

# Measurement Technology of Transmittance of Infrared Optical System

Der-Chin Chen<sup>1\*</sup>, Feng-Ming Yeh<sup>2</sup>, Wei-Hsin Chen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Fengjia University, Taichung Taiwan

<sup>2</sup>Department of Optometry, Yuanpei University of Medical Technology, Hsinchu Taiwan

<sup>3</sup>Department of Optometry, Hsin Sheng College of Medical Care and Management, Taoyuan Taiwan

Email: \*kanatasan.tw@yahoo.com.tw

Received: Feb. 28<sup>th</sup>, 2020; accepted: Mar. 13<sup>th</sup>, 2020; published: Mar. 20<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Infrared optical system is used in 8~12  $\mu\text{m}$  range of infrared spectrum, which cannot be seen by human eyes, and the transmittance measurement method of visible optical system cannot be used, and the transmittance of infrared optical system was difficult to measure. At present, FTIR spectrometer is used to measure transmittance of infrared optical system, which is very expensive and expensive to maintain. In this study, the transmittance of infrared optical system is measured by integrating the infrared sensing circuit and the smart infrared collimating beam. The measurement system consists of 2 mm diameter infrared collimating beam, thermopile sensor, OP amplifier, A/D IC and microprocessor. The thermopile converts the thermal radiation into analog electronic signal, and amplifies by OP amplifier, converted into digital by A/D IC, processed by 8051 microprocessor and displayed by LCD. The specifications of the lens to be tested are: focal length 19 mm, the f-number f/1.1 and the material of the lens was made by the black diamond. The test result of transmittance of the lens was 89%.

## Keywords

Infrared, Transmittance, Thermopile Sensor

# 红外线透镜穿透率量测技术

陈德请<sup>1\*</sup>, 叶丰铭<sup>2</sup>, 陈伟新<sup>3</sup>

<sup>1</sup>逢甲大学电机工程学系, 台湾 台中

<sup>2</sup>元培医事科技大学视光系, 台湾 新竹

<sup>3</sup>新生医护管理专科学校视光科, 台湾 桃园

Email: \*kanatasan.tw@yahoo.com.tw

收稿日期: 2020年2月28日; 录用日期: 2020年3月13日; 发布日期: 2020年3月20日

\*通讯作者。

文章引用: 陈德请, 叶丰铭, 陈伟新. 红外线透镜穿透率量测技术[J]. 光电子, 2020, 10(1): 18-30.

DOI: 10.12677/oe.2020.101003

## 摘 要

红外光学系统使用在8~12  $\mu\text{m}$ 红外光谱区域,此波段人眼看不到,可见光光学系统的穿透率量测方法无法使用,因此红外光学系统穿透率量测困难度相当高。红外光穿透率量测目前都是使用FTIR光谱仪,此仪器相当昂贵,维护成本高。本研究整合红外感测电路与精巧型红外准直光束进行红外光学系统穿透率的量测。量测系统由2 mm红外准直光束、热电堆检知器(Thermopile sensor)、OP放大器与A/D IC及微处理器等所组成。热电堆将热辐射转换成模拟电子信号,此微弱电子信号再被OP放大器放大、A/D IC转换成数字、8051微处理器处理及量测结果经LCD显示器显示。待测镜组规格:焦距19 mm,光圈f/1.1与镜组材料为黑钻石(Black Diamond™ chalcogenide glass)。镜组穿透率经测试结果89%。

## 关键词

红外, 穿透率, 热电堆检知器

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

近年来,随着光电产业蓬勃发展、产值不断提升,光学系统需求愈殷切,尤其在光学系统的轻量化、小型化与高精度化后,光学系统对光学组件加工与组装的公差的要求更严谨,因此光学系统的检测更加重要。有鉴于此,需要不断提升光学系统检测技术,且针对业界需求开发新型量测机台。一般可见光光学组件穿透率检测方式是采取光谱仪。至于红外光学系统因为系使用在不可见光区,眼睛看不到,无法利用可见光光学组件穿透率量测方法进行量测。红外穿透率量测目前都是使用 FTIR 光谱仪,此仪器相当昂贵,维护成本又高。而红外光学系统穿透率量测的人才相当缺乏,资源也比较少,红外光学系统相关制造与量测装备都比较昂贵,因此量测技术的发展也受限制。本文所采用红外线穿透率测试装置系针对红外光学系统穿透率量测所设计,这个技术系结合 1) 红外准直光束与热电堆检知器(thermopile sensor)、2) 放大电路与 A/D IC 及 3) 微处理器单元等三种技术。

## 2. 基本原理[1] [2]

一般而言,当一个平面波碰到一个接口,在不考虑介质吸收的情况下,部份波被折射,部份波被反射,而描述透光、反射光与入射场的比值叫做 Fresnel 公式。几何光学中折射定律与反射定律,入射光束、折射光束、反射光束与界面的法线是在同一平面上。由求解麦克斯威尔方程式,并加上必要的边界条件给出与几何光学一样的结果:反射角与入射角一样,但差个正负号,而折射角依 Snell 定律而定。由入射光传播向量、反射、折射及法线构成的平面叫做入射面,如图 1 所示电场永远都可以分成二个分量,一个与入射面平行,另一则是与入射面垂直。平行的分量被称  $p$ 、 $\pi$  或者 TM (transverse magnetic) 偏振,而垂直分量被称作  $s$ 、 $\sigma$  或 TE (transverse electric) 偏振( $s$  源自德文「senkrecht」,意指正交)。如果我们注记入射角叫  $\theta_i$ , 折射角叫  $\theta_r$ , 而反射光振幅与入射光振幅比值叫做  $r$ , 透射(折射)光振幅与入射光振幅比值  $t$ , 则 Fresnel 公式如下:

$$\text{TE:}\gamma_{\perp} = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (1)$$

$$\text{TE:}\gamma_{\parallel} = \frac{n^2 \cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{n^2 \cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = -\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (2)$$

$$\text{TE:}t_{\perp} = \frac{2\cos\theta}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = \frac{2\sin\theta_t \cos\theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (3)$$

$$\text{TE:}t_{\parallel} = \frac{2n\cos\theta}{n^2 \cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} = \frac{2\sin\theta_t \cos\theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)\cos(\theta_i + \theta_t)} \quad (4)$$

