

双注入型磁敏二极管的设计*

黄得星

(黑龙江大学物理系)

提 要

本文探讨了在 P^+IN^+ 型长二极管的一个侧面设置高复合区的锗磁敏二极管的设计,给出了选择长度 (l)、厚度 (d)、宽度 (w) 和电阻率 (ρ) 的最佳设计关系式:

$$\frac{\rho}{w} \left(\frac{l}{d} \right)^3 \leq 10.75 \cdot \frac{(\Delta T)^2}{l_0^3 R_{th}^2},$$

式中 ΔT 为磁敏二极管的最大温升, R_{th} 为管子的热阻, l_0 为通过管子的偏流。

一、前 言

1958年 В. И. Стафеев 研究 PNM (M 表示金属, NM 表示欧姆接触) 型单注入长二极管的磁敏感效应时,发现在 N 区长度比载流子扩散长度长的条件下,这种二极管显示很高的磁灵敏度^[1,2]。

1961年 В. И. Стафеев 和 Э. И. Каракушан 利用上述原理制出了磁灵敏度很高的单注入型锗磁敏二极管^[3]。

1969年和1971年日本索尼 (Sony) 公司先后研制了 P^+IN^+ 型双注入锗和硅磁敏二极管^[4,5]。这种磁敏二极管结构的独特之处在于在 P^+IN^+ 型长二极管的一个侧面上人为地设置了复合中心浓度非常大的复合表面,而其对面则是光滑的无复合表面。当横向磁场加在平行于复合表面,且垂直于载流子运动方向时,载流子受洛伦兹力作用的调制而变小或变大,从而引起伏安特性曲线的偏移,显示出很高的正向或负向磁敏感效应。这种磁敏二极管的磁灵敏度比霍尔器件的大2—3个数量级。

对于双注入磁敏二极管的机理有一维的和二维的理论分析^[6,7]。本文在这些理论分析的基础上探讨了双注入锗磁敏二极管的设计原理,并提出了选择磁敏二极管的尺寸和材料的最佳方案。

二、磁敏二极管的伏安特性

图1是锗磁敏二极管的结构。图中 r 表示设置在一个侧面上的高复合区, l_0 为它的

* 1984年6月26日收到,1985年9月21日修改定稿。

长度, I 区为近本征的高阻 N 型或 P 型半导体. 设置复合区的方法是, 用石蜡封住 PI 结和 NI 结, 然后用喷枪向长二极管的未用石蜡保护的表面喷细金刚砂, 轻轻地破坏掉一层晶格. 喷砂时一定要保护好 PI 结和 NI 结. 设 I 区长度为 l , 则从 PI 结或 NI 结到复合区的距离是 $(l - l_0)/2$.

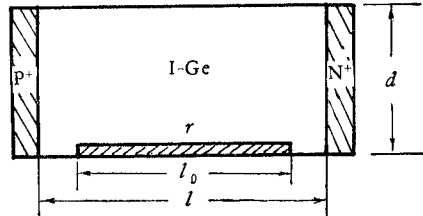


图 1 锗磁敏二极管的结构

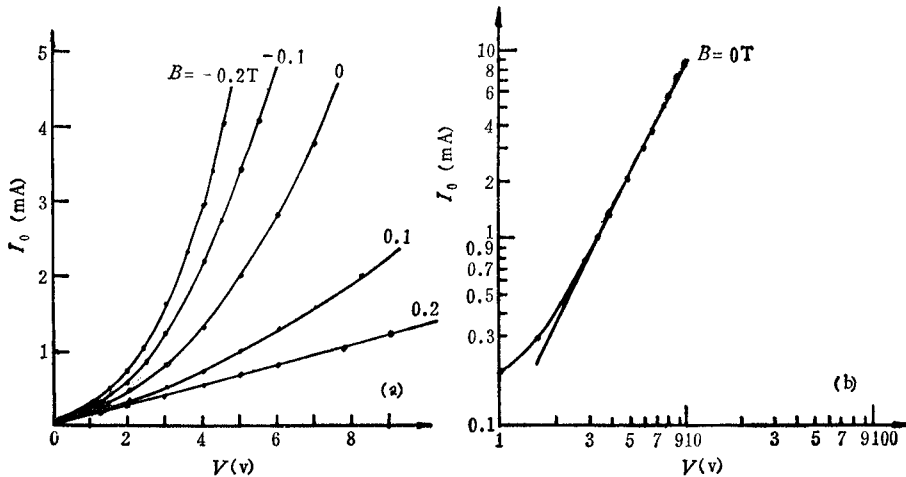


图 2 锗磁敏二极管的正向伏安曲线及其随磁场的变化

图 2 示出了锗磁敏二极管的正向电流与正向偏压之间的关系曲线(即伏安曲线)及其在横向磁场中的变化情况. 锗磁敏二极管的测试条件是在不同的横向磁场中逐点测量通过锗磁敏二极管的正向电流和相应的偏压, “·”表示相应的测量值. 从图 2(a) 可以看出, 在未加磁场的情况下, 磁敏二极管的正向偏压 $V = 4V$ 时, 正向电流 $I_0 = 1.25 \times 10^{-3}A$. 从图 2(b) 可以看出, 在正向电流 $I_0 > 5 \times 10^{-4}A$ 时, 外加磁场 $B = 0$ 时的伏安曲线正好满足平方律关系, 即 $I_0 \propto V^2$.

