

## 薄膜红外探测器的研究

魏红振 李家容

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 介绍了薄膜热电偶探测器的研究, 讨论了薄膜热电偶探测器的结构对探测器响应特性的影响。

关键词: 薄膜 探测器 测辐射热计

### Research of thin film infrared detector

Wei Hongzhen, Li Jiarong

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** The thermal couples are useful detector in laser power or energy measurement or other areas. Now, we developed a novel thin film thermal couple detector deposited on high thermal conductive substrate. This paper described the manufacture parameters and the effects of construction on the response index, response time and noise of the thin film thermal couple detector.

**Key words:** thin film detector bolometer

### 引 言

热电偶探测器的应用已经非常广泛, 如铂-铑热电探测器作为温度传感器已广为应用, 远红外激光功率检测探头也多为热电偶探头, 如铜-康铜热电偶探头。热电探测器通常有两种形式: 块材料结构型和薄膜型。常用的远红外激光功率探测器热电偶由两种块材料构成, 这种探头可探测的激光功率大, 损伤阈值高, 但这种探测器响应时间长, 且制作工艺复杂。而薄膜型热电偶探测器多用于远红外辐射探测, 这种探测器响应快且损伤阈值较小, 但响应度较低。我们对用作激光功率计的薄膜型热电偶探测器作了研究, 讨论了探测器结构对探头的响应特性的影响, 探头的响应时间为毫秒量级。

薄膜热电偶红外探测器的研究早有报道<sup>[1]</sup>, Day Gaddy 和 Iversen 报道了他们的薄膜红外测辐射计, 在室温下工作, 响应时间为纳秒量级。他们的探测器是在 BeO 衬底上蒸镀薄膜热电偶 Bi-Ag, 响应时间为 30ns, 但探测器的灵敏度很低。Billings, Hyde 和 Barr 报道了在塑料上蒸镀金属薄膜的实验研究, 他们的探测器灵敏度较高, 响应时间达毫秒量级, B. Contreras 和

6 Bernhard R, Tajima T, Hojo H. Phys Rev Lett, 1997; (78): 3310~ 3313

7 Lindman E L, Strosio M A. Nucl Fusion, 1977; 3(3): 619~ 627

8 Ride S K, Colson W B. Appl Phys, 1979; 20(1): 41~ 46

作者简介: 陈建芳, 女, 1973 年 4 月出生。硕士。现从事光波技术研究。

收稿日期: 1998-01-05

O. L. Gaddy 报道了在 BeO 衬底上镀 Ag-Bi 热电偶和在 Si 衬底上镀 SiO<sub>2</sub> 膜, Ag-Bi 热电偶膜及 Si 衬底上镀 SiO<sub>2</sub> 膜、Ag-Ni 膜的研究, 获得了纳秒量级的响应时间和较高的响应度。

我们报道了在 Al 上氧化 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷薄膜, 再在其上蒸镀 Ag-Bi 热电偶膜的热电偶探测器的研究, 相对于块结构热电探测器, 制作工艺简单。探测器具有毫秒量级的响应速度, 灵敏度较高。

### 1 理论及实验研究

热电偶的基本原理是基于两种不同材料的温差电效应。金属或半导体中的电子除了具有电荷之外, 还具有热能量, 外加适当的电场梯度, 使电荷产生正的或负的温度梯度, 这样, 能量就可以从体内转移, 同样, 外加温度梯度也可以使电荷沿着各电极的电场梯度转移, 因此, 当两种不同的材料(金属或半导体)连接成一个闭合回路, 并使一个结点的温度  $T$  高于另一个结点的温度  $T_0$  时, 则闭合回路中有电流流过, 这就是温差电效应, 温差电动势包括两种材料的接触点的接触电动势, 同种导体两端因温度不同而产生的温差电动势。对于图 1 所示的热电偶, 回路总的温差电动势可表示为<sup>[2]</sup>:

$$\varepsilon_{12} \Big|_{T_0}^T = \int_{T_0}^T \alpha_{12} dT = \Pi_{12}(T) - \Pi_{12}(T_0) + \int_{T_0}^T \tau_{11} dT - \int_{T_0}^T \tau_{22} dT$$