在公式(1)~(4)中,  $n$  是入射光所在介质的折射率,  $n'$  是折射光所在介质的折射率。另外我们假设介质的磁导率  $\mu$  (permeability) 与真空中一样 ( $\mu = \mu' = \mu_0$ )。反射率  $R$  (在反射光束里所含的入射光强度) 是由振幅反射系数  $r$  的平方所给定, 其形如下:

$$R_s = r_s r_s^{\circ}, R_p = r_p r_p^{\circ} \quad (5)$$

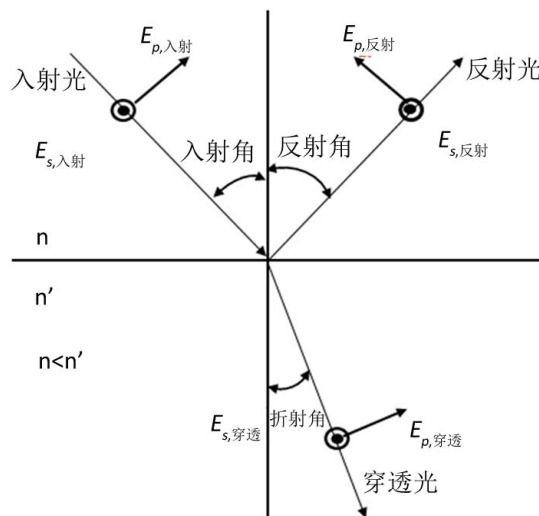
可以证得

$$|r_s|^2 + |t_s|^2 = 1, |r_p|^2 + |t_p|^2 = 1 \quad (6)$$

公式(6)可以解释成光在二介电物质的界面上能量是守恒的。一般而言,  $s$  跟  $p$  偏振反射率是不一样的, 只有在正向入射时, 反射率才会一样, 亦即:

$$R_{s,normal} = R_{p,normal} = \left[ \frac{n - n'}{n + n'} \right]^2 \quad (7)$$

考虑典型空气、玻璃界面 ( $n = 1.0, n' = 1.5$ ), 公式(7)告诉我们一个熟知的结果: 一个未镀膜的玻璃反射光界面有 4% 反射损光。每个光束的入射电场在一接口会被分成  $s$  和  $p$  的分量。Fresnel 公式会用来计算透射场的振幅, 而每个光束的  $s$  与  $p$  方向是由光束方向及法线向量来决定。通常在面上的每个光束都会不同。所以对一个非平面波入射在非平面上整个  $s$  及  $p$  方向, 通常不容易定出(图 1)。



**Figure 1.** Refraction and reflection at an interface between two media

**图 1.** 在两个介质之间的反射与折射

公式(7)是光穿透两个不同介质、且在无吸收损失状况下,计算出光线的在一界面上的反射率值,利用此由一界面推导出的公式可进一步推展至单片镜片及多片镜片光学系统反射率的计算。通常为简化计算流程,可以假设平行光以垂直入射镜片表面,即以平行光沿光轴方向入射以初估反射率值。可以利用公式(5)使用计算器作更精确计算,本研究红外光学系统穿透率量测技术可以利用公式(5)与(7)先做理论分析与计算,当作实验的依据。

### 3. 系统架构

本系统由发射端、接收端、待测红外光学系统及电子电路所组成,发射端 IR 光源使用薄膜陶瓷材料(thin film ceramic)当红外线辐射体,经准直镜发射准直光。IR 光源所使用的薄膜陶瓷发射体是奈米结构为无定形的碳薄膜电阻器,保护光窗使用 ZnSe 材料当做的,其穿透率光谱范围  $0.55\sim 20.0\ \mu\text{m}$ ,因此辐射波长范围也是  $0.55\sim 20.0\ \mu\text{m}$ 。接收端使用热电堆检知器(thermopile sensor)感测红外线信号。图 2 所示为红外光学系统穿透率量测系统装置方块图,由红外准直光束、热电堆检知器、OP 放大电路与 A/D IC 及 8051 微处理器等所组成。图 3(a)所示为红外光光源配上抛物面镜形成准直系统外观图,图 3(b)所示为红外光源调制曲线[3],图中红线代表工作周期(duty cycle) 25%,蓝线代表工作周期(duty cycle) 50%。在调制频率 100 Hz 以内时,红外光源调制深度达 50%。

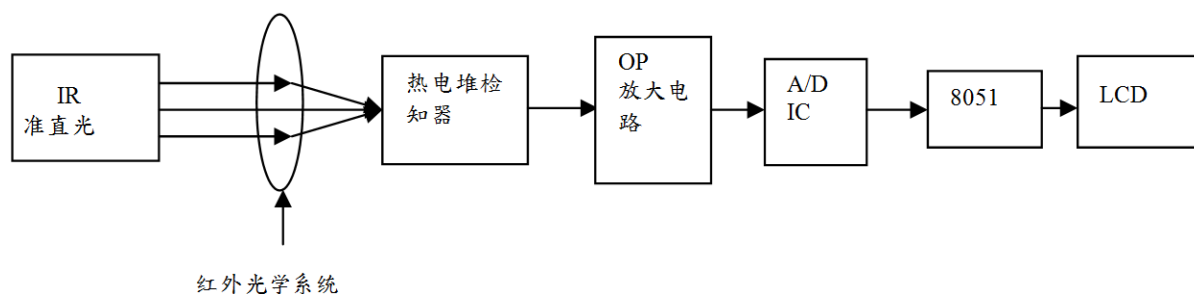


Figure 2. Measurement system block diagram

图 2. 量测系统方块图

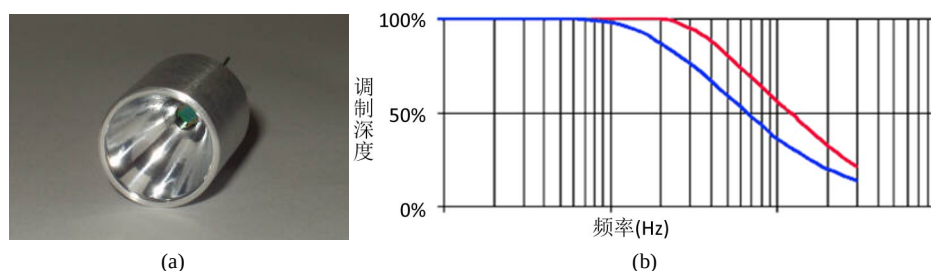


Figure 3. (a) Thin film infrared source and parabolic mirror; (b) IR source modulation curve

