

文章编号: 1672-8785(2011)12-0014-03

# 光线通过傅里叶变换红外光谱仪的光程差分析

廖腊梅<sup>1</sup> 贺 健<sup>2</sup> 张庆国<sup>2</sup>

(1. 洛阳师范学院物理与电子信息学院, 河南洛阳 471022 ;

2. 河南科技大学物理与工程学院, 河南洛阳 471023)

**摘要:** 为了研究光线通过傅里叶变换红外光谱仪的光程差, 采用对称分析和几何光学方法分析了光线通过一个至三个平板时的光程表达式, 并得出了一个光线通过任意多个平板时的光程的一般表达式。在此基础上, 分析了核心部件——迈克耳逊干涉仪的两个臂产生的随入射角变化的光程差的精确表达式。最后给出了其广角条件。该研究对于广角傅里叶变换红外光谱仪的设计具有重要的参考意义。

**关键词:** 傅里叶变换红外光谱仪; 光程差; 迈克耳逊干涉仪; 广角

中图分类号: P427.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.12.003

## Analysis of Optical Path Difference of a Ray Passing through FTIR

LIAO La-mei<sup>1</sup>, HE Jian<sup>2</sup>, ZHANG Qing-guo<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Electron Information, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China;

2. School of Physics and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** To study the optical path difference of a ray passing through a Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR), the symmetric analysis and geometrical optics methods are used to analyze the optical path expression when the ray is passing through one to three plates and a general optical path expression when a ray is passing through arbitrary plates is derived. On the basis of above analysis, the accurate expression of the optical path difference reduced by two arms of a Michelson interferometer with respect to the incident angle is analyzed. Finally, the condition for field widening is given. This research is of great significance to the design of a wide field FTIR.

**Key words:** FTIR; optical path difference; Michelson interferometer; field widening

## 0 引言

傅里叶变换红外光谱仪在空间红外探测中具有非常重要的应用<sup>[1]</sup>, 其核心部件为迈克耳逊干涉仪。根据傅里叶变换光谱学原理, 它测量到的谱线干涉图为辐射线的傅里叶变换。因此, 近年来人们对高斯线型、洛伦兹线型以及佛克脱线型的傅里叶变换进行了广泛研究<sup>[2-5]</sup>。为

了获取干涉图, 人们经常使用傅里叶变换红外光谱仪和法布里-珀罗干涉仪。但迈克耳逊干涉仪具有视场大和通量高等优点, 因此得到了广泛使用<sup>[6]</sup>。

若要对测量到的干涉图进行分析研究, 光线通过傅里叶变换光谱仪的光程差的分析则显得尤为重要。人们以前主要采用光线及其垂足的光程差分析方法进行分析的<sup>[7]</sup>。我们发现,

收稿日期: 2011-10-02

基金项目: 河南省教育厅自然科学基础研究项目 (2008B140005, 2010B140004)

作者简介: 廖腊梅(1979-), 女, 四川仁寿人, 讲师, 主要从事空间光学探测研究。E-mail: lala22360@126.com

根据对称性从光线到其对称点的光程差分析更加接近实际情况, 所以本文将对此进行研究。

为了使傅里叶变换红外光谱仪能够测量较大的角度范围, 我们是通过对核心部件——迈克耳逊干涉仪的两个臂进行分层镀膜来达到广角条件的。本文将根据计算结果对其广角条件进行分析, 以验证此讨论结果的正确性。

## 1 光线通过平板的光程分析

图 1 所示为光线通过一个折射率为  $n$  的平板时的光路图。在入射光纤上取点 A, 并取入射点为点 B。C 点为反射光线中 A 点的关于法线平面的对称点。入射角为  $\theta$ , A 点到反射面的距离为  $d$ 。图 2 为图 1 的等效光路图。在图 2 中, 我们延长 AB 至 D 点, 而且 D 点为 C 点关于反射平面的对称点。此时, 光程  $P$  可以表示为

