

- [3] N. W. Schubring, J. P. Nolta, R. A. Dork, *Rev. Sci. Instr.*, 35(1964), 1517.
 [4] J. K. Sinha, *J. Sci. Instr.*, 42(1965), 696.
 [5] Y. T. Tsui, P. D. Hinderaker and F. J. Mcfadden,

- Rev. Sci. Instr.*, 39(1968), 1423.
 [6] R. Miller, I. A. Black, V. N. Gray, *J. Phys. E. Sci. Instr.*, 8(1975), 749.

p-n 结正向特性测温

张开逊 王向

(第一机械工业部机械工业自动化研究所)

自从晶体管问世之后,人们就注意到了 p-n 结的温度特性,随着温度的升高, p-n 结反向电流加大,正向压降减小,它是引起晶体管电路温度漂移的主要原因。从五十年代到现在,人们一直在从器件与线路两个方面努力克服这种影响。另一方面,一切与温度有关的物理过程又都可以利用来测量温度。利用 p-n 结测温,从六十年代开始引起了人们的兴趣^[1],七十年代逐渐在一些测量控制系统中获得应用。由于它兼有热敏电阻、热电偶和铂电阻的某些优点:线性度好、灵敏度高、输出阻抗低、温度范围较宽,正在发展成为一门新的测温技术。本文将从 p-n 结中的物理过程分析这种温度传感器的原理和特点,提出传感器的设计思想。

p-n 结的许多参数都会随着温度变化,对于一定的反向电压, p-n 结反向电流随温度呈指数规律变化。如果保持正向压降不变,正向电流也随温度呈指数规律变化。这两种变化由于明显的非线性,对于仪表的校准和控制系统的调节都非常不方便,在实际上并不利用它们。然而,当正向电流不变时, p-n 结的正向压降随着温度近似线性变化。现代的 p-n 结温度传感器无例外地都利用正向压降来测量温度。

对于一个理想的 p-n 结,正向电流 I 的表达式如下^[2]:

$$I = I_0 (e^{\frac{qV}{kT}} - 1), \quad (1)$$

其中 k ——玻耳兹曼常数, T ——绝对温度, V ——正向压降, q ——电子电荷(绝对值), I_0 ——p-n 结反向饱和电流。

I_0 是温度的函数,在半导体材料杂质全部电离、在本征激发可以忽略的条件下,

$$I_0 = f(T) e^{-\frac{qV_g}{kT}} \quad [3],$$

其中 V_g 为半导体材料禁带宽度, $f(T)$ 是一个温度的缓变函数。对于普通掺杂情况, $f(T) = AT^M$, A 是一个与温度无关的常数,与 p-n 结面积和杂质浓度有关。 M 是一个与材料有关的指数。将上述各量代入(1)式,得

$$I = AT^M e^{-\frac{qV_g}{kT}} (e^{\frac{qV}{kT}} - 1).$$

当 $T = 300\text{K}$ 时, $\frac{kT}{q} \approx 26\text{mV}$, 当 $V \gg 26\text{mV}$ 时上式简化为

$$I = AT^M e^{\frac{q}{kT}(V-V_g)}. \quad (2)$$

V_g 也是一个随温度变化的量: $V_g = V_{g0} + \beta T$, 其中 V_{g0} 为绝对零度时的禁带宽, β 为禁带宽度温度系数。将 V_g 代入(2)式,则得

$$I = AT^M e^{\left[\frac{q}{kT}(V-V_{g0}) - \frac{q\beta}{k}\right]},$$

两边取对数得

$$\begin{aligned} V &= \left(\frac{k}{q} \ln \frac{I}{A} + \beta\right) T + V_{g0} - \frac{Mk}{q} T \ln T \\ &= V_1 + V_2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$V_1 = \left(\frac{k}{q} \ln \frac{I}{A} + \beta\right) T + V_{g0},$$

$$V_2 = -\frac{Mk}{q} T \ln T.$$

这就是 p-n 结正向压降作为正向电流与温度的函数表达式。当 I 为常数时(利用恒流源

提供正向电流), V_1 与 T 的关系是一条直线; V_1 的变化量与 T 的改变量成正比. p-n 结温度传感器的非线性是由 V_2 引起的, V_2 与晶体管参数和正向电流值无关, 它表示对于任何 p-n 结、任何正向电流值, 传感器从理论上讲都是具有非线性的. 现在讨论当温度变化时这个函数的值如何变化.

