

JFET 压磁电效应的理论分析*

温殿忠

(黑龙江大学, 哈尔滨)

摘要 本文用标准的松弛方法研究了结型场效应晶体管的压磁电效应。利用“准平面”拉普拉斯方程及有限差分法计算了不同栅电压、漏电压以及 n 沟道硅器件不同宽长比的压力灵敏度和磁灵敏度。在 $P \approx 0, B = 0$, 器件宽长比为 $w/L = 1/2-1$ 时, 电流性压力灵敏度约为: $2.5\% \cdot \text{cm}^2/\text{N}$ 。据此, 提出了一种有良好工作稳定性及噪声性能的力学量敏感器件——结型场效应力敏管(Junction field effect-pressure sensor)。

关键词 JFET 压阻效应; 压磁电效应; 松弛方法; 有限差分法

一、引言

自 1954 年史密斯研究了半导体锗和硅的压阻效应以来, 压阻效应引入了微电子学领域。1961 年塔夫脱把四个压敏电阻组成的惠斯登电桥用扩散的方法制作在一体化的硅膜片上, 构成了压力传感器, 此后, 压阻效应得到了日益广泛的应用^[1-2]。

在微电子学领域中霍耳效应的研究也十分活跃^[3-4], MOS 霍耳效应集成电路和双极霍耳集成电路都已达到实用阶段。1980 年文献 [5] 又研究了结型场效应晶体管的霍耳效应, 提出了结型场效应霍耳管的设计。

本文进一步研究了结型场效应晶体管的压磁电效应。当 $B = 0$ 时, 与几何尺寸相同的硅扩散电阻相比, 结型场效应器件避开了表面效应, 迁移率为体迁移率, 在同样的功耗下, 具有较低的噪声和较高的稳定性。根据 $P \approx 0, B \approx 0$ 时的计算结果, 设计了一种压力和磁场共存情况下的测试器件。称为结型场效应压力-霍耳管 (JFE-pressure-Halltron)。

二、器件基本方程式

选用横截面为矩形的棒状硅材料, 制成 n 沟道、均匀掺杂、双 p^+-n 结栅硅结型场效应压力-霍耳管, 其结构如图 1 所示, 源极接地, 漏极接电源 $V_{DS} > 0$, 栅极接栅电压 $V_G < 0$ 的偏压。

为简单起见, 只考虑在 x 方向上施加应力使器件单轴拉伸或单轴压缩, 依一般规定,

* 1987 年 11 月 22 日收到, 1988 年 8 月 26 日修改定稿。

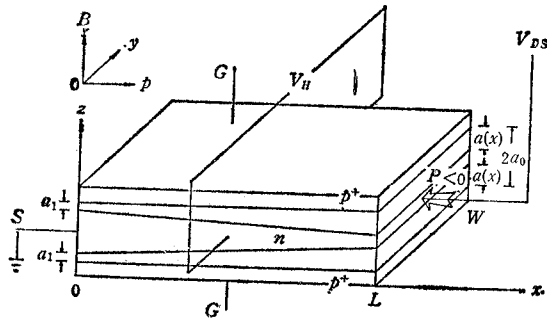


图 1 应力和磁场作用下的 JFET 结构

单轴拉伸时 $P > 0$, 单轴压缩时 $P < 0$. 对应力 $P \ll 10^5 \text{N/cm}^2$, 即不考虑压结效应的小注入情况下, 可以采用缓变沟道近似及常迁移率条件确定器件的基本方程式.

1. $P = 0, B = 0$

当沟道中不存在载流子密度梯度时, 由欧姆定律可得到沟道任一截面处的电流强度为:

$$I_{DS} = qN_D W [2a_0 - 2a(x)] \mu_n E_x = 2q\mu_n N_D W a_0 [1 - \beta(x)] E_x \quad (1)$$

式中

$$\beta(x) = \frac{a(x)}{a_0} \quad (2)$$

$$a(x) = \left\{ \frac{2\epsilon_S \epsilon_0}{qN_D} [V(x) + |V_{GS}| + |V_{bi}|] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

$$a_0 = \left[\frac{2\epsilon_S \epsilon_0}{qN_D} V_P \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$V_P = V_{DS} + |V_{GS}| + |V_{bi}| \quad (5)$$