磁敏二极管的正向偏压为

$$V = V_{PI} + V_I + V_{IN}, \tag{1}$$

式中 V_{PI} 和 V_{IN} 是降在 PI 结和 NI 结上的偏压, V_I 是降在 I 区的偏压. 众所周知, 锗二极管的正向压降 $V_{PN} = V_{PI} + V_{IN} \approx 0.3V$, 因此, $V_I \gg V_{PI} + V_{IN}$, 即 $V \approx V_I$. 当 $B = 0$ 时, P^+IN^+ 型锗长二极管的伏安曲线服从兰珀 (Lampert) 公式^[7-10], 即正向电流密度 J_0 与正向偏压 V 的关系为

$$J_0 = \frac{9}{8} \cdot q \mu_n \mu_p \Delta n_T \tau_{eff0} V^2 / l^3, \quad (2)$$

式中 q 为电子电荷量, μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴迁移率, $\Delta n_T = n_T - p_T$ 是热平衡时电子与空穴浓度之差, τ_{eff0} 表示 $B = 0$ 时载流子的有效寿命。

在 $B = 0$ 的情况下, 长二极管的厚度 d 薄于载流子扩散长度 $L_D = \sqrt{D\tau}$ (τ 为体内载流子寿命, D 为双极扩散系数) 时, I 区载流子的有效寿命 τ_{eff0} ^[7,10] 为

$$\tau_{eff0} = \frac{d^2}{3D}. \quad (3)$$

在强注入下, 双极扩散系数 D 为

$$D \approx \frac{2D_n}{(1+b)}, \quad b = \frac{\mu_n}{\mu_p}, \quad (4)$$

故

$$\tau_{eff0} \approx \frac{(1+b)d^2}{6D_n}, \quad (5)$$

式中 D_n 为电子的扩散系数。

在恒压源驱动下, $d < L_D$ 时, 磁敏二极管才显示出很高的磁灵敏度^[7]。设电流相对磁灵敏度 S_I 定义为^[7]

$$S_I = \frac{J_B - J_0}{J_0}, \quad (6)$$

则在弱磁场 ($|\lambda_B d| < 1$) 中

$$S_I = - \left[\frac{\lambda_0 V}{4} \cdot \left(\frac{d}{l} \right) + \frac{4D_n}{(1+b)V} \left(\frac{l}{d} \right) \right] B; \quad (7)$$

在强磁场 ($|\lambda_B d| \gg 1$) 中,

$$S_I = - \left(1 - \frac{8l}{3\lambda_0 V d B} \right). \quad (8)$$

这里 J_B 为外加磁感应强度为 B 时的正向电流; λ_B 和 λ_0 分别为

$$\lambda_B = q(\mu_n + \mu_p) E_y B / 4kT \quad (9)$$

和

$$\lambda_0 = q(\mu_n + \mu_p) / 4kT; \quad (10)$$

上式中 E_y 为 I 区中电场在 y 轴方向的分量, k 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度。

从(7)式和(8)式可以看出, 载流子迁移率越大, S_I 就越大; 另外,

$$l/d < \sqrt{16D_n/\lambda_0(1+b)V^2} \text{ 时,}$$

S_I 值随 l/d 的比值的减小而变大。但是, l/d 比值的选择不还要受其它条件, 如材料的电阻率、载流子的寿命、I 区的正向电流和正向偏压以及加工的难易程度等条件的限制。

三、设计原理

如上所述, I 区实际上是近本征的高阻 N 型或 P 型半导体。当 I 区掺杂浓度比简并

化 P^+ 区或 N^+ 区掺杂浓度低 6—7 个数量级时, PI 结或 NI 结就具有注入和整流特性, 就形成双注入结。如果 I 区掺杂浓度比较大, 载流子迁移率就要变小, 所以, 锗单晶的掺杂浓度不能高于 10^{14}cm^{-3} 。这时, N 型锗单晶的电阻率 $\rho \geq 20 \Omega \cdot \text{cm}$, P 型锗单晶的电阻率 $\rho \geq 30 \Omega \cdot \text{cm}$ 。如果选择 $\rho \geq 20 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 N 型锗单晶, 那么 N^+N 结的整流效应虽不如 P^+N 结, 但它仍能保持正向注入和整流特性。图 3 表示这种 P^+NN^+ 型长二极管的能级图。

