

人工生物反应器温度传感器的选择与试验

国培光

(农机系)

摘 要

硅PN结是一种新型的可用于多种温度场检测的敏感元件。本文根据PN结的基本理论,讨论了在正向注入下,电压与温度的关系,推导出其直线拟合方程,分析了误差,证明和试验结果是吻合的。因而,选用硅PN结作为人工生物反应器的温度检测元件是适宜的。

关键词: 生物环境; 硅PN结; 温度感受元件

人工气候室(箱)以及其它人工生物反应器可准确地确定某一环境因子对生物生长发育的影响,是生物工程的重要研究工具和生产工具。由于温度(主要指气温)与生物生长发育的关系甚为密切,因而,在人工气候室以及各种人工生物反应器中对温度参数的检控显得尤为重要。温度传感器是检控温度的关键部件,其类型很多,本文介绍适用于人工生物反应器温度传感器的选择及其有关数据的分析。

1 温度传感器类型的选择

人工生物反应器的温度场检控系统与常规的温度测试仪的工作状态有如下不同:

①通常常规测温系统要在较宽的温度范围内保持一定的测试精度,而人工生物反应器则相反,它所要求检测的温度区域比较窄(如植物的生命温度范围仅为 $-10^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ ^[1-2]),但检测和控制精度却较高($<\pm 1\sim 5^{\circ}\text{C}$)。

②常规测试仪大多是采用定时测量,无法对温度场的动态变化进行连续检控,而人工生物反应器则需要连续对温度检控。

由此可见,用于检控人工生物反应器的温度传感器的检测精确度等级应达1%~2%。同时还要求其时间常数 τ 很小,即要求反应速度快。

目前国内市场上供应的可供作为人工生物反应器温度检控的敏感元件主要有以下几类^[3-5]:

(1)热电阻传感器:这类传感器是利用各种纯金属或合金的体电阻随温度变化的特性制

本文于1987年11月4日收到。

成,如常用的铂、铜、镍热电阻。

(2) 半导体热敏电阻:如利用 $\text{CuO}+\text{MnO}_2$; $\text{MgO}+\text{TiO}_2$; TiO_2+CuO ; $\text{NiO}+\text{Mn}_2\text{O}_3$ + Cu_2O_3 等半导体材料所制成的热敏电阻,其特点是具有负的温度系数,电阻值与温度成指数关系,线性化和互换性差,但价格低廉。

(3) PN结温度敏感元件:利用PN结的正向压降的温度特性实现对温度的检测。由于其体积小,线性度高,时间常数小($<10\text{s}$)以及价格低廉等,已开始被用于许多低温检测系统。

经对上述几种温度敏感元件在性能、价格、货源等方面综合对比,认为硅PN结温度敏感元件适合于作为人工生物反应器温度场的检测,因而选用了北京半导体器件六厂生产的BTS₃₁型柱硅PN结温度传感器,其外形尺寸为 $\phi 4\times 70(\text{mm})$,主要参数如下:

温度范围: $-100\sim +150^\circ\text{C}$; 灵敏度: $>-2\text{mV}/^\circ\text{C}$;

响应时间: $0.2\sim 2\text{s}$; 互换精度: $\pm 0.5^\circ\text{C}$;

线性度: $<0.4\%$ (在 $+100^\circ\text{C}$ 以内); 内阻 $<400\Omega$;

功耗: $<100\mu\text{W}$

2 PN结温度传感器的测温原理

当PN结加有正向电压时,有两股电流从P区流向N区,构成PN结的正向电流。一是由N区注入到P区的电子电流,其密度为^[6]:

$$j_n = n_p \left(\exp \frac{q \cdot U_F}{KT} - 1 \right) \cdot (D_n / L_n) \cdot q = q \cdot \frac{D_n \cdot n_p}{L_n} \cdot \left(\exp \frac{q U_F}{KT} - 1 \right) \quad (1)$$

其二是从P区注入到N区的空穴电流,其密度为:

$$j_p = q \cdot \frac{P_n \cdot D_p}{L_p} \cdot \left(\exp \frac{q \cdot U_F}{KT} - 1 \right) \quad (2)$$

将(1)、(2)两式相加,便为PN结受正向电压时注入结的电流密度,即

$$j = q \cdot \left(\frac{n_p \cdot D_n}{L_n} + \frac{P_n \cdot D_p}{L_p} \right) \cdot \left(\exp \frac{q \cdot U_F}{KT} - 1 \right) \quad (3)$$

令 $q \cdot \left(\frac{n_p \cdot D_n}{L_n} + \frac{P_n \cdot D_p}{L_p} \right) = j_s$, 称为PN结的反向饱和电流密度。若PN结的结面积为 S ,则由P区注入到N区的正向电流为:

$$I = j_s \cdot S \cdot \left(\exp \frac{q U_F}{KT} - 1 \right) = I_s \cdot \left(\exp \frac{q U_F}{KT} - 1 \right) \quad (4)$$