函数 $T \ln T$ 有两个零点, 第一个在 $T = 0$ 处, 因为

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow 0} T \ln T &= \lim_{T \rightarrow 0} \frac{\ln T}{\frac{1}{T}} = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{(\ln T)'}{\left(\frac{1}{T}\right)'} \\ &= \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{-\frac{1}{T^2}} = -\lim_{T \rightarrow 0} T = 0 \end{aligned}$$

显然, 第二个零点在 $T = 1$ 处. 其间有一个极值. 设 $T = T_m$ 时达到极值,

$$\begin{aligned} \left. \frac{d[T \ln T]}{dT} \right|_{T_m} &= 0, \text{ 则 } \ln T_m + 1 = 0, \\ T_m &= \frac{1}{e}. \end{aligned}$$

因为 $\frac{d[T \ln T]}{dT} = 1 + \ln T$, 当 $T > T_m$ 时, 它总是大于零的, 这表明函数 V_2 经过极值之后

单调变化, 而且变化率越来越大. 求出它对温度的二阶导数

$$\frac{d^2V}{dT^2} \propto \frac{d^2[T \ln T]}{dT^2} = \frac{d}{dT} [1 + \ln T] = \frac{1}{T}.$$

这说明 V_2 的变化率在温度很低时变化很大, 而随着温度的升高变化率的改变减小; 当温度足够高时, 变化率趋于一个常数, $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{d^2V}{dT^2} = 0$, 即 $T \rightarrow \infty$ 时, V_2 趋于一个线性函数.

函数 V_1, V_2 和 V 如图 1, 在低温区 V 具有明显的非线性, 而在高温区可以看作两个线性函数之和, 仍然是一个线性函数, 随着温度的升高非线性度减少.

V 中包含两个与温度有关的项, 一个是线性项, 另一个是非线性项. 对于给定的温度值, $\frac{I}{A}$ 愈小, $\ln \frac{I}{A}$ 的绝对值愈大 (因为 $\frac{I}{A} < 1$), 当 $\left| \ln \frac{I}{A} \right| \gg M \ln T$ 时, V_2 与 V_1 相比可以忽略不

计. 对于一个给定的 p-n 结, 正向电流愈小, 利用正向压降测量温度的非线性度愈小. 当正向电流足够小时, 非线性误差可以忽略不计, 这时 p-n 结可以近似看作线性温度传感器. 锗、硅和砷化镓的 p-n 实验结果见图 2.

当变更正向电流时, 同一个 p-n 结的 $V-T$ 曲线的非线性度也发生变化. 从上面的分析也可以看到, 对于同样的温度和电流, 常数 A 的数值愈大, 非线性误差愈小. 砷化镓 p-n 结、小功率硅三极管 b-c 结和中功率硅三极管 b-c 结的实验结果如图 3 和图 4. 中功率三极管 p-n 结面积比小功率三极管大, 因而常数 A 的值较大, 由实验曲线可见它的非线性度较小.

以上的分析只对 p-n 结正常工作温度才是正确的. 当温度低于或超过这个温度范围时, 必须考虑两种新的物理过程. 当温度低到半导体材料杂质电离发生困难时, 材料的体电阻率随着温度的下降急剧增大, 所测得的正向压降主要部分将是半导体材料欧姆电阻上的压降. 二极管两端的压降 V 等于材料电阻上的压降 V_R 与 p-n 结压降 V_J 之和. 在