图 3. (a) 薄膜红外光源和抛物面反射镜; (b) 红外光源调制曲线

红外光源为正方形  $1.5\ \text{mm} \times 1.5\ \text{mm}$ ,有效发射面积  $2.25\ \text{mm}^2$ ,需扩束为外径  $30\ \text{mm}$ ,调制频率最高达 100 Hz。使用 TO-5 包装,工作温度  $500^\circ\text{C}\sim 750^\circ\text{C}$ ,寿命三年。热型检知器的热电堆系由 116 个小型热感测单元所组成,小型热感测单元直径大小为  $545\ \mu\text{m}$ ,用金属壳封装,图 4 所示为热电堆检知器外观图。热电堆器(thermopile)前有一  $5\sim 12\ \mu\text{m}$  的宽带光谱窗口滤光片[4] [5] [6]。热电堆检知器相关光电参数特性如表 1 所列,输出电压与输入温度特性如图 5 所示,图 5 中 A 与 E 曲线分别代表不同光谱特性的滤光片。因为红外信号非常弱,thermopile 之后需使用低噪声的高放大倍率的 OP 放大器放大。为提高系统分辨率 OP 放大器之后使用 13 Bit 的 A/D converter 转换成数字信号,此数字信号再经微处理器处理。

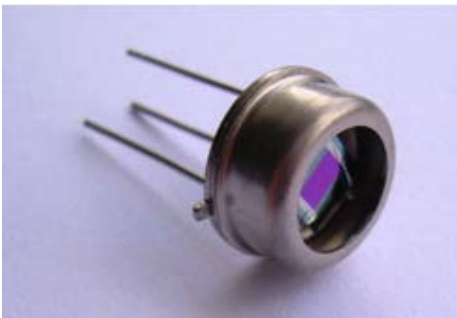


Figure 4. Thermopile sensors  
图 4. 热电堆检知器

Table 1. Optical electrical characteristics  
表 1. 光电参数特性

| 参数     | 条件                     | 最小值        | 标准值        | 最大值        | 单位                                    |
|--------|------------------------|------------|------------|------------|---------------------------------------|
| 感测单元数目 |                        |            | 116        |            |                                       |
| 芯片大小   |                        |            | 1740*1740  |            | $\mu\text{m}^2$                       |
| 感测有效区域 | 界面层                    |            | 直径 545     |            | $\mu\text{m}$                         |
| 基板厚度   | 硅基板                    | 600        | 625        | 650        | $\mu\text{m}$                         |
| 热电堆电阻  |                        | 50         | 65         | 80         | $\text{K}\Omega$                      |
| 灵敏度    | 5~14 $\mu\text{m}$ 滤光片 | 70         | 85         | 100        | $\text{V/W}$                          |
| 检知度    |                        | $1.0*10^8$ | $1.3*10^8$ | $1.7*10^8$ | $\text{cm}^*\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ |
| 时间常数   |                        |            | 16         |            | ms                                    |
| 噪声电压   |                        | 28         | 32         | 36         | $\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$           |
| 等效热噪声  |                        | 0.28       | 0.36       | 0.48       | $\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$           |
| 温度范围   | 操作                     | -20        |            | 100        | $^{\circ}\text{C}$                    |

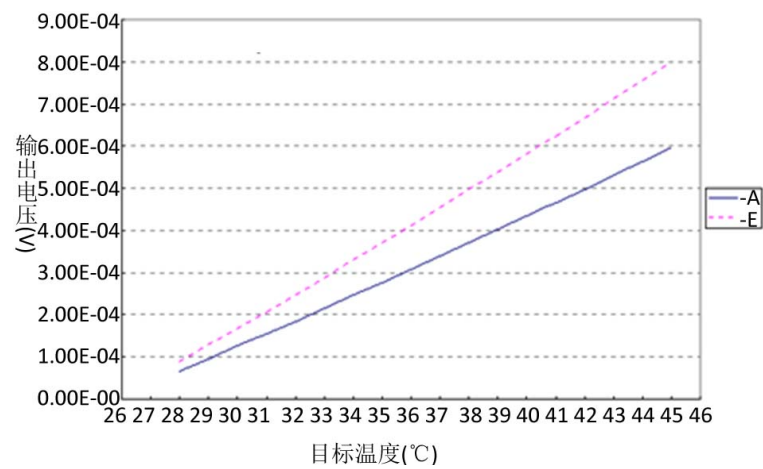


Figure 5. Output and input curve  
图 5. 输入与输出曲线

本装置关键组件包含发射端的红外线光源(IR Source)和接收端检知热辐射源的热电堆组件 (Thermopile), 图 6 所示为系统架构, 系统设计时两者的相关电路必须同时考虑进去, 设计方法简述如下:

