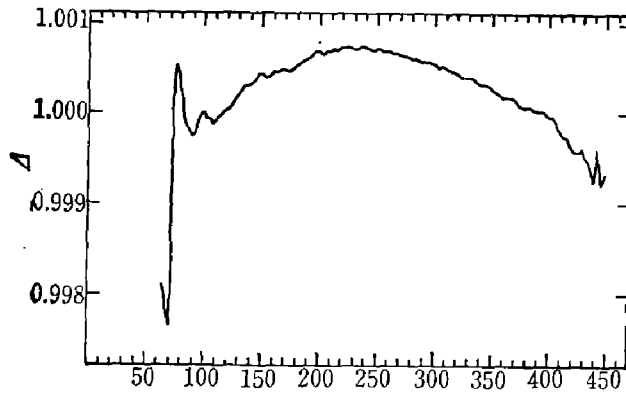


图 1  $100\text{ cm}^{-1}$  处焦距为 90 mm 的 HDPE 透镜的色差和有效透射光谱

Fig. 1 The chromatic aberration and effective transmission spectra for an HDPE lens with a focal length of 90 mm at  $100\text{ cm}^{-1}$

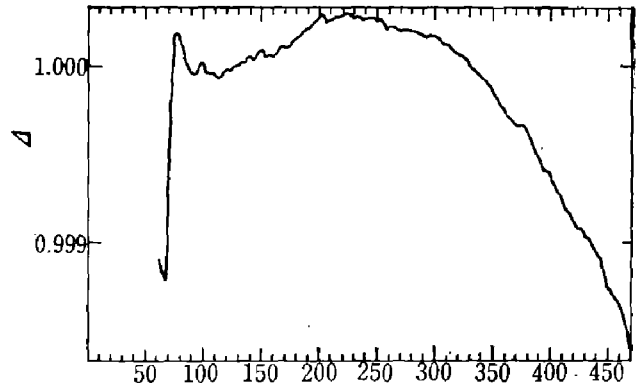


图 2  $100\text{ cm}^{-1}$  处焦距为 90 mm 的 LDPE 透镜的色差和有效透射光谱

Fig. 2 The chromatic aberration and effective transmission spectra for an LDPE lens with a focal length of 90 mm at  $100\text{ cm}^{-1}$

焦距为 90 mm (在  $100\text{ cm}^{-1}$  处), 孔径直径为  $2a=60\text{ mm}$ ,  $f/$ 数为  $f/1.5$ , 这是本实验室的通用元件. 由这些参数, 式(5)给出了折射率约为 1.5 时, 有效厚度约为 6 mm.

聚乙烯可能是在整个远红外光谱范围使用最广泛的透镜材料, 普遍使用的两种聚乙烯材料即 HDPE 和 LDPE, 它们在  $550\sim 500\text{ cm}^{-1}$  光谱范围的折射率光谱和吸收光谱从定量上是相近的<sup>[3]</sup>. 图 1 和 2 所示的这两种材料相应的色差和有效透射光谱, 必然地反映出这种相似性. 例如, 从两种样品的有效透射光谱可清楚地看出在  $73\text{ cm}^{-1}$  范围  $B_{1u}$  晶格模的影响, 其中 HDPE 光谱中的这种影响约比 LDPE 的强一倍, 这是由于 HDPE 材料的较高结晶度所致. 两种色差光谱表明了谱带预计的相应色散, HDPE 的最大变化量为  $\sim 0.003$ , LDPE 的最大变化为  $\sim 0.0015$ . 在高波数范围, HDPE 和 LDPE 的吸收光谱都呈现出一个中心位于  $220\text{ cm}^{-1}$  的宽特征峰, 叠加在随波数增加的背景吸收上. HDPE 和 LDPE 两种材料的有效透射光谱反映出了这一行为, 分别从略高于 0.6 和 0.7 下降到  $450\text{ cm}^{-1}$  的 0.15 和 0.1, 并且, 在  $220\text{ cm}^{-1}$  处有一个宽的最小值. 两种色差光谱在  $220\text{ cm}^{-1}$  处都上升到一个宽的极大值, 对应于透射光谱的同一特征, 然后随波数增高而下降. LDPE 透镜的有效透射光谱整体上比 HDPE 约高一倍, 由于这两种透镜的折射率和色差光谱很接近, 除非有其它考虑, 否则一般应优先考虑 LDPE 透镜.

