

霍尔发生器的设计与制造

巫 昊

摘 要

本文叙述了霍尔发生器的设计及其制造工艺。给出了以锗为原材料的实验数据。此外，还讨论了制造工艺中的电极接触问题和寄生电势的补偿问题。

一、霍尔效应及其在技术上的应用

在强度为 H 的磁场中放置一个长、宽、厚分别为 l 、 b 、 h 的半导体薄片，当在其上沿 x 方向通以电流 I 时，在薄片中将产生一个沿 y 方向的电场，亦即存在一个霍尔电势。以 V_H 表示之（见图（1）），则有

$$V_H = R_H \frac{IH}{h} \times 10^{-8}, \quad (1)$$

式中， I 的单位为安培， H 的单位为高斯， h 的单位为厘米， R_H 为霍尔系数，单位为厘米³/库伦。

霍尔系数与半导体载流子的浓度有下述关系：

$$R_H = \pm \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{ne}, \quad (2)$$

式中的正、负号表示半导体的导电类型，对于 p 型，取正号，而对于 n 型，则取负号。

如果半导体的电阻率为 ρ ，载流子的迁移率为 μ ，则有

$$R_H = \frac{3\pi}{8} \rho \mu, \quad (3)$$

式中 ρ 的单位为欧·厘米， μ 的单位为厘米²/伏·秒。式（1）是霍尔电势与电流 I 、磁场强度 H 的直接关系。这种简单的线性关系，给出了霍尔效应的很多技术应用。例如，如图 2 所示，当半导体片被电路中负载电流的一部分通过并受到电路电压激励（磁场强度正比于

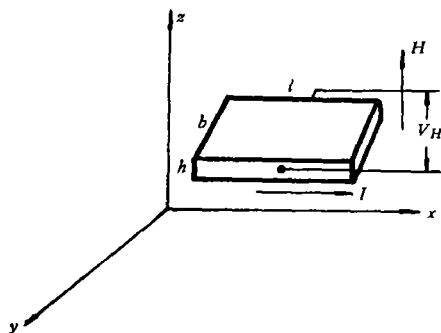


图 1.

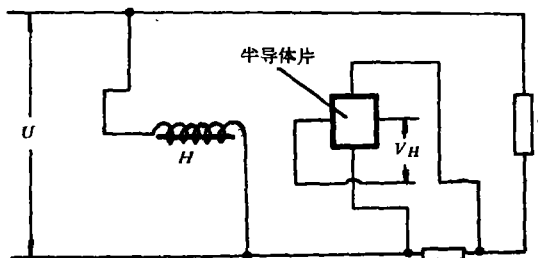


图 2.

电路电压)时,则所产生的霍尔电势将正比于电路的功率,由此可制成霍尔效应功率计。

霍尔发生器除具有一般半导体器件的特点,如体积小、重量轻等外,还由于其效应是个多数载流子效应,与少数载流子无关,故原则上,它的这种效应不随频率而变化,而适应于各种不同的频率。此外,它还具有噪声低、工作稳定等优点。这些都给霍尔效应器件在技术上的应用提供了广阔的前景。

二、霍尔发生器的设计要求及其性能研究

1. 霍尔发生器的几何尺寸选择及灵敏度问题

式(1)只有当长度 l 远大于宽度 b 时才成立^[1]。实际上,对一定的 $\frac{l}{b}$ 值,

$$V_H = R_H \frac{I \cdot H}{h} f\left(\frac{l}{b}\right), \quad (4)$$

式中 $f\left(\frac{l}{b}\right)$ 是由 $\frac{l}{b}$ 决定的小于 1 的数值。 $f\left(\frac{l}{b}\right)$ 和 $\frac{l}{b}$ 的关系,具有如图 3 所示的形状。

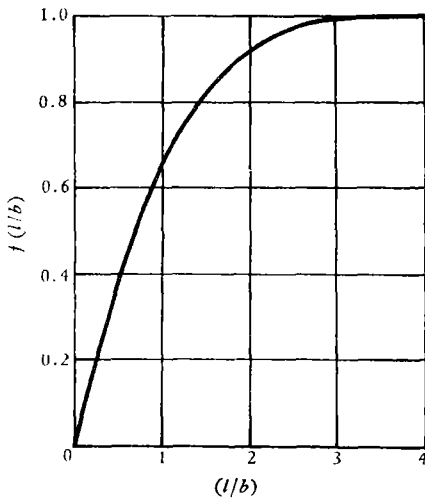


图 3.