IR Source 脉冲电路的目的在于将电源端的直流讯号转换成 5 Hz、50 % duty cycle 的交流讯号, 另一方面输入的直流电压值经由 ADC 接口解析成数字讯号后, 透过 89C51 处理显示在 LCD 上。根据 LCD 显示 IR Source 的输入电压值, 转动旋钮调整至需要量测的红外线光源大小。由于 Thermopile 属于热电型传感器, 依据接收到热辐射量产生对应的电压差, 不过产生的电压值约为数百  $\mu\text{V}$ , 前置放大电路的目的在于将 Thermopile 的讯号做适当的放大, 且 Thermopile 有可能产生负值电压, 电路上加上一个晶体管组件使其有稳定的初始电压, 利于当 Thermopile 产生负值电压时可分辨其不同, 后端滤波电路则用于滤除由外部进入同时也被放大的 60 HZ 噪声, 将放大后的讯号转换成直流电压准位输出, 以适合后续的 A/D 转换需求。IR Source 所需的输入电压和 Thermopile 的输出电压都是属于模拟讯号, 要将得到的电压值显示在 LCD 显示接口上, 须先将其转换成数字讯号。ADC 讯号撷取接口在此处就是负责将取得的模拟讯号转换成数字讯号供 89C51 处理, 且不只一个讯号需要 ADC 做转换, 因此 ADC 讯号撷取接口还有多任务处理的功能, 以便根据 89C51 的需求, 分批转换成数字讯号。输入电压的大小及 Thermopile 量测到的讯号都要在 LCD 显示器显示数值, 而各处讯号处理的中心 89C51, 它负责传送所需位置给 ADC, ADC 再传送数值回来给 89C51, 再透过 89C51 将对应的 LCD 的编码解译, 并显示在 LCD 显示器上。

### 1) IR Source 脉冲电路

主动式的红外线光源(IR Source), 选用 HawkEye Technologies LLC 公司的 IR-55 型红外线光源发射器(IR Emitter)。IR-55 可应用在最高 6.4 V 的工作电压下(交/直流)。提供高达  $500^{\circ}\text{C}\sim 750^{\circ}\text{C}$  的红外线光源, 光源热区  $1.7\text{ mm}\times 1.7\text{ mm}$ 。加热时间只要 35 ms, 而冷却时间更只需 11.5 ms, 快速度的加热、冷却可以令检测时间大幅的缩短。由于 IR-55 提供了高温的红外线辐射源, 这样就可让热电堆感测组件得到更大感度的讯号输出。另一方面, IR-55 所幅射出的红外线光源温度远大于待测物体本身的温度, 因此待测物体的温度变动就变的不重要了, 室温下的温度变动并不会影响反射光源的程度。此外我们用交流电压的方式控制 IR-55 红外线光源强度, 交流电压控制会使组件寿命比直流电压方式控制长久。

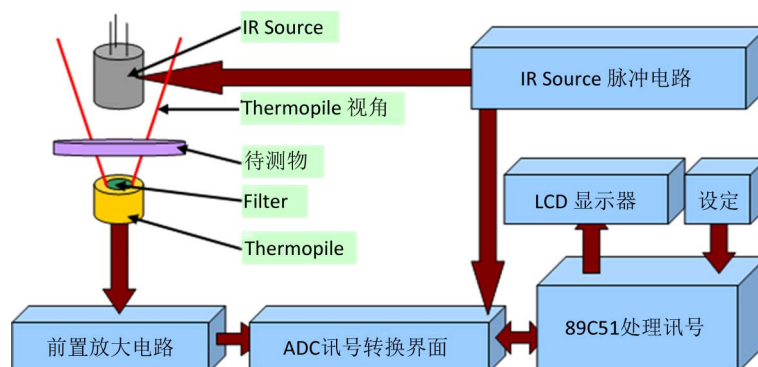


Figure 6. System structure  
图 6. 系统架构

为避免红外线光源对待测物产生温升热效应影响, 本研究, 对红外线光源进行 PWM 调变, 考虑红外线光源加热时间为 35 ms, 热电堆响应时间也大约为 20~40 ms 左右, 因此设定 PWM 频率为 5 HZ、duty cycle 为 50%。且每 1 秒钟 PWM 停止发射 2 秒, 全部周期为 3 秒。如图 7 所示。



Figure 7. PWM modulations  
图 7. PWM 调变



程序进行读取值时,必须跳过等待热电堆的响应时间,所以是由 PWM 上升缘后 50 ms 开始读值,每 5 ms 读取一次,然后求其平均值做为数据。在红外线光源的规格数据中提到,要使其发射的红外线相当于 750℃ 的温度需给予 6.4 Volts (AC or DC),为了使红外线光源达到 PWM 调变,且整体系统架构为单一电源供给,使用以下电路设计。首先用 IC HEF40106B 使直流电压转换成频率 5 Hz, 50% duty cycle 的脉冲电压,不过转换后的脉冲电压范围为 0~5 V,利用桥式整流的观念,我们使用了许多 BJT 晶体管组合,使其造成频率 5 Hz, 6.4 Volts 的 AC 讯号如图 8 红外线光源电路图。