由于在室温下(300K), $\frac{KT}{q} \approx 0.026\text{伏}$, 及PN结在正向注入时 U_F 仅零点几伏,所

以, $\exp \frac{q U_F}{KT} \gg 1$, 这样(4)式中的“-1”项可以忽略,从而引出近似公式:

$$I \approx I_s \cdot \exp \frac{qU_r}{KT} \quad (5)$$

及

$$U_r \approx \frac{KT}{q} \cdot \ln \frac{I}{I_s} \quad (6)$$

令 $\frac{K}{q} = P$, 则

$$U_r \approx PT \ln \frac{I}{I_s} \quad (\text{伏}) \quad (7)$$

(1) ~ (7) 式中: n_p , P_s ——为PN结在平衡状态下P区边界的电子浓度; N区边界的空穴浓度 ($1/\text{cm}^3$);

D_p, D_n ——分别为空穴和电子的扩散系数 (cm^2/s);

L_p, L_n ——分别为扩散到N区和P区的非平衡载流子的平均深度 (即扩散长度, cm);

e ——电子电荷量 ($\approx 1.6 \times 10^{-19}$ 库);

K ——波尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} 焦耳/K);

U_r ——PN结的正向电压 (伏)。

由 (7) 式知, 对于给定的元件, 若取 I 为定值, 则PN结的正向电压 (降) U_r 与温度 T 近似成线性关系。因而, 可根据 U_r 值检测出PN结所处环境的温度值。

3 试验与数据分析

将BTS和分度值分别为 0.1°C 和 1°C 的两只水银玻璃液体棒式温度计置于装有冰水混合液的容器内 (BTS和温度计相距 $< 1\text{cm}$), 该容器又置于底部可加温的铁桶内。BTS经引线 with 供电恒流源相接, 并用DT-830数字万用表的直流电流档监视恒流源的输出电流, 用另一只DT-880数字万用表的直流电压档测取BTS两端的电压降 (正向), 由温度计测取BTS所感受的温度值。测试结果如附图1, 2所示。

现以1号元件所测数据, 利用回归分析中的最小二乘法, 讨论其拟合直线方程的建立。计算如表1所示^[7]。

表1 1号元件 U_r - T 实测数据处理

测试 i	温度 T_i ($^\circ\text{C}$)	电压降 U_{r_i} (伏)	T_i^2	$T_i U_{r_i}$	$U_{r_i}^2$	$U = a + bT_i$	$\Delta i^2 = (U_{r_i} - U)^2$
1	5	0.703	25	3.515	0.494209	0.700764	4.9×10^{-6}
2	10	0.687	100	6.870	0.471969	0.690528	12.4×10^{-6}
3	15	0.681	225	10.215	0.463761	0.680292	0.5×10^{-6}
4	20	0.669	400	13.380	0.447561	0.670056	1.1×10^{-6}
5	25	0.660	625	16.500	0.435600	0.659820	0.03×10^{-6}
6	30	0.651	900	19.530	0.423801	0.649584	2×10^{-6}
7	35	0.640	1225	22.400	0.409600	0.639346	4.4×10^{-6}
8	40	0.630	1600	25.200	0.396900	0.629112	0.7×10^{-6}
9	45	0.618	2025	27.810	0.381924	0.618876	0.7×10^{-6}
10	50	0.608	2500	30.400	0.369664	0.608640	0.4×10^{-6}
Σ	275	6.547	9625	175.820	4.294989		27.13×10^{-6}

所以

$$\Delta = n \cdot \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2 = 20625$$

$$a = \frac{\sum T_i^2 \cdot \sum U_{r,i} - \sum T_i \cdot \sum T_i \cdot U_{r,i}}{\Delta} = 0.711 \text{ 伏}$$

$$b = \frac{n \cdot \sum T_i \cdot U_{r,i} - \sum T_i \cdot \sum U_{r,i}}{\Delta} = -2.0472 \text{ 毫伏}$$

由此可知, BTS的正向电压降与温度关系的拟合直线方程为:

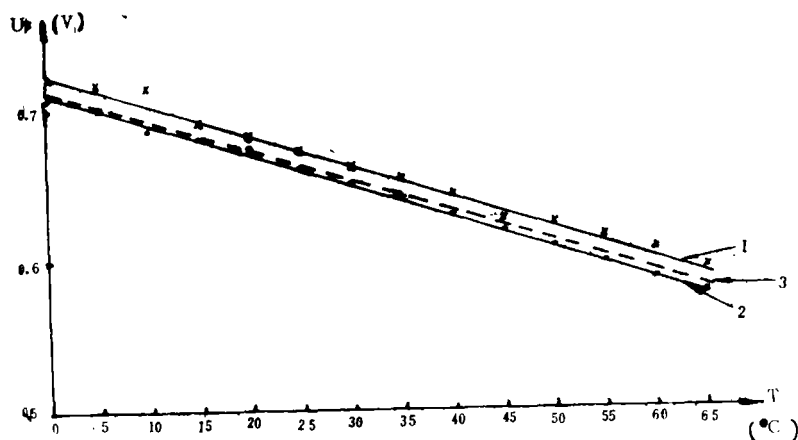
$$\begin{aligned} U &= a + bT_i \\ &= 0.711 - 0.0020472 \cdot T_i \text{ (伏)} \end{aligned} \quad (8)$$