从图 3 所示的 TPX 的色差和透射光谱可看出在随波数增加而缓慢上升的背景吸收上, 叠加着 8 个吸收带, 在  $70\sim 80\text{ cm}^{-1}$  范围有一个宽肩, 此外, 在 141.7, 234.5, 249.2, 295.0, 358.9, 388.9 和  $410\text{ cm}^{-1}$  处各有一个分立带. 将吸收光谱转换成有效透射光谱, 当波数从  $30\text{ cm}^{-1}$  增加到  $410\text{ cm}^{-1}$  时, 有效透射率从略低于 0.9 减小到接近于零. 谱线上的一些小的窄带结构是由分立带造成的. 在低于  $200\text{ cm}^{-1}$  的光谱范围内, TPX 透镜的光谱仅在  $73\text{ cm}^{-1}$  附近与图 2 所示的 LDPE 透镜光谱有明显不同, 而  $73\text{ cm}^{-1}$  正是 LDPE 材料晶格模的波段. 在高于  $200\text{ cm}^{-1}$  光谱范围, TPX 透镜的透射光谱下降得比 LDPE 透镜快得多. 色差光谱清楚地表示出色散与吸收带的关系, 在整个光谱范围最大色散变化为 0.03.

由于聚丙烯的吸收稍高于聚乙烯和 TPX, 因此, 作为透镜材料, 其应用面不广. 在  $50\sim 500\text{ cm}^{-1}$  吸收光谱中, 可发现在随波数单调上升的背景吸收上叠加着 5 个分立带, 从图 4 的有效透射光谱中可清楚地看出这些分立波带引起的后果. 图 4 中有效透射率从  $70\text{ cm}^{-1}$  相当高的 0.8, 下降到  $250\sim 430\text{ cm}^{-1}$  范围的低于 0.2. Chantry 等人<sup>[5]</sup>建议在  $70\sim 80\text{ cm}^{-1}$  光谱范围内用聚丙烯透镜代替聚乙烯透镜, 以避免  $73\text{ cm}^{-1}$  带引起聚乙烯吸收损耗. 图 2 表明 LDPE 在  $73\text{ cm}^{-1}$  处的损耗很小, 因此, 这个建议是有异议的. 此外, 如果必须避开  $73\text{ cm}^{-1}$  带, 使用低损耗的 TPX 也能达到目的. 聚丙烯的色差光谱取决于与各吸收带相关的色散, 色差在整个被测光谱范围内的最大变化约为 0.0025.

在近毫米波段, PTFE 几乎与聚乙烯和 TPX<sup>[10]</sup> 一样透明, 因此被用于制作这一光谱范围的透镜和窗口. 特别是 PTFE 的化学惰性使其能避免在液体中受到腐蚀和发生吸附, 因而适用于液体<sup>[4]</sup>. 然而, 由于在  $202\text{ cm}^{-1}$  有一个强吸收带, 其峰值吸收系数为  $220\text{ cm}^{-1}$ <sup>[15]</sup>, 因而其吸收光谱随波数增加迅速增强. 对于有效厚度为 6 mm 左右的 PTFE 透镜, 与这一吸收峰值相对应的极小的透射率几乎趋于零. 因此, 人们可以用 PTFE 材料制作在低于  $200\text{ cm}^{-1}$  范围内真正不透明的透镜. 如图 5 所示, 当波数从  $\sim 75\text{ cm}^{-1}$  增加到  $170\text{ cm}^{-1}$  时,