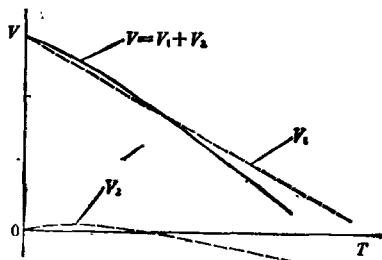


图 1 V_1, V_2 及 V 与 T 的关系曲线

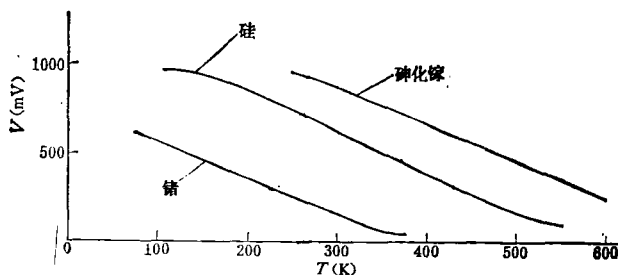


图 2 锗、硅和砷化镓的 p-n 结的 $V-T$ 曲线

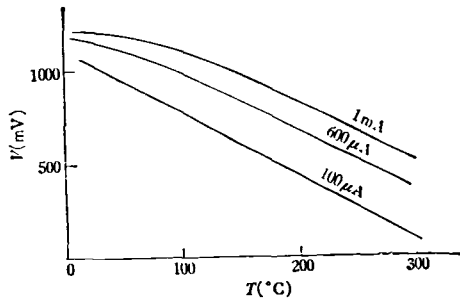


图3 砷化镓 p-n 结 V-T 曲线

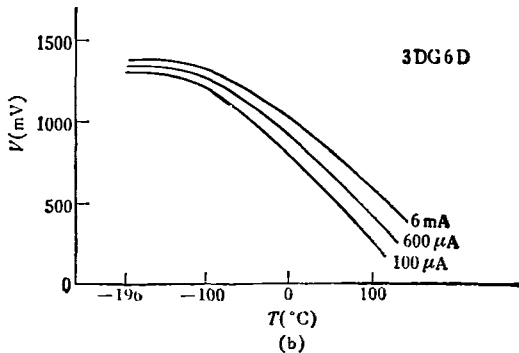
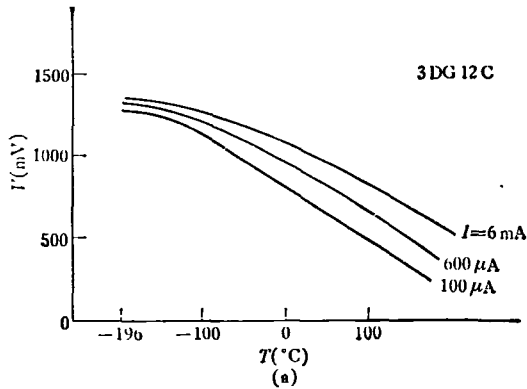


图4 (a) 中功率硅三极管 b-c 结 V-T 曲线;
(b) 小功率硅三极管 b-c 结 V-T 曲线

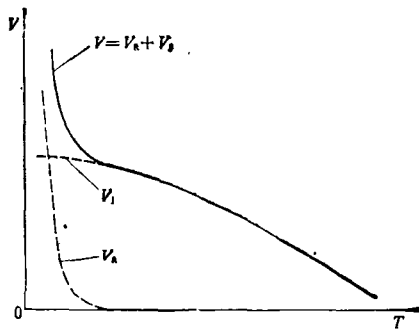


图5 理论上预言的全温度范围 V-T 曲线

低温时 $V_R \gg V_J$, 若 R 为材料电阻, $V_R = IR$, 其中 $R = Be^{\frac{CE_D}{T}}$ [4], 其中 B, C 是两个常数, E_D 为杂质能级。显然, 当温度比较高时 ($T \gg CE_D$), $R \rightarrow B$; 当 $I \rightarrow 0$ 时 $V_R \rightarrow 0$, $V \approx V_J$ 。而当 $T \rightarrow 0$ 时 $R \rightarrow \infty$, $V \approx V_R$, 所以 $V-T$ 曲线在低温区会发生突变, 突变点温度与杂质能级有关, 杂质能级愈低, 突变温度愈低。从理论上讲, 在低温区 $V-T$ 曲线应该如图 5 中所示。

锗半导体材料掺磷施主能级为 0.012eV , 硅半导体材料掺磷施主能级为 0.044eV [5], 因而锗 p-n 结 $V-T$ 曲线的突变温度比硅 p-n 结的突变温度低。L. E. Barton [1] 对锗二极管与 R. J. Soulen [6] 对硅二极管所作的实验结果很好地证实了这一点, 他们测得的突变温度分别为 12K 和 42K , 突变温度之比大体等于施主能级之比。显然, 为了改善 p-n 结温度传感器的低温性能, 应该掺浅能级杂质。

当温度升高到本征激发显著增加时, (2) 式不再成立。这时随着本征激发的增加, p-n 结正向压降随着温度的增加将变化得比较缓慢, 造成新的非线性, 锗 p-n 结的实验结果见图 6。

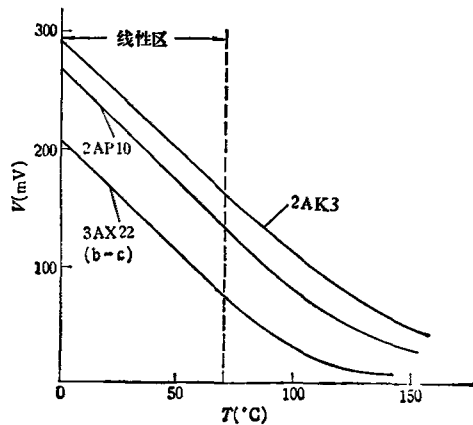


图6 Ge 二极管高温区 V-T 关系曲线

本征激发的电子浓度与玻耳兹曼因子 $e^{-\frac{qV_g}{kT}}$ 成正比 [2], 在同样的温度下, 禁带宽度愈大的半导体材料本征激发载流子浓度愈低, 因而禁带宽度大的半导体材料做成 p-n 结温度传