拟合直线的平均误差可用均方根差 σ 衡量,

$$\text{即} \quad S^2 = \frac{1}{n-2} \sum (\Delta i^2) \doteq 3.39 \times 10^{-6}$$

$$\therefore \sigma \doteq \sqrt{S^2} = 1.84 \times 10^{-3} \text{ (伏)} \quad (9)$$

由(9)式知, 拟合直线在5~50℃范围内与观测值的最大误差不超过千分之二, 足以证明所建立的拟合直线方程能如实地反映BTS的动态规律和BTS的 U_r - T 关系可以视作线性, 其非线性误差在工程应用范围以内。



附图 BTS 的 U_r - T 实测特性及其拟合直线

1, 2—实测数值; 3—拟合直线

表2 U_r 的计算值与实测值对比

温度 (°C)	I_s (μA)	U_r (V)	
		计算值	实测值
10	5.865	0.692	0.687
20	7.057	0.672	0.669
30	8.090	0.657	0.651
40	9.310	0.647	0.630
50	10.170	0.617	0.608
60	10.500	0.592	0.585

尚可利用 $U_r = PT \ln \frac{I}{I_s}$ 关系, 计算不

同温度下的正向电压值。但由于

$$I_s = q \cdot s \cdot \left(\frac{n_p \cdot D_n}{L_n} + \frac{p_n \cdot D_p}{L_p} \right),$$

式中 D_n, D_p, L_n, L_p 均与温度有关, 即 I_s 是温度的函数, 而厂家难以准确提供上述数据, 故采用实测的方法, 先测出不同温度下BTS的 I_s 值, 然后利用上述关系求出 U_r 值, 并与

实测的值相比较,确定其误差。表2为1号元件在10~60℃范围内 U_F 的计算值与实测值的对比。

可见,利用不同温度下实测的 I_S 值代入 $U_F = PT \ln \frac{I}{I_S}$ (取 $I = 100 \mu A$), 所得的值均略大于实测值,其最大差值为0.017伏,最大相对误差为2.69%,这也证明BTS的 U_F - T 特性在理论和实践上是一致的。虽然器件的离散性较大,不同器件所测的值与表2不尽一致,但均具有同向偏差,其最大相对误差也在 $\pm 3\%$ 以内,故完全能保证和满足使用要求。

4 结 论

4.1 BTS的 U_F - T 直线拟合方程为:

$$U_F = 0.711 - 0.0020472 \cdot T \quad (\text{伏})$$

4.2 BTS的正向压降理论计算值与实测值最大相对误差 $< 3\%$ 。

4.3 BTS的 U_F - T 线与拟合直线的最大偏差和满程($T = 60^\circ C$)输出之比,即 U_F - T 的线性度为:

$$\delta_L = \frac{\Delta m}{U_{FS}} \times 100 = \frac{0.003168}{0.585} \times 100 = 0.5\%$$

因 δ_L 很小,使用时可省去非线性化处理环节。

可见,选用硅PN结温度敏感元件作为人工生物反应器的温度检测元件是适宜的。

参 考 文 献

- 1 北京农业大学主编.农业气象.农业出版社,1980: 43~46
- 2 [日] 户刈义次主编,薛德禧译.作物的光合作用与物质生产.科学出版社,1979: 73~82
- 3 严钟豪,谭祖根主编.非电量电测技术.机械工业出版社,1983: 85~88
- 4 常健生编.检测与转换技术.机械工业出版社,1981: 53~61
- 5 陈守仁主编.工程检测技术(下).中央广播电视大学出版社,1984: 287~294
- 6 黄昆,韩汝琦著.半导体物理基础.科学出版社,1979: 115~118
- 7 P. R. 只文顿著,仇维礼等译.数据处理与误差分析.知识出版社,1986: 86~88

SELECTION AND TEST OF TEMPERATURE SENSOR OF ARTIFICIAL BIOREACTION APPARATUS

Guo Peiguang

(Department of Farm Machinery)

Abstract

The silicon PN Knot is a new type of sensory element used in the multiple temperature fields for monitoring. Based on the basic theory of PN knot, this paper discusses the relation between voltage and temperature in case of positive insertion, deduces its straight line fitting equation and analyses the errors. Also, the experiment results are proved to be in agreement with the analysis. Therefore, it is suitable to select silicon PN knot as the temperature monitoring element of artificial bioreaction apparatus.

Key words: bioenvironment; silicon PN knot; temperature sensory element