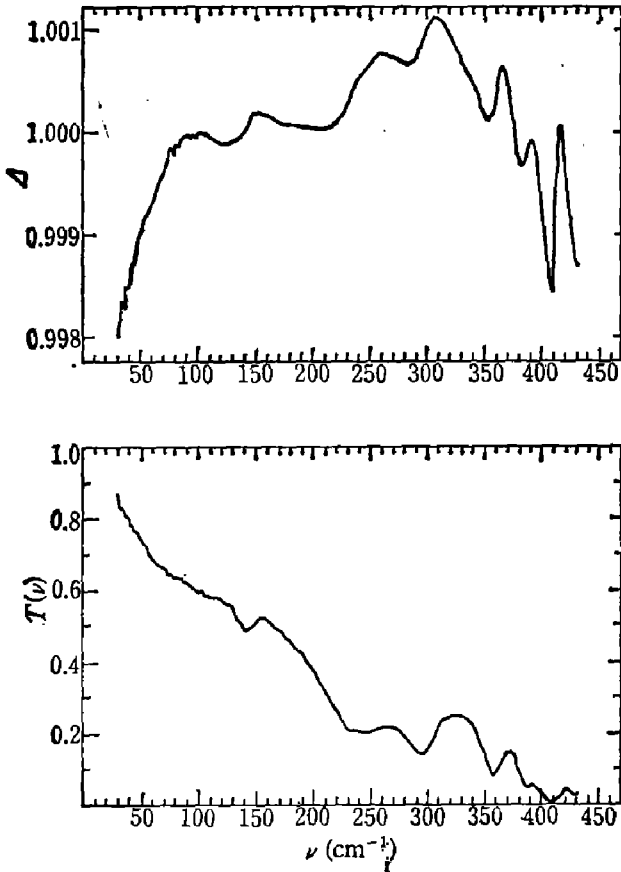


图3  $100\text{ cm}^{-1}$ 处焦距为90 mm的TPX透镜的色差和有效透射光谱

Fig. 3 The chromatic aberration and effective transmission spectra for a TPX lens with a focal length of 90mm at  $100\text{ cm}^{-1}$

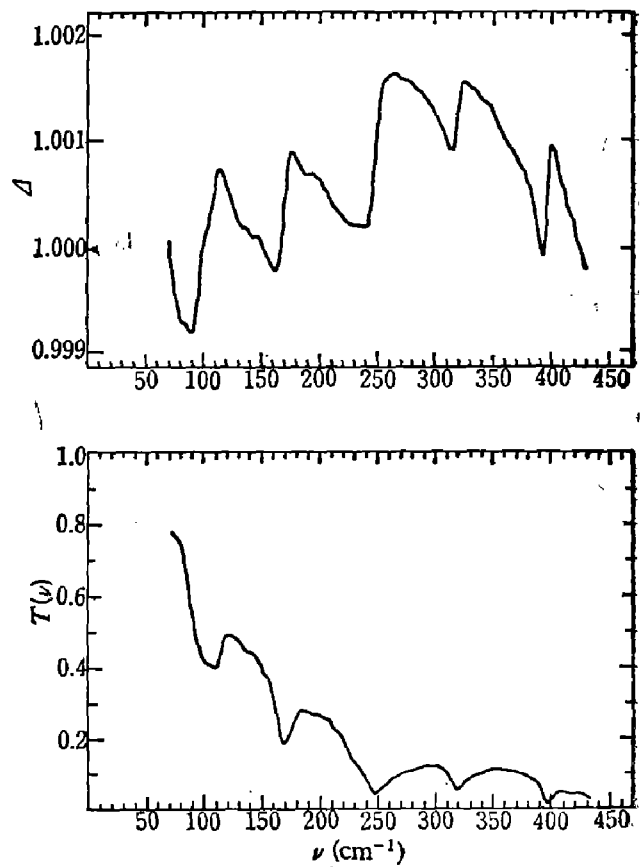


图4  $100\text{ cm}^{-1}$ 处焦距为90 mm的聚丙烯透镜的色差和有效透射光谱

Fig. 4 The chromatic aberration and effective transmission spectra for a polypropylene lens with a focal length of 90 mm at  $100\text{ cm}^{-1}$

PTFE透镜的有效透射率从0.3降到0.其对应的色差光谱发生了很强的色散,反映出与上述特征相关的强折射率色散.当波数从 $50\text{ cm}^{-1}$ 增加到 $180\text{ cm}^{-1}$ 时,色差从略高于1减小到略高于0.92.