$$P = \frac{2nd}{\cos \theta} \quad (1)$$

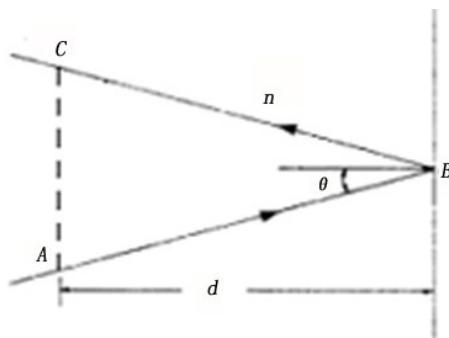


图 1 光线通过一个平板时的光路图

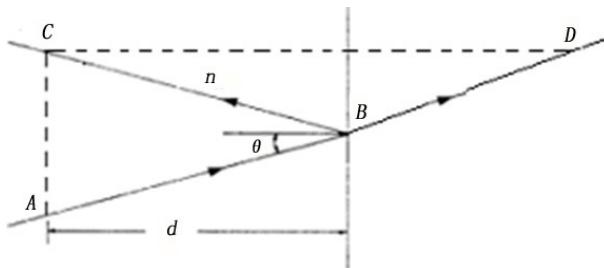


图 2 图 1 的等效光路图

图 3 所示为光线通过折射率为  $n_1$  和  $n_2$  的两个平板时的光路图。此时, 光线走过的路程为 ABCDE。其中, E 点为反射光线中 A 点的关于法线平面的对称点, 入射角为  $\theta_1$ , 折射角为  $\theta_2$ 。

作 AB 和 ED 的延长线交于 F 点。如果折射率不发生变化, 那么光线走过的路程为 ABFDE。A 点到折射面的距离为  $d_1$ , F 点到折射面的距离为  $d_0$ , 折射面和反射面之间的距离为  $d_2$ 。因此根据上面的讨论, 此时的光程  $P$  可以表示为

$$\begin{aligned} P &= \frac{2n_1(d_1 + d_0)}{\cos \theta_1} - \frac{2n_1 d_0}{\cos \theta_1} + \frac{2n_2 d_2}{\cos \theta_2} \\ &= \frac{2n_1 d_1}{\cos \theta_1} + \frac{2n_2 d_2}{\cos \theta_2} \end{aligned} \quad (2)$$

图 4 所示为光线通过三个平板时的光路图。此时, 光线走过的路程为 ABCDEFG。其中, G 点为反射光线中 A 点的关于法线平面的对称点。入射角为  $\theta_1$ , 两次折射的折射角分别为  $\theta_2$  和  $\theta_3$ 。与光线通过两个平板的情况类似, 我们作 AB 和 GF 的延长线交于 H 点。A 点到第一个折射面的距离为  $d_1$ , 第一个反射面和第二个反射面之间的距离为  $d_2$ , H 点到第一个折射面的距离为  $d_0$ , 第二个折射面和反射面之间的距离为  $d_3$ 。因此根据上面的讨论, 此时的光程  $P$  可以表示为

$$\begin{aligned} P &= \frac{2n_1(d_1 + d_0)}{\cos \theta_1} - \frac{2n_1 d_0}{\cos \theta_1} + \frac{2n_2 d_2}{\cos \theta_2} + \frac{2n_3 d_3}{\cos \theta_3} \\ &= \frac{2n_1 d_1}{\cos \theta_1} + \frac{2n_2 d_2}{\cos \theta_2} + \frac{2n_3 d_3}{\cos \theta_3} \end{aligned} \quad (3)$$

通过类似分析, 我们可以发现上述结论适用于任意多个平板的情形。注意, 在图 3 和图 4 中我们已经加上了分束器。分束器对光程方程没有影响, 但是在下面光程差的讨论中是有用的。

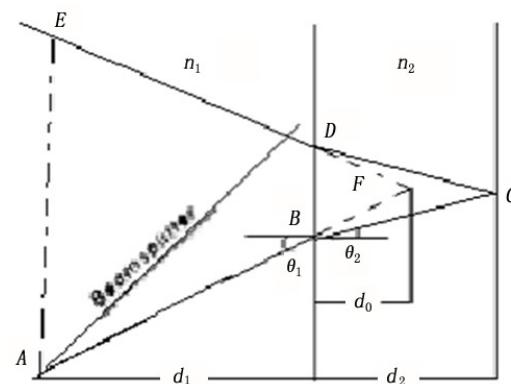


图 3 光线通过两个平板时的光路图

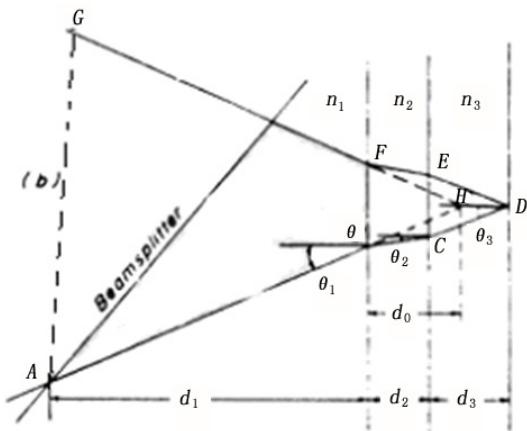


图4 光线通过三个平板时的光路图

## 2 光程差分析

我们现在讨论傅里叶变换红外光谱仪的光程差。假设此迈克耳逊干涉仪的一个臂包含一个分束器 ( $d_1, n_1$ ) 和两个平板 ( $d_2, n_2$ )/( $d_3, n_3$ )，而另一个臂包含一个分束器 ( $d'_1, n'_1$ ) 和一个平板 ( $d'_2, n'_2$ )。根据上面讨论，光程差可表示为