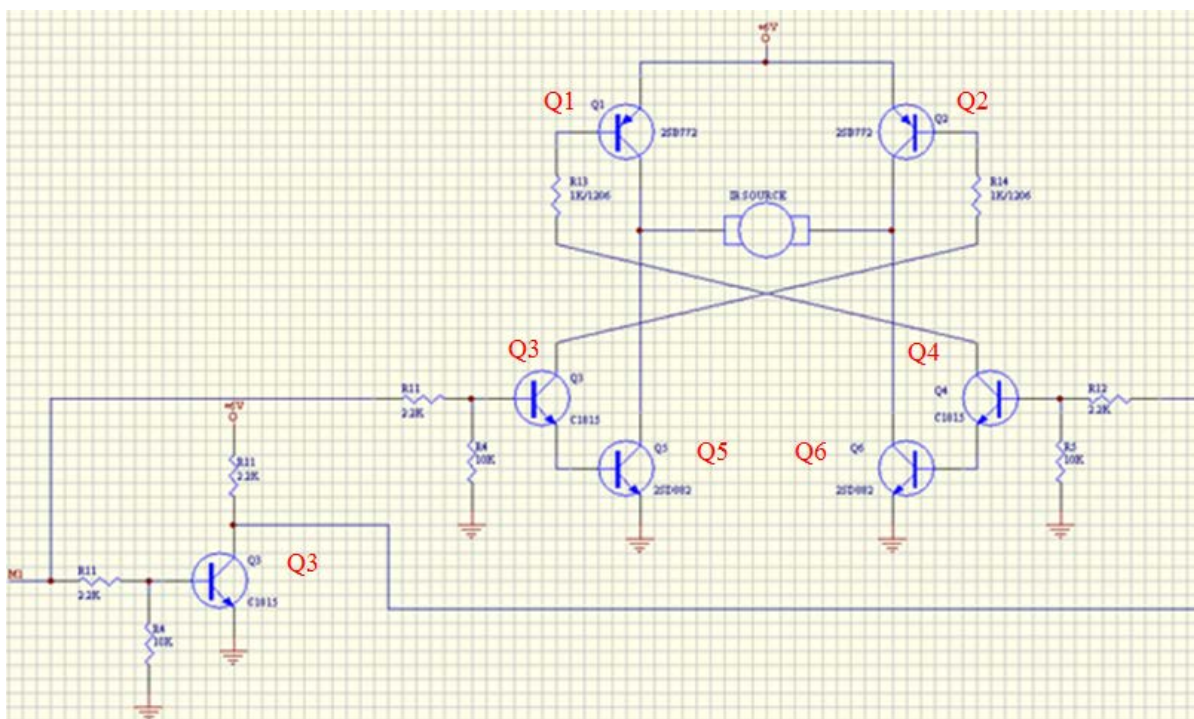


Figure 8. IR source circuit

图 8. 红外线光源电路

以图 8 为例 Q3 组件为 npn 型 BJT 电路,三个端点分别是 Emitter (射极)、Base (基极)、Collector (集极),电流  $I_B$  及  $I_C$  的方向是流入基极和集极,而  $I_E$  则是流出射极。BJT 晶体管主要利用输入电压( $V_{BE}$ )控制输出电流( $I_C$ ),在不同的工作模式下,  $V_{BE}$  与  $I_C$  的关系不同。

## 2) Thermopile 的讯号放大

Thermopile 的讯号输出大约只有数十  $\mu V$ ~数 mV 左右,为了后续 A/D 数据读取,必须进行高倍数的讯号放大。且因制程及材质的关系其内部阻抗也相当大,约在数十  $K\Omega$  左右且变化很大,因此放大器的选择即是一项重要的工作。要选用适合的放大器,首先要考虑组件的特性。Thermopile 的输出为一直流电压准位且压降微弱,只有数十  $\mu V$ ~数 mV 左右,故选用的放大器带宽并不是我们在意的项目,必须特别注意的是  $V_{OS}$  (Offset Voltage)这项参数。过大的  $V_{OS}$  将会使电压输出失真,因此我们必须选用低  $V_{OS}$  的运算放大器。另外  $V_{OS}$  的温度飘移(Offset Drift)也应尽量选择低的参数值,以增加整个放大电路的稳定性。总和以上要点,我们选用了 MAXIM 的 MAX4238, MAX4238 的  $V_{OS}$  在室温下的典型值只有 0.1  $\mu V$ ,即使最大值也只有 2  $\mu V$ ,且其  $V_{OS}$  温度飘移为 10 nV/℃。另外, MAX4238 的增益带宽积(GBWP)也高达 1 MHz,在高倍数放大下也不至于失真,各规格特性均可完全符合我们的需求。

Thermopile 的结构上约有数 50~150  $K\Omega$  的内阻,且非定值,不同组件间的内阻差异也很大,为了排

除 Thermopile 内部阻抗的影响, 放大器电路设计上必须使用具有高输入阻抗的放大型式。非反向放大器即具有高输入阻抗的特性, 此类型放大器输入阻抗一般可有数十  $M\Omega$ ~数百  $M\Omega$  的等级。

因此 Thermopile 讯号输出放大的工作, 我们采用此一电路模式, 并且设定放大器的放大倍率为 1001 倍, 以提供足够大的讯号放大输出。如图 9 所示为前置放大电路。

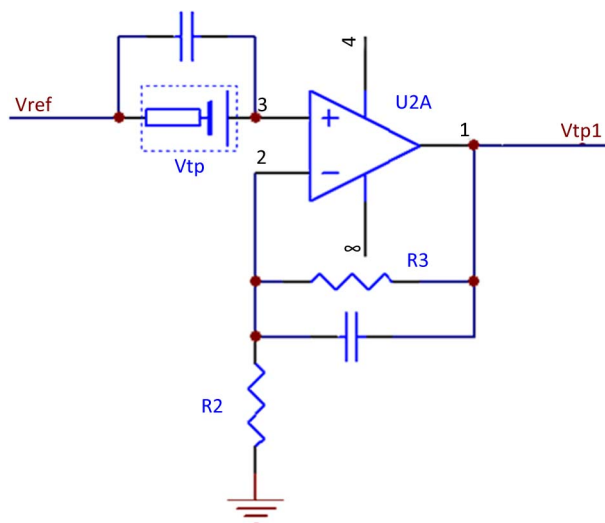


Figure 9. Thermopile preamplifier circuit  
图 9. 热电堆前置放大电路

为了滤除同时也被放大的噪声, 在放大器的输出端加上一组低通滤波器, 以增进参考电压输出的稳定度使得 A/D 转换上更加精准。设计的低通滤波器电阻为 10  $K\Omega$ 、电容为 1  $\mu F$ , 截止频率为 15.9 HZ。完整的放大电路如图 10 所示为 Thermopile 前置放大电路。

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 10 \text{ k} \times 1 \mu} = 15.9 \text{ Hz} \quad (8)$$