因为

$$a_1 = \left[\frac{2\epsilon_S \epsilon_0}{qN_D} (|V_{GS}| + |V_{bi}|) \right]^{1/2} \quad (6)$$

令

$$\beta_1 = \frac{a_1}{a_0} \quad (7)$$

注意到

$$E_x = - \frac{dV}{dx} \quad (8)$$

$$V = \begin{cases} 0 & (x = 0) \\ V_D & (x = L) \end{cases} \quad (9)$$

对(1)式自 $0-L$ 积分可得到:

$$I_{DS} = G_0 \frac{V_P}{3} \{1 - 3\beta_1^2 + 2\beta_1^3\} = \frac{G_0 V_P}{3} \cdot \eta \quad (10)$$

式中

$$G_0 = -\frac{2q\mu_n N_D a_0 W}{L} \quad (11)$$

$$\eta = 1 - 3\beta_1^2 + 2\beta_1^3 \quad (12)$$

再由电流连续性原理得到:

$$2\beta^3(x) - 3\beta^2(x) + \eta\left(\frac{x}{L} - 1\right) + 1 = 0 \quad (13)$$

上式的解为^[5-6]

$$\beta(x) = \cos \frac{1}{3} \{2\pi n + \pi + \arctan Q\} \quad (14)$$

式中

$$Q = \frac{[0.0625 - \xi^2]^{1/2}}{\xi} \quad (15)$$

$$\xi = 0.25 + \frac{\eta}{2} \left(\frac{x}{L} - 1\right) \quad (16)$$

$$n = 0, 1, 2$$

选取其中满足 $0 \leq \beta(x) \leq 1$ 的解。以上各式的推导不在此重述。

2. $\mathbf{P} \approx \mathbf{0}$, $\mathbf{B} = \mathbf{0}$

为确定起见,设器件单向压缩或拉伸是纵向的,即电流沿应变轴方向,则沟道电阻率先由下式确定:

$$\rho_{ik}^i = \rho_{ik}^0 \left(1 + \sum_{lm} \pi_{iklm} P_{lm}\right) \quad (17)$$

式中压力方向为 $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$ 时,应力张量 $\mathbf{P}_{ik} = -P n_i n_k$, π_{iklm} 为压阻系数, $(\rho_{ik}^i - \rho_{ik}^0)$ 为外力作用引起半导体电阻率的变化。

因为 I_{DS} 方向与应力方向平行,所以有

$$E_i = \sum_k \rho_{ik}^i J_k = \sum_k \rho_{ik}^0 \left(1 - \sum_{lm} \pi_{iklm} n_l n_m\right) J_k n_k \quad (18)$$

x 方向的电阻率为

$$\rho(x) = \rho_x^0 (1 - P \pi_x) \quad (19)$$

式中

$$\frac{1}{\rho_x^0} = 2q\mu_n N_D a_0 [1 - \beta(x)] = \sigma^0(x) \quad (20)$$

由(10)式可得到 x 方向电场分量

$$E(x) = \frac{V_p \cdot \eta}{3L[1 - \beta(x)]} \quad (21)$$

故:

$$I_{DS} = \frac{w E_x}{\rho(x)} = \frac{w V_p \cdot \eta}{3L[1 - \beta(x)] \rho^0(x) (1 - P \pi_x)} = \frac{G_0 V_p \cdot \eta}{3(1 - P \pi_x)} \quad (22)$$

3. $P = 0, B \approx 0$

这种情况是文献[5]讨论过的结型场效应霍耳管,本文不再赘述。

4. $P \approx 0, B \approx 0$

外力和磁场方向如图 1 所示,只要 $a_0 \ll L, W$, 则可按“准平面”近似处理,可由二维拉普拉斯松弛方程确定沟道内 (x, y) 平面上的二维电势分布:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) = 0 \quad (23)$$