$$\Delta = P - P' = \frac{2n_1 d_1}{\cos \theta_1} + \frac{2n_2 d_2}{\cos \theta_2} + \frac{2n_3 d_3}{\cos \theta_3} - \frac{2n'_1 d'_1}{\cos \theta'_1} - \frac{2n'_2 d'_2}{\cos \theta'_2} \quad (4)$$

对于一个对称的分束器， $d_1 = d'_1$ ， $n_1 = n'_1$ ，而且  $\theta_1 = \theta'_1$ 。因此，式(4)中的第一项和第四项就互相抵消了。为了简化分析，一般在设计中取  $n'_2 = n_1$ ， $d'_2 = d_1$ ，则

$$\Delta = 2 \left( \frac{n_3 d_3}{\cos \theta_3} + \frac{n_2 d_2}{\cos \theta_2} - \frac{n_1 d_1}{\cos \theta_1} \right) \quad (5)$$

若将式(5)表示为空气中入射角  $i$  的形式，则有

$$\Delta = 2 \left[ \frac{n_3 d_3}{(1 - \sin^2 i / n_3^2)^{1/2}} + \frac{n_2 d_2}{(1 - \sin^2 i / n_2^2)^{1/2}} - \frac{n_1 d_1}{(1 - \sin^2 i / n_1^2)^{1/2}} \right] \quad (6)$$

由于入射角较小，利用以下泰勒级数：

$$(1+x)^a = 1 + ax + \frac{a(a-1)}{2!}x^2 + \dots \quad (7)$$

式(6)可以表示为

$$\Delta/2 = n_3 d_3 + n_2 d_2 - n_1 d_1 + \frac{\sin^2 i}{2} \left( \frac{d_3}{n_3^3} + \frac{d_2}{n_2^3} - \frac{d_1}{n_1^3} \right)$$

$$+ \frac{3 \sin^4 i}{8} \left( \frac{d_3}{n_3^3} + \frac{d_2}{n_2^3} - \frac{d_1}{n_1^3} \right) \quad (8)$$

现在我们假定一个平板为  $\text{LaF}_{21}$ ，其折射率  $n_3 = 1.767$ ，厚度  $d_3 = 8.9 \text{ cm}$ ；另一个平板为  $\text{LF}_5$ ，其折射率  $n_2 = 1.565$ ，厚度  $d_2 = 5.1 \text{ cm}$ ；分束器为  $\text{LF}_7$ ，其折射率  $n_1 = 1.560$ ，厚度  $d_1 = 6.2 \text{ cm}$ 。当入射角从  $0^\circ$  变化到  $1.5^\circ$  时，光程差的变化曲线见图5。从图5中可以看出，随着入射角的增大，光程差也增大，这与实际情况是相符的。

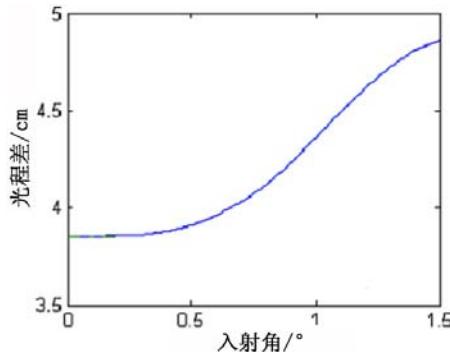


图5 光程差随入射角的变化曲线

## 3 广角条件分析

在式(8)中，如果

$$\frac{d_3}{n_3} + \frac{d_2}{n_2} - \frac{d_1}{n_1} = 0 \quad (9)$$

那么光程差对入射角  $i$  只有四次方的依赖关系。入射角的变化一般是比较小的，所以入射角的变化对光程差变化的影响是非常小的，从而实现了广角条件。

此广角条件与现有的广角条件一致<sup>[7]</sup>。该分析为广角傅里叶变换红外光谱仪的分析和设计提供了理论依据。

## 4 结论

本文采用对称分析和几何光学方法分析了光线通过一个至三个平板时的光程的表达式，得出了一个光线通过任意多个平板时光程的一般表达式。分析了傅里叶变换红外光谱仪的两个臂产生的随入射角变化的光程差的精确表达式，并给出了其广角条件。通过上面的讨论，我们可以得出以下结论：

(下转第38页)