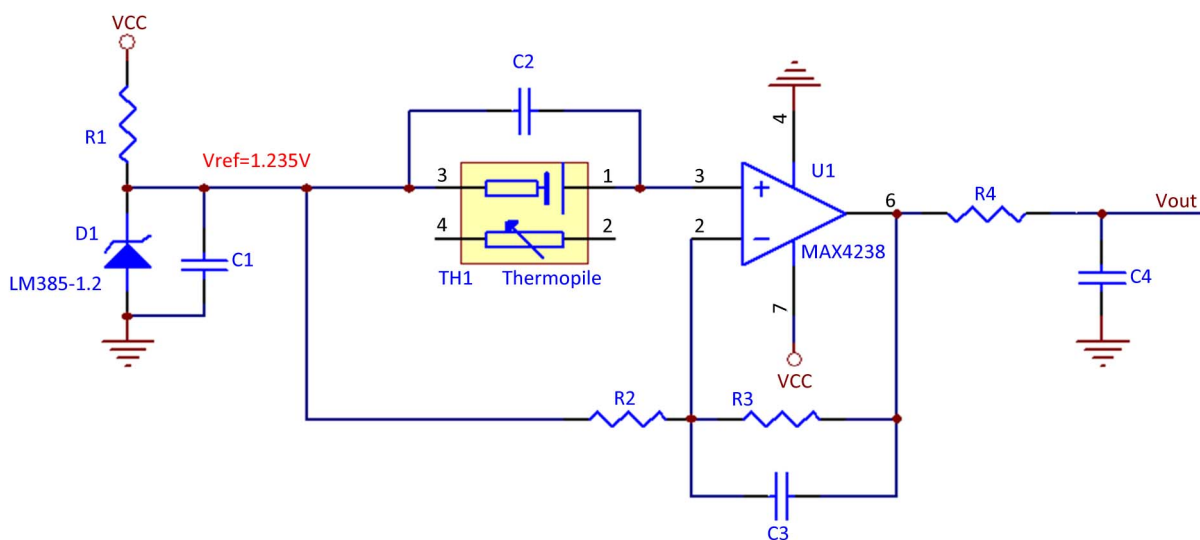


Figure 10. Thermopile preamplifier circuit  
图 10. 热电堆前置放大电路



### 3) ADC 讯号转换接口

一般使用微处理器或单芯片来做控制时,若外部电路为模拟讯号需将模拟讯号转换成 CPU 看得懂得数字讯号,常见的 IC 为 ADC0804 来做为 A/D 模拟转数字的硬件 IC,此颗 IC 有 8 位的分辨率,如果当成一般实验用,这样的分辨率是可被允许的;若需要相当精准的模拟值,这样的分辨率是不够的。以 ADC0804 为例,其输入电压是 0~5 V,一次的 A/D 转换时间为 100  $\mu$ s,是使用并列表做为传输接口,想要更快转换速度且更精准的分辨率,我们选用 Microchip 的 MCP3302 来进行 A/D 转换的工作。

MCP3302 是一个 SPI (Serial Peripheral Interface) 串行接口的 13bit SAR 型模拟/数字转换器(A/D Converter),可依需求使用 4 通道单端输入或 2 通道差动输入,电源电压使用 5 V 时,取样频率(sampling rate)可以达到 100 KHZ,量测误差最大为 $\pm 1$  LSB INL (MCP3302-B)或 $\pm 2$  LSB INL (MCP3302-C)。

MCP3302 使用上必须遵循其制定的 SPI 命令格式来对其进行转换与读取的动作。MCP3302 的串行接口有三个输入脚,一个讯号输出脚,其通讯格式里为一个起始位之后接着 4 个命令位,此 4 个位指定了 MCP3302 的动作模式,分别为 1 bit 的单端/差动选择位(Single/Diff)和 3 bits 的 channel 选择位(D2~D0)。

本研究 ADC 讯号撷取接口电路图如图 11 所示。电路图中 MCP3302 与 MCU 通讯脚位只使用了 4 pin,分别是 CLK、DOUT、DIN、ADCS。MCP3302 在和 MCU 的通讯里,属于 Slave 的周边组件,时序控制皆由扮演 Master 角色的 89C51 来决定。CLK 为串行接口的频率输入(clock),CLK 的速度决定了 SPI 的通讯速率。

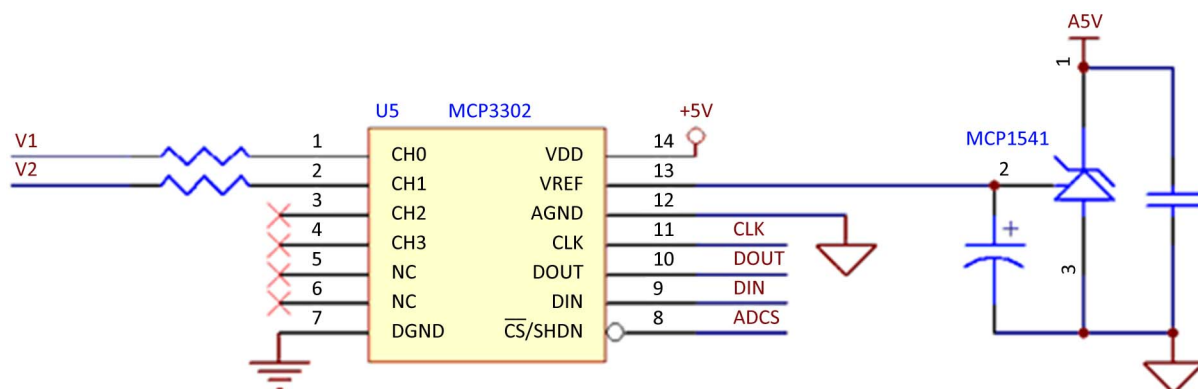


Figure 11. ADC signal acquisition interface circuit  
图 11. ADC 讯号撷取接口电路图

当 MCP3302 启动时,电荷储存在取样电容上。取样周期结束后,组件每接收到一个时钟脉冲就转换一位。必须注意的是,如果采用较慢的时钟速率,取样电容将在转换过程中释放电荷。对于 MCP3302 而言,转换周期(TCONV)内推荐的最低时钟速率为 105 kHz,最快不能超过 1.2 MHz。如果不能满足此条件,就可能会使转换的线性误差超过规定值。