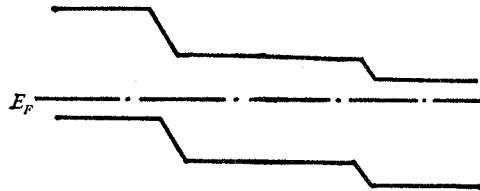


图 3 P^+NN^+ 型长二极管的能级图

如果锗单晶的体内载流子寿命为 200—500 μs , 那么它的空穴扩散长度 L_p 为 1.0—1.6mm, 电子扩散长度 L_n 为 1.4—2.3mm, 双极扩散长度 L_D 为 1.2—1.8mm。因此, 如果选择体内载流子寿命 $\tau = 200—500 \mu\text{s}$ 的锗单晶, 那么磁敏二极管的厚度 d 应薄于 1.2—1.8mm。

从(2)式得, 磁敏二极管的正向电流 I_0 为

$$I_0 = J_0 w d = \frac{9}{8} q \mu_n \mu_p \Delta n_T \tau_{eff} V^2 w d l^{-3}, \quad (11)$$

式中 $\Delta n_T = n_T - p_T \approx n_T$ (对于 N 型锗)。

N 型半导体的电阻率 ρ 为

$$\rho = \frac{1}{q n_T \mu_n}. \quad (12)$$

把(12)式代入(11)式得

$$I_0 = \frac{9 \mu_p \tau_{eff} V^2 w d}{8 \rho l^3}. \quad (13)$$

把(4)式代入(13)式得

$$I_0 = \frac{3(\mu_n + \mu_p) V^2 w d^3}{16 D_n \rho l^3}. \quad (14)$$

由(14)式得

$$\frac{\rho}{w} \left(\frac{l}{d} \right)^3 = \frac{3(\mu_n + \mu_p) V^2}{16 I_0 D_n} = \frac{q}{kT} \cdot \frac{3(\mu_n + \mu_p) V^2}{16 I_0 \mu_n}. \quad (15)$$

把锗单晶的有关物理量: $\mu_n = 3900 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 和 $\mu_p = 1900 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 代入式(15)得

$$\frac{\rho}{w} \left(\frac{l}{d} \right)^3 = 10.75 \frac{V^2}{I_0}. \quad (16)$$

如果把锗磁敏二极管的最佳正向电流和正向偏压^[4]: $I_0 = 1.25 \times 10^{-3} \text{A}$, $V = 4 \text{V}$ 代入(16)式得

$$\frac{\rho}{w} \left(\frac{l}{d} \right)^3 = 1.38 \times 10^5 (\Omega). \quad (17)$$

图 4 给出了电阻率分别取 $\rho = 50, 40, 30, 20 \Omega \cdot \text{cm}$ 时, $l/d-w$ 的关系曲线。

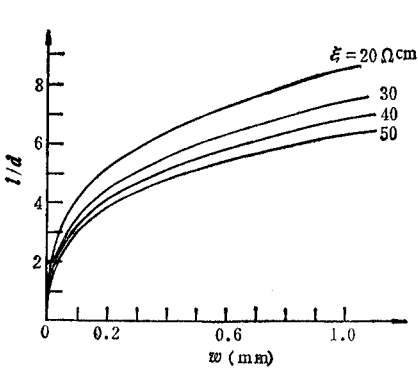


图 4 在不同电阻率下, 锗磁敏二极管的 $l/d-w$ 的关系曲线

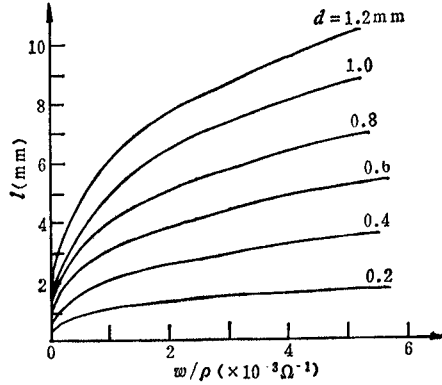


图 5 在不同厚度下, 锗磁敏二极管的 $l-w/\rho$ 关系曲线

图 5 给出了锗磁敏二极管的厚度分别取 $d = 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 \text{mm}$ 时, $l-w/\rho$ 的关系曲线。

四、讨 论

如上所述, 在 I 区的一个侧面上设置高复合区时, 在 PI 结和 NI 结到复合区应保留一定间隔, 间隔的大小一般为 $(l - l_0)/2 = 0.3-0.5 \text{mm}$ 。