令硅材料中某一点在形变前的矢径为 \mathbf{r} , 形变后的矢径为 \mathbf{r}' , 则形变或位移矢量 $\mathbf{u} = \mathbf{r}' - \mathbf{r}$, 故式中 σ 可由下式逐一确定:

$$\sigma_{ik} = \frac{1}{\rho_{ik}(\mathbf{u}, \mathbf{B})} \quad (24)$$

若 \mathbf{u} 作为硅晶体中点的坐标的函数 $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ 已被确定, 就能充分地描述形变物体的状态, 可借助于应变张量 u_{ik} 来描述:

$$\mathbf{u} \approx \sum_{ik} u_{ik} n_i n_k \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \rho_{ik}(\mathbf{u}, \mathbf{B}) = & \rho_{ik}^0 \left[1 + \sum_{lm} (\pi^{-1})_{iklm} u_{lm} \right] + \left\{ \left[\sum_l \sigma_{ikl} + \sum_{lmn} \sigma_{iklmn} u_{mn} \right] \mathbf{B}_l \right\} \\ & + \left\{ \left[\sum_{lm} \sigma_{iklm} + \sum_{lmnp} \sigma_{iklmnp} u_{np} \right] \mathbf{B}_l \mathbf{B}_m \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

式中张量 σ_{ikl} 和 σ_{iklm} 分别描述霍耳电导和磁阻效应, 而 σ_{iklms} 和 σ_{iklmnp} 则分别描述横向和纵向压磁效应。

将有应变的器件沟道置于磁场中, 则沟道中的电流密度为:

$$J_i = \sum_{k=1}^3 \sigma_{ik}(\mathbf{u}, \mathbf{B}) E_k \quad (27)$$

另一方面, 因霍耳电流的出现, 有如下一般电流方程:

$$E_x(x, y)|_{P=C} = - \frac{\partial V(x, y)}{\partial x} = \frac{J_x(x, y)}{\sigma} - \frac{J_y(x, y)}{\sigma} \mu B \quad (28)$$

$$E_y(x, y)|_{P=C} = - \frac{\partial V(x, y)}{\partial y} = \frac{J_y(x, y)}{\sigma} + \frac{J_x(x, y)}{\sigma} \mu B \quad (29)$$

注意到如下边界条件:

$$V(x, y) = \begin{cases} 0 & (x = 0) \\ V_{DS} & (x = L) \end{cases} \quad (30)$$

$$J_y|_{y=0, W, P=C} = 0 \quad (31)$$

$$E_x|_{y=0, W, P=C} = \frac{J_x}{\sigma} \Big|_{y=0, W, P=C} \quad (32)$$

$$E_y|_{y=0, W, P=C} = \mu_n B E_x|_{y=0, W, P=C} \quad (33)$$

将(21)式代入上式得到:

$$E_y|_{y=0, W, P=C} = \frac{\mu_n B V_P}{3L} \cdot \frac{\eta}{1 - \beta(x)} \quad (34)$$

再将图 1 中的 JFET x 区间 $[0, L]$ 以及 y 区间 $[0, W]$ 分别按以下编号作细小均等分:

$$\begin{cases} x = 0, x_{1/2}, x_1, x_{1+1/2}, \dots, x_{i-1}, x_{i-1/2}, x_i, x_{i+1/2}, \dots, L \\ x_i - x_{i-1/2} = \Delta/2 = \text{常数}; i = 1, 2, 3, \dots, m \\ y = 0, y_{1/2}, y_1, y_{1+1/2}, \dots, y_{j-1}, y_{j-1/2}, y_j, y_{j+1/2}, \dots, W \\ y_j - y_{j-1/2} = \Delta/2 = \text{常数}; j = 1, 2, 3, \dots, n \end{cases}$$

利用这种由多个不连续的点构成的网模型, 则一阶微商的有限差分可表示为

$$\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \Big|_{i,j} \rightarrow \frac{\sigma(x_i)}{\Delta} [V(x_{i+1/2}, y_j) - V(x_{i-1/2}, y_j)] \quad (35)$$

$$\sigma \frac{\partial V}{\partial y} \Big|_{i,j} \rightarrow \frac{\sigma(x_i)}{\Delta} [V(x_i, y_{j+1/2}) - V(x_i, y_{j-1/2})] \quad (36)$$

显然, 二阶微商是不难得到的, 这样, 用(30), (34), (19), (14), (26)式求解(27)式可采用标准的偏微分有限差分法进行^[7-8]. 在外力 P 为常量的情况下, 由(23)和(28)式得电势在 $x = x_i, y = y_j$ 格点满足的有限差分方程 F_{ij} :

$$\begin{aligned} F_{ij} = & \frac{1 + Q_{i-1}}{2} V(x_{i-1}, y_j) + V(x_i, y_{i-1}) \\ & - \frac{6 + Q_{i-1} + Q_{i+1}}{2} V(x_i, y_j) + V(x_i, y_{j+1}) \\ & + \frac{1 + Q_i + 1}{2} V(x_{i+1}, y_j) \end{aligned} \quad (37)$$