实验表明,当 $\frac{l}{b}$ 值大于 2 时, $f\left(\frac{l}{b}\right)$ 值接近于 1。

例如,当 $\frac{l}{b} = \frac{6}{2.5} = 2.4$ 时,对 $\rho = 2-3$ 欧·厘米

的锑发生器的实测结果, $f\left(\frac{l}{b}\right) = 0.978$ 。因而,

为使锑发生器具有较大的输出电势,在控制电流方向电阻的允许情况下,选择较大的 $\frac{l}{b}$ 值是合适的,

但 $\frac{l}{b}$ 值过大也没有意义,一般可选择大于 2。

至于厚度 h ,当然愈薄愈好,但过薄将降低机械强度,对锑发生器而言,选择 0.18—0.2 毫米是适当的。

灵敏度直接反映了 V_H 与 I 、 H 的关系,它被定义为当发生器通以单位控制电流时,在单位磁

场强度中所产生的霍尔电势,并以 S 表示之:

$$S = \frac{R_H}{h} f\left(\frac{l}{b}\right) \times 10^{-8}.$$

由 V_H - HI 曲线的斜率,即可求出灵敏度 S 。 S 包含了各个因素对霍尔电势的影响。在设计发生器的应用线路时,必须测得发生器的实际 S 值,作为发生器的固有参数。图 4 为 $\rho = 2$ 欧·厘米时所测得的锑发生器的 V_H - HI 曲线。由此所测得的锑发生器的灵敏度为 0.12 毫伏/安·高斯。

在某种情况下,如果发生器的控制电流固定不变,则霍尔电势仅由磁场决定。伏特灵敏度的定义,即是在一定控制电流下,单位磁场强度所产生的霍尔电势,并以 K 表示之。图 5 是对一个样品在控制电流为 5 毫安、10 毫安时所测得的 V_H - H 曲线,由这两个曲线

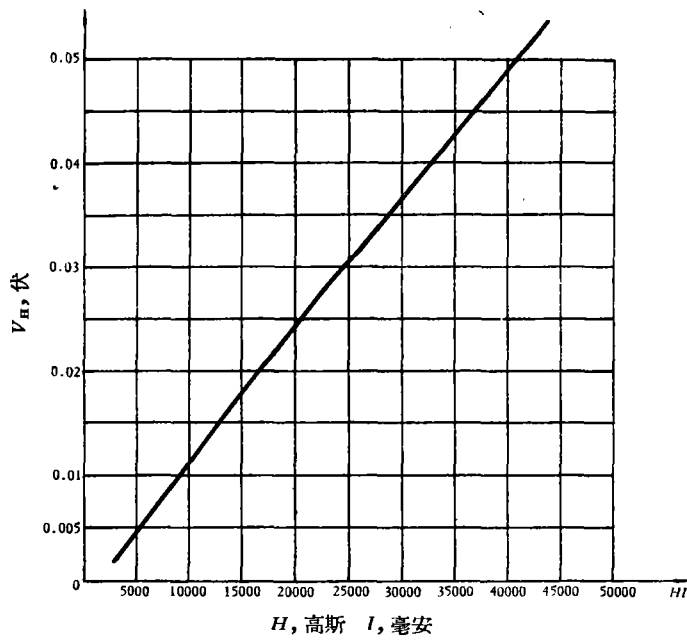


图 4.