最佳设计条件的选择要从磁敏二极管的磁灵敏度、功耗所产生的 I 区的温升 ΔT 以及输出能力出发, 加以全面考虑。从(7)式可以看出, 磁敏二极管的正向偏压 V 越高, 电流相对磁灵敏度越大, 但功耗也随之增大。如果宽度 w 取得小些, 则在不减小磁灵敏度的前提下, 可以减小正向电流 I_0 , 以降低功耗, 但输出能力将下降。如果长度 l_0 取小些, 则在不改变其它条件的情况下, 可以提高磁灵敏度, 但功率密度要增大。在上述诸条件中要正确选择最佳条件是比较困难的。假设磁敏二极管的 I 区允许的最大温升 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, 封装后它的热阻为 R_{th} , 那么 $I_0 V R_{th} \leq \Delta T = 10^\circ\text{C}$ 。把 $V \leq \Delta T / I_0 R_{th}$ 代入(16)式得

$$\frac{\rho}{w} \left(\frac{l}{d} \right)^3 \leq 10.75 \cdot \frac{(\Delta T)^2}{I_0^2 R_{th}^2}. \quad (18)$$

设陶瓷封装后热阻^[4] $R_{th} = 1-2^\circ\text{C}/\text{W}$, 则 $I_0 V \leq 5-10 \text{mW}$ 。若选择 $V = 4 \text{V}$, 则 $I_0 = 1.25-2.5 \text{mA}$ 。我们选择磁敏二极管的工作点: $I_0 = 1.25 \text{mA}$, $V = 4 \text{V}$ 做为设计的最佳条件。

若取 $l_0 = 3.0 \text{mm}$, $d = 0.6 \text{mm}$, 则从图 5 中可得 $w/\rho = 9.1 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$; 若 $w = 0.4 \text{mm}$, 则 N 型锗的电阻率 $\rho = 44 \Omega \cdot \text{cm}$ 。这样, 该锗磁敏二极管的尺寸: $l \times d \times w = 3.0 \times 0.6 \times 0.4 \text{mm}^3$, 这与日本 SMD 型锗磁敏二极管的尺寸^[4,5]相同。

选择 $\rho = 50 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 N 型锗单晶制成 $l \times d$ 为 $2.0 \times 0.4 \text{mm}^2$ 和 $3.0 \times 0.5 \text{mm}^2$ 的锗

磁敏二极管, 则它们的 l/d 比值分别为 5 和 6。从图 4 可以得出上述两种磁敏二极管的宽度 w 应分别为 0.5mm 和 0.8mm, 这样才能符合上述最佳设计尺寸。

表 1 给出用上两种尺寸制成的样管各选取四只, 在 $V = 4V$ 下, 测试 I_0 的结果。从表 1 可以看出, I_0 值与设计时采用的最佳工作偏流 $I_0 = 1.25mA$ 相吻合。

表 1

尺寸 (mm)	$I_0(mA)$	1	2	3	4	\bar{I}_0
2.0×0.4×0.5		1.30	1.28	1.26	1.28	1.28
3.0×0.5×0.8		1.24	1.26	1.28	1.25	1.26

参 考 文 献

- [1] В. И. Стафеев, ЖТФ, 28 (1958), 1631.
- [2] В. И. Стафеев, ФТТ, 1(1959), 848.
- [3] Э. И. Каракушан, ФТТ, 3(1961), 677.
- [4] 山田, 电子材料, 8(11), 1969, p. 92.
- [5] 新井, 山田, 电子材料; 10(12), 1971, p. 61.
- [6] I. I. Munteanu, Rev. Roum. Phys., 18(1973), 323.
- [7] 黄得星, 电子学报, 1980年, 第4期, 第43页.
- [8] M. A. Lampert and A. Rose, Phys. Rev., 121(1961), 26.
- [9] M. A. Lampert, *ibid.*, 125(1962), 126.
- [10] R. Hirota, S. Tosima and M. A. Lampert, J. Phys. Soc. Japan, 18(1963), 535.

A DESIGN OF DOUBLE INJECTION TYPE MAGNETO-DIODE

Huang Dexing

(Department of Physics, Heilongjiang University)

A new design is proposed for long P^+IN^+ type Ge magnetodiode with a high recombination region on one side. The optimal relation is established between its length (l), depth (d), width (w) and resistivity (ρ) for designing Ge magnetodiode: $(\rho/w) \times (l/d)^3 = 10.75(\Delta T)^2 / (I_0^3 R_{th}^2)$ ΔT is the limit of chip temperature rise, R_{th} the thermal resistance, I_0 the current flowing through diode.