在近毫米波段,聚苯乙烯的吸收光谱属中等水平,约为公认的低损耗材料LDPE, HDPE, TPX和PTFE的3倍,但与损耗较高的尼龙和有机玻璃相比,又仅为它们的 $1/8^{[10]}$ .虽然Chantry和Chamberlain<sup>[19]</sup>认为聚苯乙烯在低于 $30\text{ cm}^{-1}$ 范围是可以利用的,但作为透镜材料并没有得到广泛使用,因为实际应用中已有了聚乙烯和TPX,所以就不必再用聚苯乙烯了.图6示出聚苯乙烯的有效透射谱可清楚地看出这种材料不适于用作透镜材料.在 $50\sim 450\text{ cm}^{-1}$ 范围,其透射光谱仅在低于 $60\text{ cm}^{-1}$ 处稍高于0.2,从 $130\text{ cm}^{-1}$ 到 $300\text{ cm}^{-1}$ 有一个很宽的最小值,透射率均低于0.1,而在 $190\sim 230\text{ cm}^{-1}$ 范围,实际透射率已趋于零.与其对应的色差光谱从低波数的 $\sim 1$ 降到 $450\text{ cm}^{-1}$ 处的0.98.

图1~6的色差光谱仅仅适用于平面波近似,即 $u\rightarrow\infty$ .如果不是这种情况,由式(1)给出的纵向色差 $\Delta$ 值将明显增大,而高于由式(2)的焦距比所给出的 $\Delta$ 值,特别是在目标距焦点很近的情况下.例如,在 $300\text{ cm}^{-1}$ 范围,TPX的焦距比约为1.001,由此导出的 $\Delta$ 值为

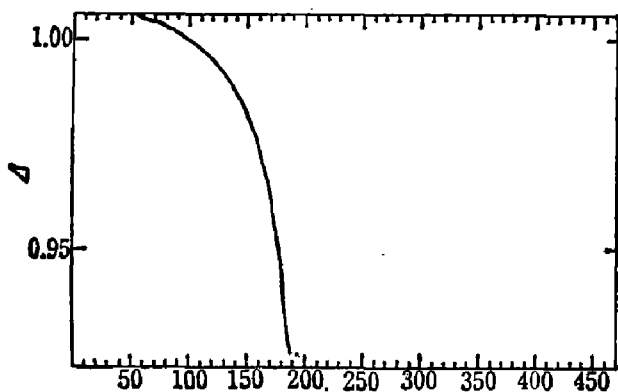


图 5  $100\text{ cm}^{-1}$  处焦距为 90 mm 的 PTFE 透镜的色差和有效透射光谱

Fig. 5 The chromatic aberration and effective transmission spectra for a PTFE lens with a focal length of 90 mm at  $100\text{ cm}^{-1}$

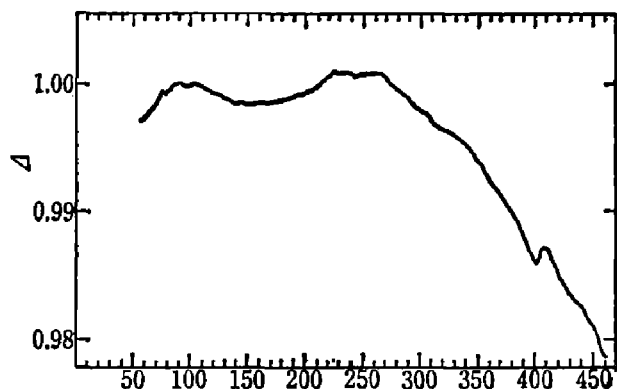


图 6  $100\text{ cm}^{-1}$  处焦距为 90 mm 的聚苯乙烯透镜的色差和有效透射光谱

Fig. 6 The chromatic aberration and effective transmission spectra for a polystyrene lens with a focal length of 90 mm at  $100\text{ cm}^{-1}$

0.09 mm. 但当目标距离为 100 mm 时,  $\Delta$  值增加了两个数量级, 达到 9 mm. 因此, 在应用本文提供的数据时, 必须充分认识到这一点. 因为并不是所有用于远红外波段的透镜的几何形状都能避免使目标距离接近焦距, 即  $u=f(\nu)$ . 举例说, 如果目标距离为焦距的两倍时,  $\Delta$  值一般在由焦距比给出的  $\Delta$  值的两倍之内.