式中,  $\Pi_{12}(T)$ ,  $\Pi_{12}(T_0)$  分别为 A, B 处的珀耳帕系数,  $\tau_{11}$ ,  $\tau_{22}$  为两种材料的汤姆逊系数, 由上式可知, 两种材料一定时, 总热电势为温度  $T$  和  $T_0$  的函数差, 即  $\varepsilon_{12}(T, T_0) = f(T) - f(T_0)$

实际回路中, 珀耳帕效应起主导作用, 即:

$$\varepsilon_{12}(T, T_0) = \Pi_{12}(T) - \Pi_{12}(T_0) = T\alpha_{12} - T_0\alpha_{12} = \alpha_{12}\Delta T$$

当热电偶串联成热电堆时, 热电势依次叠加, 则有:

$$V_{out} = \sum_{i=1}^m \varepsilon_{12}(T, T_0) = \sum_{i=1}^m \Pi_{12}(T) - \sum_{i=1}^m \Pi_{12}(T_0) = m\alpha_{12}\Delta T$$

即输出电压为温差的线性函数。

设热电偶冷端温度恒定, 热端入射的辐射功率为  $P = P_0 \exp(j\omega t)$ , 吸收系数为  $\alpha$ , 则吸收的辐射功率为  $\alpha P_0 \exp(j\omega t)$ ,  $H$  为热容,  $K$  为热导,  $\Delta T$  为温差, 温差电流为  $I$ , 如图 2 所示, 则热回路方程为:  $H \frac{d\Delta T}{dt} = \alpha P - K \Delta T - \alpha_{12} I T$

考虑初始条件  $\Delta T|_{t=0} = 0$ , 则有:

$$\Delta T = \frac{\alpha P_0 \exp(j\omega t)}{K + (\alpha_{12}^2 T)/(R_0 + r) + j\omega H}$$

式中,  $r$  为热偶电阻,  $R_0$  为负载电阻。交流响应度为:

$$R_{AC} = |IR_0/P| = \alpha_{12} R_0 / (R_0 + r) \cdot \alpha / [K^* (1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}],$$

$\tau = H/K^* = H/[K + \alpha_{12}^2 T/(R_0 + r)]$  为热电偶的响应时间常数。

当  $R_0 \rightarrow \infty$  时, 热电偶处于开路状态,  $K^* = K$ , 交流响应度为:  $R_{AC} = \alpha_{12} \alpha / (K^2 + \omega^2 H^2)^{1/2}$ , 时间常数为:  $\tau = H/K$ , 当  $R_0 \rightarrow \infty, \omega \rightarrow 0$  时, 则  $R_{dc} = \alpha_{12} \alpha \tau / H$

对于由  $N$  个热电偶组成的热导堆, 其中每个热电偶的电阻为  $r$ , 负载阻抗为  $Z$ , 则整个热

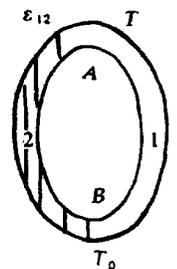


Fig. 1 Thermocouple

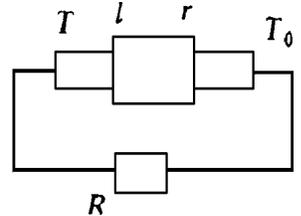


Fig. 2 Circuit of thermocouple

电堆的响应度和响应时间为  $R = \alpha_{12} Z \alpha / [(Z + Nr) K^* (1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}]$ ,  $\tau = H / K^*$

式中,  $K^* = K + \alpha_{12}^2 T / (Z / N + r)$

上式说明, 增大串联热电偶的数目  $N$ , 可以提高响应速度, 但降低了响应度, 同时热电堆的内阻增加, 等效噪声功率也会增加。因此, 热电偶堆的结构参数对探测器的响应特性有很重要的影响。