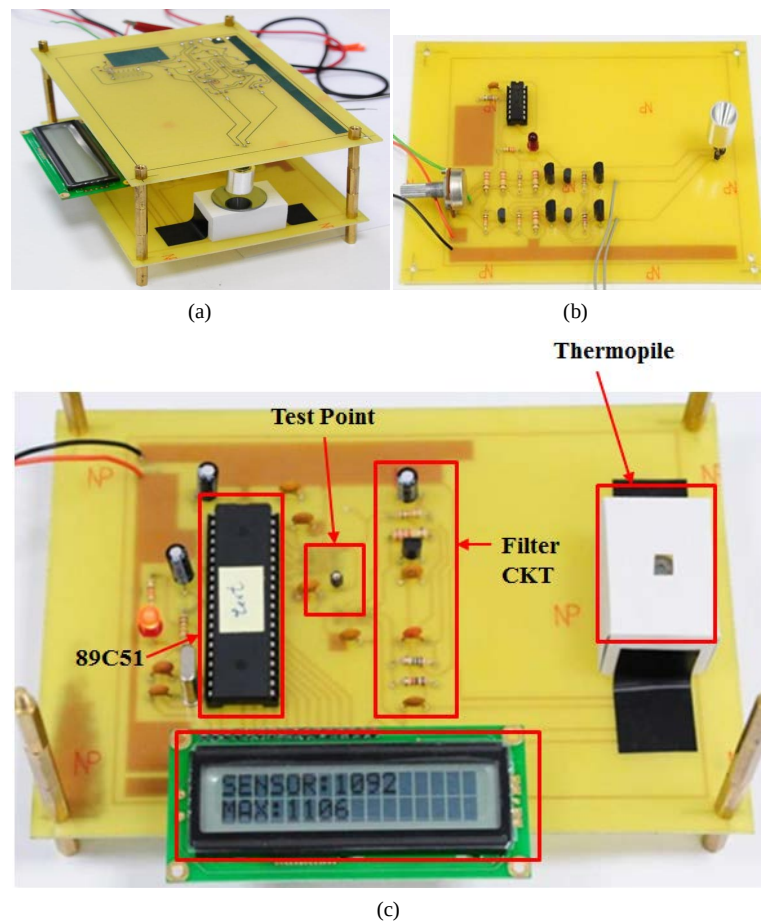
### 4) 单芯片 89C51 处理器

单芯片微电脑(single chip microcomputer)主要用于控制方面,所以亦被称为微控制器(microcontroller)。单芯片 89C51 内部含有 8 位 CPU、内存、I/O、串行传输接口、16 位的计时/计数器,且使用单芯片 89C51 有下列几项好处:体积小、接线简单、价格低廉。在本系统中单芯片 89C51 主要用来控制 ADC 输入 channel 选择位、LCD 显示数值,处理接受的数据。

### 5) 红外线检测装置实体

图 12(a)所示为系统实体图。包括了 IR Source 发射端、IR Source 脉冲电路设计、Thermopile 接收端、前置放大电路、ADC 模拟数字转换器、89C51 讯号处理单元、LCD 显示接口。图 12(b)及图 12(c)分别为

IR Source 脉冲电路与 Thermopile 量测电路。



**Figure 12.** (a) System hardware diagram; (b) IR Source pulse circuit; (c) Thermopile measurement circuit

**图 12.** (a)系统硬品图; (b) IR Source 脉冲电路; (c) Thermopile 量测电路

#### 4. 实验方法与结果

本实验所使用组件与装置详述如下：

1) 测试物品：红外镜组焦距 19 mm，其光圈  $f/1.1$ ，光学材料为黑钻石硫属化物玻璃(Black Diamond™ chalcogenide glass)，其光学特性如表 2 所列。黑钻石硫属化物玻璃如 AMTIR-1, IG6, BD2, GASIR-1 及 GE 等其穿透率光谱范围  $0.7\sim 20.0\ \mu\text{m}$  如图 13 所示[7]。图 14 所示为红外线镜组外观图。

2) 精密镜片夹具：要求垂直度与平行度。

3) 红外光学系统穿透率量测系统。

4) 实验方法

量测步骤如下：

a. 确认红外光学系统穿透率量测系统在最佳运作状况。

b. Alignment 红外准直光束与 Thermopile 在同一水平面及同一光轴，使 Thermopile 输出信号最大。

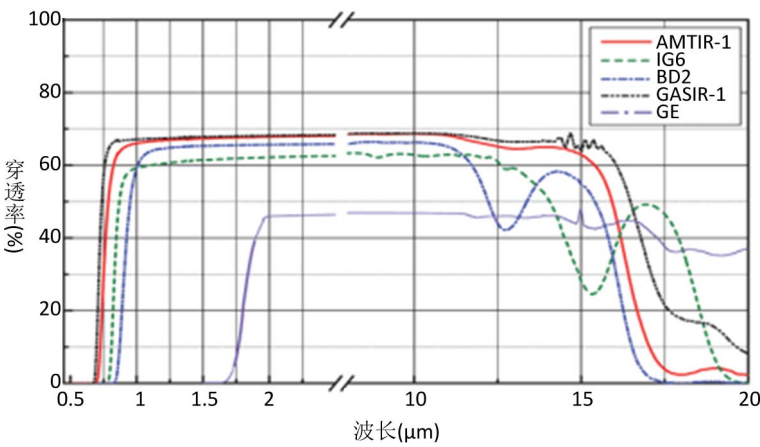
c. 将红外镜组置于红外光学系统穿透率量测系统装置中。

d. 调整红外镜组垂直于远红外准直光束，平移 Thermopile，使 Thermopile 接受到穿透信号最大。确

认 Thermopile 接受到最大信号之后，进行穿透率量测。

e. 改变红外光源强弱，量取不同穿透信号。

f. 进行红外镜组穿透率分析。



**Figure 13.** Transmittance spectrum of the chalcogenide glass  
**图 13.** 硫属化物玻璃穿透率光谱[7]

**Table 2.** Optical characteristics of infrared lens  
**表 2.** 红外镜组光学特性

|                          |                                |
|--------------------------|--------------------------------|
| Focal Length             | 19 mm                          |
| f/#                      | 1.1                            |
| Back Focal Length        | 14.1 mm                        |
| Diagonal FOV             | 30° (maximum)                  |
| Diagonal Image Size      | 10 mm (maximum)                |
| Transmission             | ~90% (average)                 |
| Glass Material           | BD-2                           |
| Focus                    | Fixed Focus, Manually Adjusted |
| Focus Range              | 0.5 m to Infinity              |
| Environmental Properties |                                |
| Operating Temperature    | -40°C to +85°C                 |