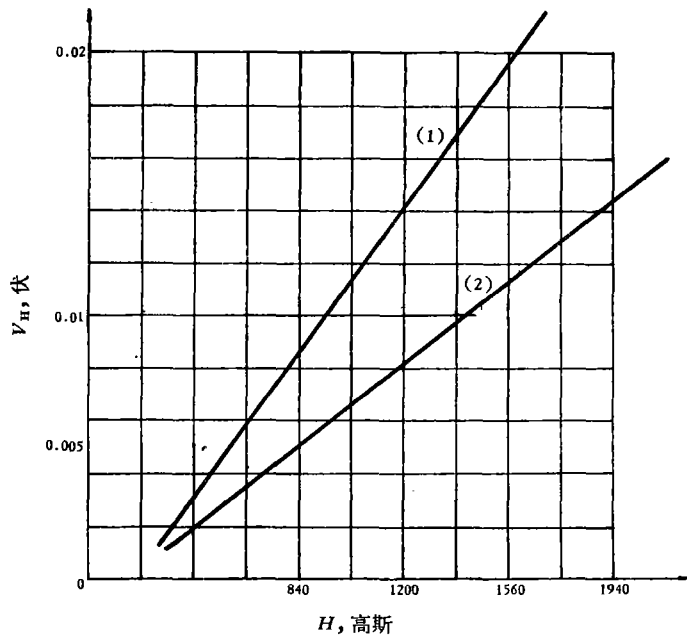


图 5.

- (1) — 控制电流 10 毫安;
 (2) — 控制电流 5 毫安

的斜率可分别求出伏特灵敏度为 7.9 微伏/高斯、14.1 微伏/高斯。图中的曲线不通过原点,是由于测量过程中磁体中的剩磁未被完全消除,但这并不影响曲线的斜率。由灵敏度和伏特灵敏度的定义及式(3),可得

$$S = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{h} \rho \mu f \left(\frac{l}{b} \right) \times 10^{-8}, \quad (5)$$

$$K = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{h} \rho \mu I f \left(\frac{l}{b} \right) \times 10^{-8}, \quad (6)$$

式中, 电阻率 ρ 是按需要加以选定的, l 、 b 、 h 也是按需要和机械强度的可能性加以选定的。当这些参数确定后, S 和 K 就由材料的迁移率决定, 而后者则取决于材料中杂质散射机构^[2]。

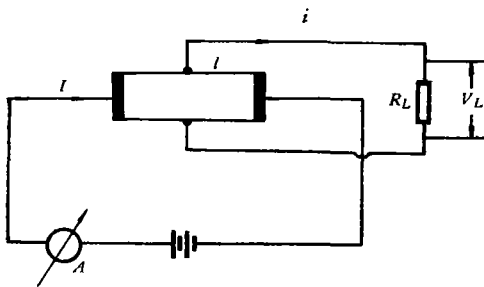
2. 输出功率与效率问题

当在霍尔电势端接入负载时, 需考虑负载与发生器之间的关系, 即在何种情况下使发生器具有最大输出功率以及如何提高它的效率。设 R_L 为负载电阻, r 为发生器本身沿霍尔电势方向的电阻, 见图 6(a), 则负载上的输出功率

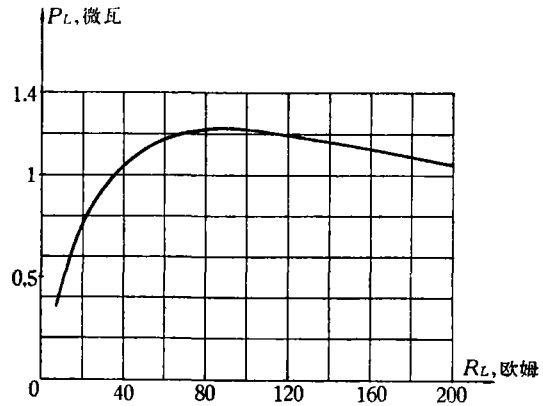
$$P_L = \left(\frac{V_H}{r + R_L} \right)^2 \cdot R_L. \quad (7)$$

当 $r = R_L$ 时, P_L 为最大。此时

$$P_{LM} = \frac{V_H^2}{4r}.$$



(a)



(b)

图 6.