式中

$$Q_{i,\pm 1} = \frac{\sigma_{ik}(x_{i\pm 1})}{\sigma_{ik}(x_i)} \quad (38)$$

$$\sigma\left(x_i \pm \frac{1}{2}\right) \approx \frac{\sigma(x_{i\pm 1}) + \sigma(x_i)}{2} \quad (39)$$

三、结果与讨论

1. E_x 与 x/L 和 V_H 与 $x/L, W/L, V_{GS}$ 的关系

一组实际计算如下:

$P = 1.0001\text{N}/\text{cm}^2, B = 0.1\text{T}, T = 300\text{K}, N_D = 2.5 \times 10^{14}/\text{cm}^3, |V_{bi}| = 0.825\text{V}, V_P = 12.025\text{V}, \mu = \mu_H = 1.5 \times 10^3 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}, v = 0.35, W/L = 0.5, 0.75, 1.00, V_{GS} = 0, 2.8, 5.6, 8.4\text{V}, V_{DS} = 6\text{V}, V_H$ 与 $x/L, W/L, V_{GS}$ 之间关系的数值结果如图 2 所示。由图可见, 在 $x = 0$ 和 $x = L$ 处, 由于霍耳电压的“短路效应”, 在源和漏处的霍耳电压为零; 霍耳电压 $V_H(x)$ 随 W/L 的增大而增加; 但有应力作用时, $\Delta V_H(x)$ 却随 W/L 的增大而减小。图 3 给出了应力 $P = 0, P > 0$ 和 $P < 0, B = 0.1\text{T}, |P| = 2.0002\text{N}/$

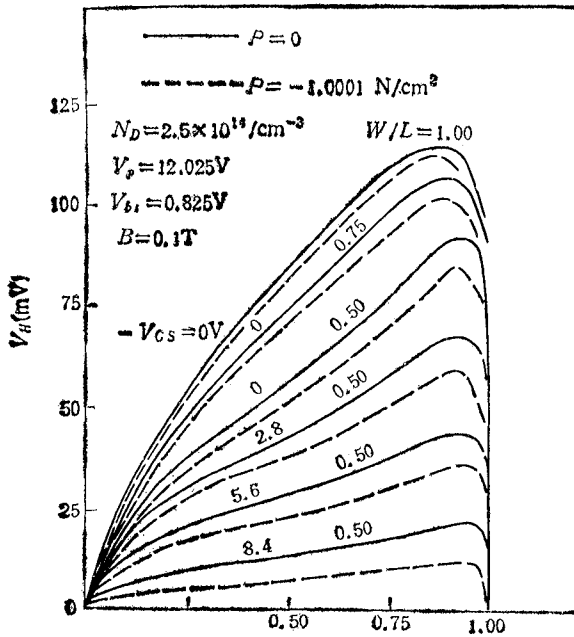


图 2 V_H 与 x/L , W/L , V_{GS} 在 P 为常数时的关系

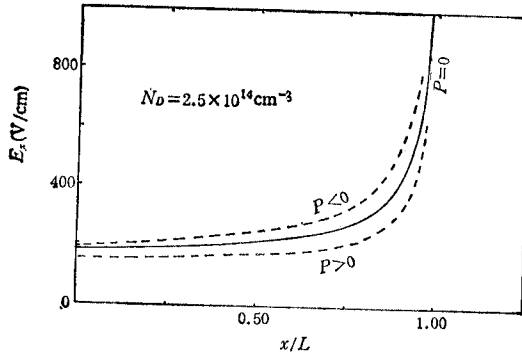


图 3 有应力 P 作用时 E_x 与 x/L 的关系

cm^2 时 E_x 与 x/L 的数值结果。

结果表明,单轴压缩或拉伸器件 n 型沟道的电阻,对霍尔电压 $V_H(x)$ 以及电场 E_x 都有明显的影响。影响的程度与 W/L 有关。在 W/L 一定的情况下,可由 V_{GS} 来控制。单轴压缩时, σ 减小,则 E_x 增大,反之亦然。