## 5 结 论

计算结果表明, 聚合物透镜材料主要分为两类. 第一类是低损耗材料, 包括 LDPE, HDPE, TPX 和聚丙烯, 它们的色差参数均在  $1 \pm 0.002$  范围内. 第二类为两种损耗较高的材料, 即聚苯乙烯和 PTFE, 它们的色差参数与 1 相比有数量级的变化. 对于大多数远红外透镜, 前一类材料的色差是完全可以忽略不计的; 后一类材料的色差对某些应用来说  $\Delta$  值很大, 不适于使用, 然而, 后两种材料往往是因为它们的吸收损耗太大而不被使用, 如它们的有效透射光谱所示. 如果考虑用菲涅耳带片<sup>[10]</sup>代替平面-凸透镜, 则这类聚合物透镜的总吸收损耗将大大降低.

## 参 考 文 献

- 1 Chanery G W, Evans H M, Fleming J W et al. *Infrared physics*, 1969; **9**: 31
- 2 Birch J R, Nical E A. *Infrared Physics*, 1984; **24**: 273
- 3 Birch J R. *Infrared Physics*, 1990; **30**: 195
- 4 Kilp H. *J. Phys.*, 1977; **E10**: 985
- 5 Chantry G W, Fleming J W, pardoe G W F et al. *Infrared Physics*, 1971; **11**: 109
- 6 Birch J R, Parker T J. *Infrared and Millimeter Waves*, Ch. 3, Vol. 2', Ed. K J Button, New York, Academic Press, 1979
- 7 Birch J R. *Proc. SPIE*, 1981; **289**: 362
- 8 Birch J R. *Mikrochimica Acta* (Wien), 1987; **III**: 105
- 9 Parker T J. *Contemporary Physics*, 1990; **30**: 335.
- 10 Birch J R, Dromey J D, Lesurf J. *Infrared Physics*, 1981; **21**: 225
- 11 Birch J R, Kong F P. *Infrared Physics*, 1984; **24**: 309
- 12 Afsar M N. *IEEE Trans, Microwave Theory and Tech.*, 1985; **MTT33**: 1410
- 13 Afsar MN. *IEEE Tran. Instrumentation and Meas.*, 1987; **IM 36**: 530
- 14 Meng C, Léotin J, Birch J R. *Infrared Physics*, 1991, **31**: 211
- 15 Chamberlain J E, Gebbie H A. *Applied Optics*, 1966; **5**: 393
- 16 Afsar M N, Chantry G W. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, 1977; **MTT 25**: 509
- 17 Birch J R. *NPL Report DES III*, June, 1991.
- 18 Birch J R. *Infrared Physics*, Submitted
- 19 Chantry G W, Chamberlain J E. *in' Polymer Science*, Chap. 20', Ed. A D Jenkins. North Holland, Amsterdam, 1972
- 20 Garrett J E, Wiltse J C. *Intl. J. Infrared and Millimeter Waves*, 1991; **12**: 195

## FAR INFRARED CHROMATIC ABERRATION AND EFFECTIVE TRANSMISSION SPECTRA OF POLYMER LENSES

J. R. BIRCH

(Division of Electrical Science, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex TW11 0LW, UK)

The chromatic aberration and effective power transmission spectra of plano-convex lenses made from high and low density polyethylene, TPX, polypropylene, PTFE and polystyrene have been calculated for the spectral region between 50 and 500  $\text{cm}^{-1}$ . The calculations are based on optical constant data derived from measurements by dispersive Fourier transform spectroscopy.

**Key words:** polymers, far infrared, lenses, chromatic aberration, effective transmission.