感器,在高温区能获得比较宽的线性范围。在300K时,锗半导体材料禁带宽度为0.8eV,高温线性范围上限约为60℃,硅材料禁带宽1.1eV,高温上限约为250℃,砷化镓材料禁带宽1.45eV^[7],因此,在310℃时尚未观察到非线性。

利用p-n结正向压降的函数表达式,可以直接求出这种温度传感器的灵敏度 $\frac{dV}{dT}$,将(2)式两边取对数,令I为常数,求全微分:

$$d \left[(\ln A - M \ln T) + \frac{q}{kT} (V - V_g) \right] = 0,$$

$$-\frac{q}{kT^2} (V - V_g) dT + \frac{q}{kT} dV + \frac{M dT}{T} = 0,$$

$$\frac{dV}{dT} = \frac{V - V_g}{T} - \frac{Mk}{q} = -\frac{V_g - V}{T}$$

$$-0.24 \text{mV/K}.$$

当 $T = 300\text{K}$, $I = 1\text{mA}$ 时, V 的值对锗二极管约为0.2V,对硅二极管约为0.7V,对砷化镓二极管约为0.9V,代入相应的禁带宽度 V_g 值,这三种材料的二极管算出的 $\frac{dV}{dT}$ 值大约都在 -2mV/K 左右。

对于正向导通的p-n结,电压与电流呈对数关系,p-n结正向电流变化时,电压变化不大,即这种温度传感器的灵敏度与正向电流关系不大。同时可见,正向压降大的二极管作为温度传感器灵敏度略低,虽然不同的二极管正向压降值有一定离散性,但其灵敏度相差不多。

p-n结作为测温元件总要通过一定的正向电流,电流值的大小直接影响传感器的特性,正向电流愈小,非线性误差愈小,由式(3)可知,非线性引起的相对误差 Δ 与 $\ln T / \ln(I/A)$ 成正比, $I \rightarrow 0$ 时 $\Delta \rightarrow 0$,从线性度来考虑I应该取得愈小愈好。p-n结正向导通时,会消耗功率并发热引起结温升高造成测量误差。发热功率 $W = IV$,而 $V \propto \ln I$,故 $W \propto I \ln I$,I愈大,发热引起的测量误差愈大。前面说过,所测得的二极管正向压降实际上是材料欧姆电阻上的压降 V_R 与p-n结压降之和, V_R 与I成正比。为了使 V_R 尽可能地减小,I的值也应该选得

小一些。但是,正向电流愈小二极管正向动态电阻值愈大,即传感器的输出阻抗增大,输出阻抗 $R_o = \frac{dV}{dI} \propto \frac{d \ln I}{dI} = \frac{1}{I}$,当 $I \rightarrow 0$ 时, $R_o \rightarrow \infty$,I增大时 R_o 单调减小。为了减少恒流源电流波动和环境电磁干扰造成的温度测量误差, R_o 应该愈小愈好,即又要求电流值取得大一些,显然这与上面提到的三点是矛盾的。电流值对传感器特性的影响如图7所示。应该根据

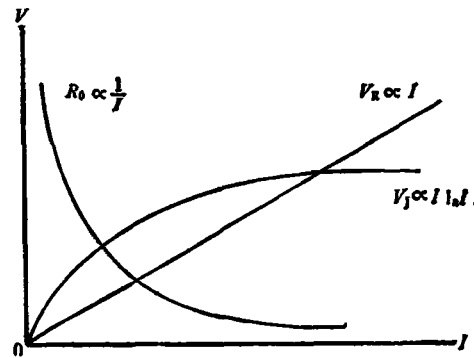


图7 正向电流I与测温传感器参数的关系曲线

具体使用条件合理选择正向电流值,在高精度测量中,尤其在低温测量中电流值应该取得很小,约为 $10-50 \mu\text{A}$,而在工业控制系统中,为了提高抗干扰性能和降低对测量仪器输入阻抗的要求,电流值适当地取得大一些,约为 $300 \mu\text{A}-1\text{mA}$ 。

从式(3)可以看出,表征p-n结特性的常数A对于测温元件的性能也是有关系的,对于同样的电流值,A愈大非线性误差愈小,为了解决上面的矛盾,应该选择杂质浓度较高、面积较大的p-n结。

