

磁敏二极管的数值模拟

韩峰岩 余启华

(空军工程学院理化教研室, 西安)

1989年12月1日收到

本文首次实现了具有高复合表面的磁敏半导体器件的数值模拟;探讨了适合于数值模拟的磁敏半导体器件的边界条件及基本方程的定标方法。所得结果与实验数据基本相符,可以说明器件的内部机理,对磁敏器件的优化设计有指导意义。

主题词 磁敏器件,磁敏二极管,数值模拟

一、引 言

目前,磁敏半导体器件的研制非常活跃,但是,由于磁敏半导体器件本身的复杂性,单纯的分析研究已经不能满足器件研制的需要^[1]。数值模拟不仅可以帮助理器件内部机理,预测器件性能,还可以对器件进行优化设计。无磁场情况下,半导体器件的数值模拟已经比较成熟;但是,有磁场情况下,洛仑兹效应与边界条件的强烈耦合,给数值模拟带来很大困难。本文提出了适合于数值模拟的磁敏半导体器件的边界条件及方程的定标方法;首次实现了具有高复合表面的磁敏半导体器件的数值模拟。所得结果与实验数据基本相符,可以说明器件的内部机理,对磁敏器件的优化设计具有指导意义。

二、数 学 模 型

图1是我们所模拟的磁敏二极管的模型图^[2]。它有一个近于本征的长基区和两个PN结。它的一个侧面是人为设置的高复合表面,与之相对的是复合速度很小的近理想表面。

半导体器件内部电势及载流子分布由 Poisson 方程及载流子连续性方程决定。对于稳态情形,方程为:

$$\lambda^2 \nabla^2 \phi + (N + p - n) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot J_n - R = 0 \quad (2)$$

$$-\nabla \cdot J_p - R = 0 \quad (3)$$

式中, n 、 p 分别是电子和空穴浓度; N 是净掺杂浓度; J_n 、 J_p 分别是电子和空穴的电流密度; ϕ 是电势; R 是复合率。 λ 是定标过程中得出的参数,将在后面说明。

对于不太强的磁场,电流密度表达式为:

$$J_n = -\mu_n n \nabla \phi + D_n \nabla n - J_n \times \beta_n \quad (4)$$

$$J_p = -\mu_p p \nabla \phi - D_p \nabla p + J_p \times \beta_p \quad (5)$$

其中, μ_n , μ_p 分别是电子和空穴的迁移率; D_n , D_p 分别为电子和空穴的扩散系数.

$\beta_n = \mu_n^* B$, $\beta_p = \mu_p^* B$, 而 μ_n^* , μ_p^* 分别为电子和空穴的 Hall 迁移率.

方程式(4)、(5)给出了电流密度的隐含关系式. 当 $J_n \perp B$, $J_p \perp B$, 且 β_n , β_p 较小时, 电流密度表达式可改写为:

$$J_n = \frac{1}{1 + \beta_n^2} [-\mu_n n \nabla \phi + D_n \nabla n + \beta_n \times (-\mu_n n \nabla \phi + D_n \nabla n)] \quad (6)$$

$$J_p = \frac{1}{1 + \beta_p^2} [-\mu_p p \nabla \phi - D_p \nabla p - \beta_p \times (-\mu_p p \nabla \phi - D_p \nabla p)] \quad (7)$$

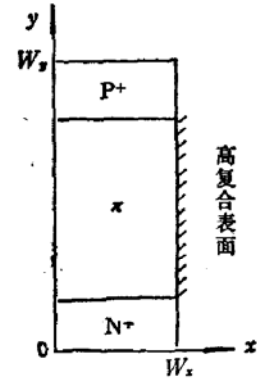


图1 磁敏二极管模型图

方程中的物理参数都采用通常的模型:

$$R = \frac{np - n_i^2}{\tau_n(p + p_1) + \tau_p(n + n_1)} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{\tau_0}{1 + N/N^{\text{ref}}} \quad (9)$$

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + (N/N^{\text{ref}})^a} \quad (10)$$

$$\mu^* = \gamma \mu \quad (11)$$

其中的常数值参阅文献[3].

为了确定基本方程的解, 必须给出边界条件. 设器件两端为理想欧姆接触, 则有:

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (12)$$

$$N + p - n = 0 \quad (13)$$

$$\phi = V_e + \sinh^{-1}(N/2n_i) \quad (14)$$

其中, n_i 为本征载流子浓度, V_e 为外加电压.

设 $x = 0$ 的表面为理想表面, 由于电流密度的垂直分量为零, 故有:

$$J_{nx} = 0 \quad (15)$$

$$J_{px} = 0 \quad (16)$$

但是, 零电场垂直分量的假设却与 Hall 电压的存在相矛盾. 空间电荷二阶导数为零的假设是合适的^[3].