图 6b 为 $l \cdot b \cdot h = 5 \times 4 \times 0.18$ 毫米³、 $\rho = 2-3$ 欧·厘米的锗发生器在 $I = 7$ 毫安、 $H = 2600$ 高斯情况下所测得的 V_H 和 r 值, 由式(7)作出的 P_L-R_L 曲线。它表明 P_L 在随 R_L 的变化过程中会出现峰值(当 $r = R_L$ 时)。但必须指出, 在设计发生器时, 是不应单纯考虑如何获得最大输出功率的。将发生器看成是一个电源, 其内阻愈低愈好, 以减少功率损耗, 因此必须根据负载的要求即使 r 尽可能小, 又要尽可能地使发生器与负载匹配。

发生器的效率为其最大输出功率与输入功率之比:

$$\eta = \frac{P_{LM}}{P_1} = \frac{V_H^2 h^2}{4I^2 \rho^2}.$$

将式(1)、(3)的 V_H 及 R_H 值代入上式中, 则得

$$\eta = \frac{9\pi^2}{256} (\mu H)^2 \times 10^{-16}. \quad (8)$$

由式(8)可知,效率与磁场强度和迁移率的乘积平方成正比。由于锗的迁移率较低,因而锗发生器的效率也较低。但可用增大磁场强度的办法来加以提高。我们测得的锗的迁移率为 1276 厘米/伏·秒,如果采用 $H = 6000$ 高斯的磁场强度,可使效率达到 0.2%。如果发生器在直流情况下工作,则效率就成为一个固有参数。尽管锗的迁移率较低,但如将磁体选择得当,仍可提高发生器的效率。在上述情况下,当磁场强度增至 $H = 10^4$ 高斯时,发生器的效率增至 0.54%。

3. 霍尔电势与控制电流的关系

当控制电流增至一定程度时,霍尔电势便不再与控制电流成线性关系。图 7 是对一个样品所测得的 V_H-I 曲线。发生器在工作时其工作电流必须选取在线性范围之内。一般可选择最大电流的 50% 作为工作电流。由图 7 可看出,同一样品,条件不变时,最大电流几乎不随磁场强度而改变。

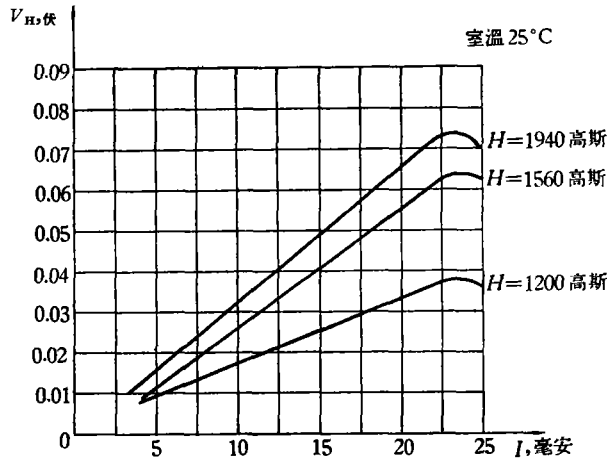


图 7.

4. 散热问题与使用温度问题

前面所述情况,都是假定霍尔电势不随温度变化。但当超过一定的温度范围后,霍尔电势的温度系数便不可忽视,同时各种副效应将逐渐显著^[3]。因而,必须考虑发生器的散热状况,即温升与控制电流的关系。

控制电流在发生器上所消耗的功率为 P_1 , 这个功率被转换成热量而向空气中发散。当建立平衡状态时,应有:

$$I^2 R = a S \Delta t,$$

式中 a ——散热系数;

S ——发生器的散热面积;

Δt ——温升。

于是可得

$$\rho \frac{l}{bh} I^2 = 2abl\Delta t,$$

$$\Delta t = \frac{\rho}{2ab^2h} I^2, \quad (9)$$

这里忽略了侧面积的影响。

由此可知,从理論上看,如果 α 为常数,则 Δt 和 I 之間成拋物綫关系。对涂以指甲油、 $\rho = 1$ 欧姆·厘米、 $l \cdot b \cdot h = 8 \times 2.5 \times 0.2$ 毫米³的发生器,在空气中所测得的 Δt - I 曲线,如图 8 所示。不同的涂料,对散热状况有很大影响,亦即对散热系数影响很大。就上述情况看,当 $I = 20$ 毫安时,散热系数约为 26 毫瓦/厘米²·°C。实际上,将薄片置于磁体中,散热系数还将提高。如果使用散热片,则可使最大控制电流增大数倍^[4]。