在一般条件下,测温元件的热容量应该很小,才不致影响被测对象的温度场;同时要求p-n结能尽快与环境达到热平衡,才能跟踪温度迅速变化的系统。目前,用于一般电子线路的晶体二极管和三极管大多有一层传热性能不佳的保护材料,如玻璃、陶瓷、环氧树脂等。而且管芯的引出线非常细,传热性能不良,激烈的温度变化容易引起引线或焊点断裂,因此有必要在工艺上作减小热阻及合理封装的改进。

p-n结温度传感器的公式(3)是在假定没

有外场的条件下推导出来的。如果在测量环境中**有强光照、放射性辐射或强磁场**， $p-n$ 结中的物理过程就会发生变化，光照有可能使半导体材料产生新的空穴、电子对；放射性辐射也会使材料产生新的载流子，甚至使半导体材料活化。在这种情况下，测温元件应该加以适当屏蔽。

在低温下，强磁场对 $p-n$ 结温度传感器的工作有极大的影响。这是由于低温时载流子扩散运动减弱，强磁场对定向运动载流子的洛伦兹力使其运动路径弯曲，使半导体材料的体电阻率显著变化，同时使 $p-n$ 结过渡区载流子的扩散、迁移情况发生变化，尤其当强磁场方向与 $p-n$ 结垂直时，这种影响十分强烈^[8]。在强磁场中测量低温时， $p-n$ 结取向对测量结果影响极

大，为了减小测量误差，应该采取磁屏蔽，或保持 $p-n$ 结取向与磁场方向严格平行。

参 考 文 献

- [1] L. E. Barton, *Electronics*, May (1962), 4.
- [2] A. V. Ziel, *Solid State Physical Electronics*, (1976), 115.
- [3] 黄昆、谢希德, 半导体物理学, 科学出版社, (1958).
- [4] J. A. Becker, C. B. Green and G. L. Dearson, *Trans. AIEE*, 65(1946), 713.
- [5] E. M. Conwell, *Proc. IRE*, 46(1958), 128.
- [6] David L. Swartz, John M. Swartz, *Advances in Instrumentation*, ISA-76, Vol. 31, Part 2, p. 611.
- [7] J. A. Burton, *Physica*, 20(1954), 845.
- [8] H. H. Sample, L. G. Rubin, *Advances in instrumentation*, ISA-76, Vol. 31, Part 2, p. 608.

高重复率千瓦级 Nd^{3+} :YAG 激光器的若干应用

朱劲松 谈云鹏 杨震 王业宁

(南京大学物理系)

为了获得高重复率及峰功率较高的激光输出，国外于 1969 年首次报道了声光调 Q 技术^[1]。我们于 1974 年试制成功连续泵浦声光调 $Q-Nd^{3+}$:YAG 激光器^[2]，并且于 1975 年起将该机用于电子工业微加工。做了石英晶体的调频、分割，电阻刻槽，硅、锗、钽酸锂的划片等实验。近年来又将它用于非线性晶体的性能研究，取得了一定的结果。

重复率为数千赫（最高可达几十千赫），峰功率为千瓦级（最高可达几十千瓦）的准连续激光输出，是利用声光 Q 开关、插入连续 Nd^{3+} :YAG 激光器的谐振腔内获得的。声光开关具有调制电压较低、消光比好、插入损耗小、激光损伤阈值高、脉冲-脉冲振幅稳定性好、动静比大等优点（但也具有开关时间慢、脉宽较宽等缺点）。因此适用于中等峰功率的需要。它与最大功率仅为一、二百瓦的连续 Nd^{3+} :YAG 激光器相比，应用范围大大地扩大了。

我们利用具有下述参数的激光器：重复率

为 1—10 个千赫可调，脉宽为 300 毫微秒左右，平均功率为十瓦，峰功率为一万瓦左右。进行了如下的工作：

1. 电子工业微加工

声光调 $Q-Nd^{3+}$:YAG 激光器所输出的激光经透镜聚焦后，有较小的光斑（十微米左右），并且具有适中的峰功率、脉冲间隔较短、重复率高等特点。适用于电子元件的精密调整，它可以在热敏感的材料上除去薄膜的一部分。由于脉冲宽度很窄，在热量传到基底上以前，脉冲的作用已完结，因而用它来加工有衬底的薄膜元件，具有不损伤基底材料的优点。这个对于石英晶体的“调频”、薄膜电阻“刻槽”等是十分有利的。在精密加工的过程中，可用监视系统，并且通过门电路来控制声光开关，使激光可以在一个脉冲之内得以熄灭。因而可使元件调整精度较一般传统的调整加工技术高出若干个数量级。

(1) 石英晶体频率调整(简称“调频”)