2. 本文提出的结型场效应力敏管,在利用各向异性腐蚀技术研制 C 型或 E 型硅杯方面,有着广泛的应用领域^[9-10]。

在电阻率 ρ 为 $8-10\Omega \cdot \text{cm}$ 的 p 型 (100) 晶面硅单晶片上,利用 IC 技术将四个图 1 所示的 JFET 按图 4(a) 所示的电桥制造在同一管芯上,再采用硅各向异性腐蚀技术形成图 4(b) 所示的 C 型硅杯式结型场效应力敏器件。这种力敏器件除了具有场效应器件的优点以外,还有一个突出的优点,就是使该器件上四个桥臂 JFET 工作在非饱和区, n 型

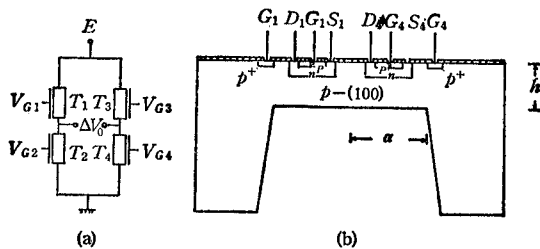


图4 由四个 JFET 构成的 C 型硅杯式压力传感器结构

沟道均未夹断,这样就可以直接通过调节栅压达到调零的目的,并且每一个 n 沟道都是一个受应力而变化的力敏电阻。

(1) 压阻系数 π_{iklm} 计算任意晶向的纵向压阻系数和横向压阻系数的公式为^[11]

$$\pi_{\parallel} = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + m_1^2 n_1^2 + l_1^2 n_1^2) \quad (40)$$

$$\pi_{\perp} = \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \quad (41)$$

式中 l, m, n 为方向余弦。

当有外力沿 $\langle 100 \rangle$ 晶向作用于硅管芯表面时,为了使图 4 所示的 C 型硅杯上面四个 JFET 构成的电桥输出 ΔV_0 最大,可将 T_1, T_4 的 n 沟道设计在沿 $\langle 011 \rangle$ 晶向,而 T_2, T_3 的 n 沟道设计在沿 $\langle 0\bar{1}1 \rangle$ 晶向。设 $\langle 011 \rangle$ 与 $\langle 0\bar{1}1 \rangle$ 晶向的方向余弦分别为 l_1, m_1, n_1 和 l_2, m_2, n_2 , 它们都可由下式算出:

$$d_{h1k} = \left(\frac{a^2}{h^2 + l^2 + k^2} \right)^{1/2} \quad (42)$$

求得 $l_1 = 0, m_1 = 1/\sqrt{2}, n_1 = 1/\sqrt{2}; l_2 = 0, m_2 = -1/\sqrt{2}, n_2 = 1/\sqrt{2}$, 故

$$\pi_{\parallel} = \frac{1}{2} (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}) \quad (43)$$

$$\pi_{\perp} = \frac{1}{2} (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}) \quad (44)$$

在室温下, n 型硅的 $\pi_{11} = -102.2 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{N}$, $\pi_{12} = +53.4 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{N}$, $\pi_{44} = -13.6 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{N}$ 。用同样方法可以得到任意晶向的纵向压阻系数与横向压阻系数。

(2) 压力灵敏度 S_P 漏电流在恒压源供电情况下,由于应力作用而发生变化,可以用电阻率的相对变化率或 n 沟道电阻的相对变化率来表示,即压力灵敏度为

$$S_P = \frac{\rho_P - \rho_0}{\rho_0} \times 100\% = \frac{\Delta R}{R} \times 100\% \quad (45)$$

n 沟道漏电流方向上的纵向压阻系数 π_{\parallel} 与垂直于 n 沟道漏电流方向的横向压阻系数 π_{\perp} 求出以后,如果 n 沟道同时有纵向应力 σ_{\parallel} 与横向应力 σ_{\perp} 的作用,则在此晶向上的电阻率可由下式求得

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_{\parallel} \sigma_{\parallel} + \pi_{\perp} \sigma_{\perp} \quad (46)$$

在有效半径为 α 的弹性圆形膜片上,纵向应力与横向应力应该根据圆形硅弹性膜片

上各点的径向应力与切向应力来决定,即(46)式变为

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_{\parallel} \sigma_r + \pi_{\perp} \sigma_{\theta} \quad (47)$$