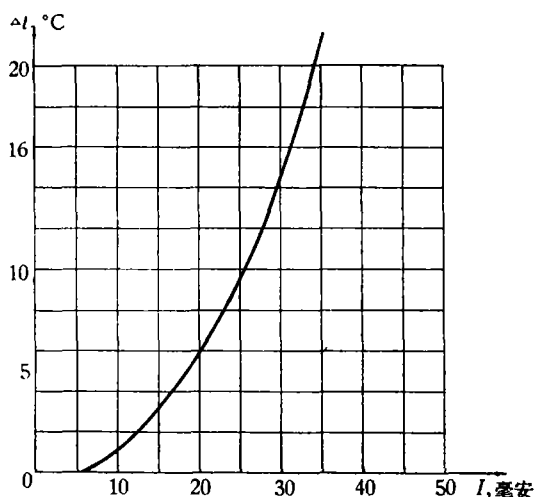


图 8.

最大使用温度的选择,是由材料决定的。用作发生器的材料,要求具有較高的温度稳定性(即具有較小的霍尔电势的温度系数)。具有低电阻率的鍺,可满足这一要求。从霍尔电势与温度关系来看, $\rho = 2$ 欧·厘米的鍺发生器在温度 0° — 60° C 之間并无显著变化,在 0° — 40° C 之間仅为 $0.04\%/^\circ\text{C}$ ^[5]。是否需要温度补偿,需按具体应用要求而定。当然,使用温度的选择必須根据具体的应用要求而定。确定最大使用温度后,即可由 Δt - I 曲线确定最大允許电流。

如果由温升所选择的最大允許电流已超过霍尔电势随控制电流变化的綫性范围,则表示在綫性范围内的任何控制电流均不会引起霍尔电势的温度不稳定性。

输出的霍尔电势 V_H 亦可表示为温升 Δt 的函数。将式(9)中的 I 值代入式(1)中,則得

$$V_H = \sqrt{2} R_H \frac{b}{h^{1/2}} \left(\frac{\alpha}{\rho} \right)^{1/2} (\Delta t)^{1/2} \cdot H \times 10^{-8}. \quad (10)$$

因而,伏特灵敏度

$$K = \sqrt{2} R_H \frac{b}{h^{1/2}} \left(\frac{\alpha}{\rho} \right)^{1/2} (\Delta t)^{1/2} \times 10^{-8}. \quad (11)$$

由上式可知,在一定的散热条件下,伏特灵敏度和材料厚度的 $\frac{1}{2}$ 次方成反比。由温升即可求出输出的霍尔电势和伏特灵敏度。

三、霍尔发生器的制造問題

目前,制造霍尔发生器所用的材料有鍺、銻化銻、砷化銻、碲化汞等。在这些材料中,以鍺的迁移率为最低,最大只达 3600 厘米²/伏·秒。但作为发生器來說,要求温度稳定性高、机械强度高和制造工艺簡單。从这些方面来看,鍺較銻化銻等为佳。所以,它仍然是制造霍尔发生器的一种合适材料。

霍尔发生器可分为晶体发生器和薄膜发生器两种。晶体发生器又可分为两部分，一部分是磁体，另一部分是半导体薄片。对于磁体的要求，是能够产生足够的磁场强度，并在很大范围内与励磁电流成线性关系。

半导体薄片的制造工艺大致是这样的：将 n 型锗单晶切割成矩形薄片，用 3000 号金刚砂研磨至一定厚度，然后以 30% 的双氧水和 20% 的氢氧化钠溶液为腐蚀剂将其腐蚀至所要求的厚度。再在长边方向两端镀上宽度约为 0.5 毫米的镍层，并用直径为 0.15 毫米的镀锡铜丝作为电极。先焊好控制电流端，再在薄片中央焊上霍尔电势端电极，然后将霍尔电势端的另一电极在薄片另一边上回来移动，直至微安表或毫伏表指示最小值才将该电极迅速焊上（如图 9 所示）。然后，将薄片装在磁体中，涂以保护涂料，套上外壳进行测试。