**Figure 14.** Infrared lens  
**图 14.** 红外线镜组

5) 红外镜组穿透率(T)的量测结果

穿透率测试值为电压经转换为光强度，再计算穿透率值。同一镜组重复测试 36 次，表 3 所列为红外镜组 36 次，每次穿透率量测数据，平均值 0.897，标准偏差 0.006123。图 15 所示为测试值统计图，测试值与原厂数据 90%相当一致。在做这个测试之前，先使用三片分别为高、中及低穿透率(T)的红外线平板对系统做校正。

Table 3. Test data of transmittance  
表 3. 穿透率(T)量测数据

| 次数 | 穿透率   | 次数 | 穿透率   | 次数 | 穿透率   | 次数 | 穿透率   | 次数 | 穿透率   | 次数 | 穿透率   | 备注                     |
|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|------------------------|
| 1  | 0.890 | 7  | 0.892 | 13 | 0.899 | 19 | 0.893 | 25 | 0.901 | 31 | 0.890 | 原始数据约<br>90% (average) |
| 2  | 0.895 | 8  | 0.899 | 14 | 0.895 | 20 | 0.898 | 26 | 0.895 | 32 | 0.889 |                        |
| 3  | 0.901 | 9  | 0.903 | 15 | 0.905 | 21 | 0.901 | 27 | 0.901 | 33 | 0.905 |                        |
| 4  | 0.903 | 10 | 0.913 | 16 | 0.901 | 22 | 0.903 | 28 | 0.905 | 34 | 0.913 |                        |
| 5  | 0.897 | 11 | 0.891 | 17 | 0.890 | 23 | 0.897 | 29 | 0.893 | 35 | 0.893 |                        |
| 6  | 0.894 | 12 | 0.898 | 18 | 0.892 | 24 | 0.894 | 30 | 0.896 | 36 | 0.890 |                        |

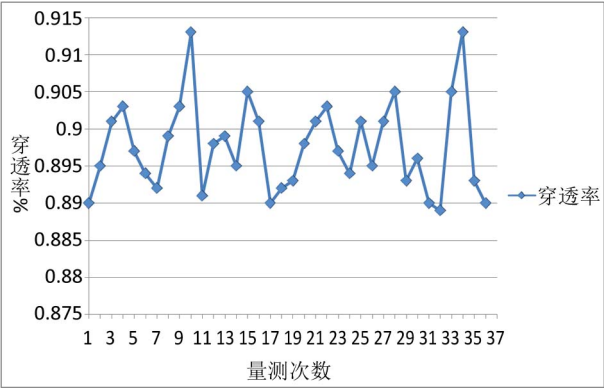


Figure 15. Statistical curve of test data  
图 15. 测试值统计曲线

5. 结论

本研究利用红外感测组件(Thermopile sensor)与红外准直光束光源进行红外线镜组穿透率的量测。使用组件包括：红外准直光束光源、热电堆检知器(Thermopile)、OP 放大器与 A/D IC 及微处理器等。热电堆将热辐射转换成电子信号，此电子信号再被 OP 放大器放大，模拟电压信号经 A/D IC 转换成数字再经 8051 微处理器处理结果由 LCD 显示器显示。本装置使用远红外准直光束大小 2 mm，蓝宝石光学平板 1 mm，穿透率量测重复性精度可达 5%。表 4 所列为本方法与 FTIR 光谱仪检测法的优缺点比较。

Table 4. Comparison of this method with FTIR spectrometer detection  
表 4. 本方法与 FTIR 光谱仪检测法比较

| 项目  | 本方法                                                    | FTIR                                                                       |
|-----|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 原理  | 比尔 - 兰伯特定律(Beer-Lambert law)                           | 干涉与傅立叶变换                                                                   |
| 优缺点 | 1. 仪器便宜，维护成本低，体积小<br>2. 操作简单，携带方便<br>3. 只能量测红外线波段范围平均值 | 1. 仪器昂贵，维护成本高，体积大<br>2. 操作复杂，不方便携带<br>3. 可以量测红外线波段范围每一波长穿透率大小<br>[即穿透率光谱图] |

## 参考文献

- [1] Hecht, E. (2016) Optics. 5th Edition, Addison-Wesley Longman, Inc., Reading.
- [2] Smith, W.J. (1992) Modern Lens Design. McGraw Hill, New York.
- [3] Index of /wp-content/uploads/Linear/IRSources. <https://www.boselec.com/wp-content/uploads/Linear/IRSources>
- [4] PerkinElmer Optoelectronics, Inc. (2003) “TPS 334—Thermopile Detector” Datasheet.
- [5] Wolfe, W.L., Kruse, P.W. and Bass, I.M. (1995) “Thermal detectors” in Handbook of Optics. McGraw-Hill, New York.
- [6] [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e07\\_handbook\\_Thermal\\_detectors](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e07_handbook_Thermal_detectors), Chp. 7, pp. 3-7.
- [7] Nam, M., Washer, J. and Oh, J. (2015) Breaking the Mold: Overcoming Manufacturing Challenges of Chalcogenide Glass Optics. [https://www.photonics.com/Articles/Breaking\\_the\\_Mold\\_Overcoming\\_Manufacturing/a57309](https://www.photonics.com/Articles/Breaking_the_Mold_Overcoming_Manufacturing/a57309)