式中

$$\sigma_r = \frac{3P}{8h^2} [(1 + \nu)\alpha^2 - (3 + \nu)r^2] \quad (48)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{3P}{8h^2} [(1 + \nu)\alpha^2 - (1 + 3\nu)r^2] \quad (49)$$

P 为压力, r 为计算点半径, h 为硅膜片厚度, ν 为泊松系数,对硅来讲 $\nu = 0.35$ 。将求得的 $\langle 011 \rangle$ 晶向与 $\langle 0\bar{1}1 \rangle$ 晶向的纵向压阻系数与横向压阻系数以及(48)式和(49)式都代入(47)式,得到:

$$\left| \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_r \right| \approx \left| \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{\theta} \right| \approx \pi_{\parallel} \frac{3Pr^2}{8h^2} (1 + \nu) \quad (50)$$

计算中采用将图 1 所示的四个 JFET 放在圆形硅膜片的边缘处,即 $\alpha = r$, 且两两互相垂直。当 $P = 1\text{N/cm}^2$, $\alpha = 0.5\text{cm}$, $h = 50 \times 10^{-4}\text{cm}$ 时,算得

$$\left| \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_r \right| = \left| \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{\theta} \right| \approx 0.025$$

故

$$S_p \approx 2.5\% \cdot \text{cm}^2/\text{N}$$

四、结 论

通过对 JFET 压磁电效应的理论分析,提出了一种在压力和磁场共存情况下的结型场效应敏感器件。这种新器件利用半导体平面工艺和硅各向异性腐蚀技术相结合就可以制造出来。理论计算结果表明,作为一种 $p-n$ 结控场效应压力-霍尔器件,有很高的压力-磁灵敏性,并具有结型场效应管的共同优点,当四个工作在非饱和区的 JFET 组成电桥制成 C 型硅杯式压力传感器时,可以不用串、并联电阻直接通过调整栅压达到调零的目的,为实现压力和磁场同时测试技术的智能化、为进一步研制高稳定性和高可靠性的压力传感器、为硅压力传感器的桥臂对称技术开拓了道路。

感谢黄得星教授对本工作的支持。

参 考 文 献

- [1] M. Esashi, et al., *Sensors and Actuators*, **4**(1983), 537—544.
- [2] K. Suzuki et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-34** (1987) 6, 1360—1366.
- [3] G. R. Mohan Rao, W. N. Carr, *Solid-State Elect.*, **16**(1973), 483—485.
- [4] R. S. Hemert, *Solid-State Elect.*, **17**(1974), 1039—1042.
- [5] 阮英超,半导体学报, **1**(1980)2,107—120.
- [6] 中科院沈阳计算技术研究所编,电子计算机常用算法,科学出版社, 1976.
- [7] G. E. Forsythe, W. R. Wasow, *Finite-Difference Methods for Partial Differential Equations*.

New York, Wiley, 1960.

- [8] 温殿忠, 黄得星, 黑龙江大学学报, 1985年, 第1期, 第47—52页.
- [9] 温殿忠, 传感器技术, 1988年, 第1期, 第35—38页.
- [10] 温殿忠等, 力敏传感器设计与研制学术论文集, 1987, 78—84.
- [11] 南京航空学院, 北京航空学院合编, 传感器原理, 国防工业出版社, 1983年, 第241—247页.

THEORETICAL ANALYSIS OF THE PRESSURE- MAGNETOELECTRIC EFFECT OF JFET

Wen Dianzhong

(Heilongjiang University, Harbin)

Abstract The pressure-magnetolectric effect of JFET is discussed by using standard relaxation techniques. A theoretical evaluation of the pressure sensitivity and Hall sensitivity of the n -channel silicon JFET with various geometries (W/L), gate voltages (V_{GS}) and drain voltages (V_{DS}) is made. The results show that when $\mathbf{P} \approx 0, \mathbf{B} = 0$, the current-pressure sensitivity is about $2.5\% \cdot \text{cm}^2/\text{N}$, supposing $W/L = 1/2 - 1$. A junction field effect-pressure sensor with high stability and low noise is designed.

Key words Tensoresistive effect of JFET; Pressure-magnetolectric effect; Relaxation technique; Finite-difference numerical method