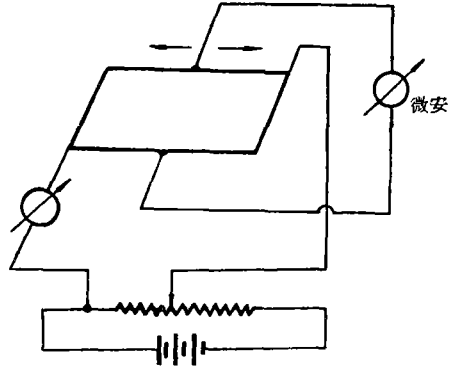


图 9.

下面就制造工艺中的两个主要问题进行讨论。

1. 电极接触问题

在电极焊接过程中，最为重要的是在电极与半导体之间获得良好的欧姆接触。如果在电极与半导体之间存在着整流现象，则在工作过程中将引起信号失真，将会增加焊接电阻，提高发热现象，而各焊接点间发热量不完全相同，又将形成各种副效应^[5]。此外，寄生的霍尔电势没有完全被消除，当加上磁场时，将有一个伪直流霍尔电势迭加在输出的霍尔电势中，从而引起严重的误差。

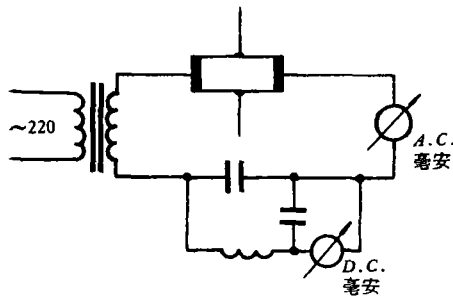


图 10.

可用几种不同的焊接方法，比较电极的接触状况。图 10 所示的线路，可用来检验是否形成欧姆接触。电极的接触状况，是通过薄片中的直流电流与总电流之比来加以反映的。曾经试验用纯电阻接入，直流表的指示始终为零。将各种不同程度整流接触的样品接入后，直流表将有不同的指示（用 0—50 毫安的毫安表测得）。用这一方法，可相对地表示电极接触的“欧姆化”程度。

下面是三种方法焊接电极结果的举例。

(1) 用普通焊锡焊接 ($\rho = 16$ 欧·厘米)

霍尔电势端

i (交流电流, 毫安)	20	30	40	60	70	80
I (直流电流, 毫安)	0.3	1	2	3	3.2	3.2

(2) 用 8% 錒及 92% 錫合金焊接 ($\rho = 2-3$ 欧·厘米)

控 制 电 流 端

i (交流电流,毫安)	5	10	20	26	36
I (直流电流,毫安)	0	0	0	0.1	0.5

霍 尔 电 势 端

i (交流电流,毫安)	20	40	60	80
I (直流电流,毫安)	0	0	0	0

(3) 鍍錳后用合金焊接 ($\rho = 2-3$ 欧·厘米)

控 制 电 流 端

i (交流电流,毫安)	4	15	40	52	69	80
I (直流电流,毫安)	0	0	0	0	0	0

以上三种焊接方法都采用氯化鋅为焊剂。用普通焊錫焊接一般易产生整流接触,曾发现最大直交流成分比达 3% 以上。用錫錒合金焊接,质量較佳,但亦曾发现最大直交流成分比达 0.5% 以上。用鍍錳方法焊接,直交流成分比最低。必須指出,用錫錒合金焊接之所以获得較好的欧姆接触,是因为我們所用的材料是 n 型的,而錒是一种 n 型杂质,因而在接触处形成 n^+-n 結。这就要求錫錒合金配得均匀,焊接温度足够高,确保形成 n^+-n 結。获得良好的欧姆接触是个十分重要問題,还有待进一步的深入研究。

2. 寄生电势的补偿問題

由于不可能将霍尔电势端电极完全焊在同一等位面上,即焊在垂直于控制电流的等位面上,因而当有控制电流通过样品时,即令不外加磁場,也会产生寄生电势。这种寄生电势必須設法加以减少,以至消除。采用图 9 所示的方法,只能加以减少,而不能加以消

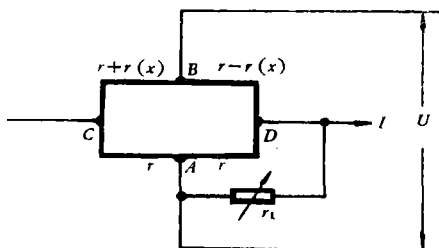


图 11.