对于薄膜型红外探测器, 文献[3]阐述了薄膜热电偶堆结构参数对探测器响应特性的影响, 如图3所示。图中有四对串联的热电偶, 灵敏面积  $A = H_s \times W_s$ , 蒸发的有效材料宽度为  $w$ , 标称厚度为  $t$ , 假设: (1) 从灵敏面损耗的大部分能量是通过电偶臂损耗的, 就是说辐射热损耗不大; (2) 通过基片或向周围气体的传导损耗可以忽略; (3) 在灵敏区  $W_s$  上的温度平衡时间比器件的时间常数  $\tau_d$  小, 则有:

响应度:  $R \propto l / W_{st}$  (1)

阻抗:  $Z \propto (l / W_{st}) N_h$

时间常数:  $\tau \propto \frac{l}{W_{st}} \cdot \frac{A}{N_h} = \frac{l}{W_{st}} \cdot \frac{H_s W_s}{N_h} = \frac{l H_s}{t N_h}$  (2)

式中,  $N_h$  是热结数,  $A$  是灵敏面积。

由上可知, 热电偶堆的密度越大, 响应时间越短, 整个热堆产生的热电动势  $V_{out}$  越大, 同时, 每个热堆偶的响应度会下降, 而热堆偶阻抗  $Z$  的增加会导致热噪声电压  $(4kT_r \Delta f)^{1/2}$  的增加, 因而热导堆的等效噪声功率会相应的增加。

我们研究的薄膜红外探测器采用真空蒸镀技术, 将多对 Bi 和 Ag 组成的热导堆蒸镀在圆片状铝箔表面, 铝箔表面经过阳极化处理形成一层  $Al_2O_3$  陶瓷层, 阳极化的 Al 生成  $Al_2O_3$  后, 对 10.6  $\mu m$  的光的吸收高达 95% 以上, 同时具有极高的熔点 ( $T_m = 2300^\circ C$ ), 能承受较大的入射功率, 其致密的组织甚至能在  $Al_2O_3$  下层的铝被溶化以后仍能包裹液态的铝, 使表面不至于破坏严重。在用于激光功率检测时, 承受入射激光的接受面为没有蒸镀热偶堆的表面, 这样, 由于  $Al_2O_3$  的高熔点, 使得接收面能承受较大的入射功率, 因为 Bi 的熔点较低 (为  $272^\circ C$ ), 因此, 探头能承受的功率主要由 Bi 的熔点来决定, 薄膜红外探测器的结构如图4所示。基片为铝箔经过阳极化处理, 在表面形成一层  $Al_2O_3$  陶瓷层, 两种热电偶材料分别为 Ag 和 Bi, 利用真空蒸镀技术蒸镀上去, 基片为圆盘片, 热电偶呈放射状均匀分布, 如图4c所示, 热电偶的臂宽  $w$  为 0.1mm 或 0.2mm, 每个热偶的有效敏面为  $w \times w$ , 热偶堆热电偶灵敏度长度为  $H_s = 2\pi r$ , 热偶数分别为 10 对和 30 对, 热偶臂长分别为 30mm, 20mm, 40mm,  $r$  分别取 10mm, 20mm。对于臂长  $l = 30mm$ , 热偶结数分别为 10 对和 30 对, 热探头内阻分别为  $42\Omega$  和  $99\Omega$ , 每个热电偶内阻为  $3\Omega \sim 4\Omega$ 。探头的电极用导电环氧树脂粘接引出。

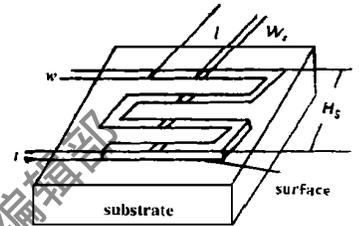


Fig. 3 Structure of thin film thermopile

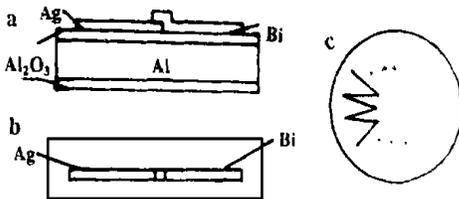


Fig. 4 Structure of thin film detector

1.1 响应度

响应度的测量使用连续 CO<sub>2</sub> 激光器, 因此, 测量的是探测器的直流响应度, 使用 SYNRAD 公司的 SYNRAD SY5200 激光功率计测量功率, 其测量误差不超过 ±10%, 实际测量结果为:

对于  $w = 0.2\text{mm}$ ,  $l = 30\text{mm}$ , 当  $N_h = 10$  时,  $R = 2.5 \times 10^{-4}\text{V/W}$ , 当  $N_h = 30$  时,  $R = 0.68 \times 10^{-4}\text{V/W}$ , 对于  $l = 30\text{mm}$ ,  $N_h = 30$  时, 当  $w = 0.1\text{mm}$ ,  $R = 1.2 \times 10^{-4}\text{V/W}$ , 当  $w = 0.2\text{mm}$ ,  $R = 0.68 \times 10^{-4}\text{V/W}$ , 对于  $N_h = 30$ ,  $w = 0.2\text{mm}$  时, 当  $l = 30$ ,  $R = 0.68 \times 10^{-4}\text{V/W}$ , 而当  $l = 20\text{mm}$ ,  $R < 1 \times 10^{-5}\text{V/W}$ , 实验结果说明, 热电偶堆响应度随热电偶结数增加而下降, 与热偶臂长度成正比, 且随热敏面宽度的增加而减小。

我们测量响应度时, 热电偶并不直接吸收激光辐射能量, 激光能量通过没有蒸镀热电偶的一面而吸收, 因此, 热电偶堆所感应的是由于基片吸收激光所引起的温差, 因此, 当热电偶臂长时, 热电偶冷端与热端的温差越大, 因而响应度越大。上述实验结果符合 (1) 式和 (2) 式的分析结果。

## 1.2 响应时间

响应时间的测量采用连续  $\text{CO}_2$  激光, 输出激光经过一定频率的调制, 照射在薄膜热电偶探测器上, 薄膜热电偶探头输出到示波器上, 捕捉热脉冲, 根据捕捉的脉冲波形, 10%~90% 的上升时间为 60ms, 下降时间为 80ms, 对所研究的几种探测器, 结构参数的改变对响应时间的影响不大, 造成原因可能是因为我们们对结构参数的改变特别是电偶密度的改变不大, 不足以对响应时间产生较大的影响。热电偶堆采用真空镀制技术镀制, 而镀制掩膜板是通过电化学腐蚀而制成的, 因而掩膜板条缝间距不能太小, 否则影响电偶密度, 而且条缝密度太高, 真空镀制也不能满足其精度要求, 这影响了我们进一步的研究。

## 1.3 噪声

热电偶的热噪声电压为  $(4KT_r\Delta_f)^{1/2}$ , 实际测量波形中,  $N_h$  越大, 噪声电压越大。对于我们所研究的薄膜热电偶探测器, 电极的粘接很重要, 电极粘接的接触电阻产生的热噪声有时会比内阻产生的热噪声更大, 甚至大到淹没了热电偶的输出信号, 因此, 电极的连接是很重要的。

## 2 结 论

对于薄膜型热电偶探测器作了理论和实验研究, 讨论了探测器的结构对探测器的响应特性的影响, 研制了具有较高的响应度和毫秒量级响应时间的薄膜型热电偶堆探测器。

### 参 考 文 献

- 1 Contreras B, Gaddy O L. A P L, 1970; 17(10): 450
- 2 王义玉编. 红外探测器. 北京: 兵器工业出版社, 1993: 147
- 3 威拉德森 P K, 比尔 A C 著, 《激光与红外》编译组译. 红外探测器. 北京: 国防工业出版社, 1973: 290

作者简介: 魏红振, 男, 1969 年出生。硕士研究生。主要从事光学薄膜和激光技术的研究工作。

收稿日期: 1998-01-19