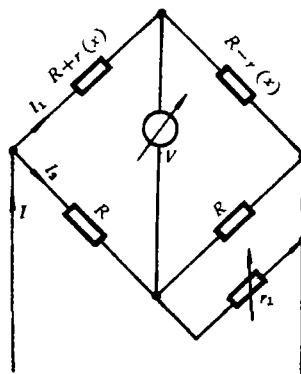


图 12.

除。我們曾用这个方法将寄生电势减至 0.8 毫伏/毫安, 但这仍然相当可观, 必须采用补偿方法予以消除。补偿方法很多, 一般多采用单电阻补偿法。如图 11 所示, 在 C 、 B 两点間接入一个可調电阻 r_1 , 調节 r_1 , 即可使寄生电势补偿掉。这种情况可看成是惠斯登电桥的一个特殊形式(见图 12)。按 Кончиц 的推导^[6], 設电极間不对称的电阻为 $r(x)$, 可得补偿电阻

$$r_1 = \frac{r^2 - r(x)r}{2r(x)}, \quad (12)$$

式中 $r = R$ (薄片沿控制电流方向的电阻) 为惠斯登电桥一个臂的电阻。

由式 12 可得

$$r(x) = \frac{R^2}{R + 2r_1}. \quad (13)$$

当电桥平衡时, 有

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R + \frac{Rr_1}{R + r_1}}{R + r(x) + R - r(x)}.$$

由于 $I_2 = I - I_1$, 故得

$$I_1 = \frac{R + 2r_1}{3R + 4r_1} I, \quad (14)$$

$$V = \frac{R + 2r_1}{3R + 4r_1} I r(x),$$

式中 V 为寄生电势。

将式(13)的 $r(x)$ 值代入上式, 即得

$$V = \frac{R^2}{3R + 4r_1} I,$$

亦即

$$r_1 = \frac{IR^2}{4V} - \frac{3}{4} R. \quad (15)$$

由式(15)可知, r_1 不随 I 变化, 因为 V 与 I 成正比。实验表明 r_1 随 I 有一定的变化。由式(15), 可估算应接入的补偿电阻的范围。当出现不平衡时, 只需調节 r_1 即可消除寄生电势。

参加此项工作的同志还有謝山亭、汪芷周、潘承安等。

参 考 文 献

- [1] Destrant, M., Solid State Physics in Electronics and Telecommunications, Academic Press Inc. (London) Ltd., 1960.
- [2] 黄 昆、謝希德, 半导体物理学, 科学出版社, 北京, 1958.
- [3] 刘士毅等, 半导体物理实验, 高等教育出版社, 北京, 1959.
- [4] Пимскор, А. П., Применение полупроводниковых генераторов Холла в автоматике, Г. И. Т., Л., Киев, 1961.
- [5] Карамцева, А. Ф., Исследование датчиков Э.Д.С. Холла на основе гермария, Вестник электропромышленности, 1961, № 4.
- [6] Кончиц, И. К., Эффект асимметрии электродов и его использование в полупроводниковой технике, Электричество, 1962, № 10.

THE DESIGN AND MANUFACTURE OF HALL GENERATORS

WU HAUR

In this paper the design considerations of Hall generators using germanium and their manufacturing techniques are described. The factors considered in design are the geometrical dimensions, sensitivity output power, efficiency, relationship between the control current and the Hall e.m.f. and the working temperature. Problems relating to the ohmic contact between the electrode and the semiconductor material and to the compensation of parasitic e.m.f. are also discussed.