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (N + p - n) = 0 \quad (17)$$

高复合表面 ($x = w_x$) 的边界条件比较复杂, 且对结果的影响比较大. 我们设其复合速度为无限大, 提出如下的边界条件:

$$n = n_0 \quad (18)$$

$$p = p_0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0 \quad (20)$$

其中, n_0 、 p_0 为平衡时边界处载流子浓度。

以上的方程和边界条件都是定标后的表达式。所用的定标因子见表 1。这种定标方法对防止溢出, 提高精度和计算效率有一定作用。方程式(1)中的 λ 是定标过程中得出的一个参数, 其表达式为: $\lambda^2 = \varepsilon V_T / q C_0 W_0^2$ 。

表 1 定标因子及其意义

定标物理量	定标因子符号	定标因子意义
x, y, W_x, W_y	W_0	器件的长度
ϕ	V_T	热电势 kT/q
n_i, n, p, N	C_0	$\max N(x, y) $
D_n, D_p	D_0	$1 \text{ cm}^2/\text{s}$
μ_n, μ_p	μ_0	D_0/V_T
R	R_0	$D_0 C_0 / W_0^2$
τ_n, τ_p	τ_0	$\varepsilon V_T / q C_0 D_0$
J_n, J_p	J_0	$q D_0 C_0 / W_0$

三、数值方法

为求得数值解, 首先将区域进行适当的剖分, 剖分得到的网格点标记为 $i=1, 2, 3, \dots, M$ 。并记 $\phi = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_i, \dots, \phi_M)$, $n = (n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_M)$, $p = (p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_M)$ 。用推广的 Scharfetter-Gummel 方法将方程离散, 离散后的方程记为:

$$f_i(\phi, n, p) = 0 \quad (21)$$

$$g_i(\phi, n, p) = 0 \quad (22)$$

$$h_i(\phi, n, p) = 0 \quad (23)$$

i 从 1 变到 M 。

这是一个非线性方程组, 解方程时先用 Newton 法线性化, 记:

$$X = (\phi, n, p)^T \quad (24)$$

$$G = (f_1, \dots, f_M, g_1, \dots, g_M, h_1, \dots, h_M)^T \quad (25)$$

$$K = \frac{dG}{dX^T} \quad (26)$$

则 Newton 法的格式可写为:

$$K(X_k) \delta X = -G(X_k) \quad (27)$$

$$X_{k+1} = X_k + \delta X \quad (28)$$

考虑到内存的限制, 解线性方程组(27)时用逐次线超松弛法 (SLOR 法)。图 2 是计

算过程的流程图。

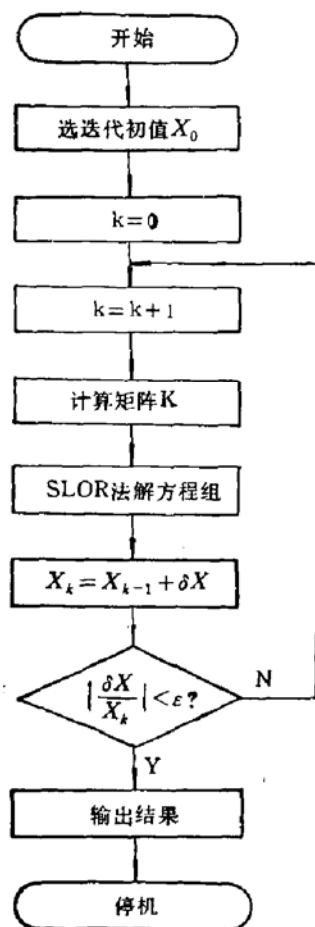


图2 程序流程图

四、结果与讨论

1. 载流子分布

图3图4是所模拟的磁敏二极管的载流子分布图。从图中可以看出,在一定偏压下,增大磁场强度,载流子浓度降低。这是由于洛伦兹力使更多的载流子在高复合边界复合掉的缘故,是这种器件的主要机理。为了设计出高灵敏度的器件,器件两个侧面复合速度之差要尽可能大,同时对器件的几何尺寸有一定要求。载流子浓度在高复合表面附近变化剧烈,严重影响数值解的稳定性,是这种器件模拟困难的一个原因。

2. 伏安特性与磁灵敏度

图5是磁敏二极管的伏安特性曲线,其中+和×代表实验数据。数值结果与实验数据基本一致,误差小于10%。磁敏二极管的磁灵敏度定义为:

$$S_I = \frac{I_B - I_0}{I_0 B} \times 100\% \quad (29)$$

其中, I_0 为无外加磁场时电流强度, I_B 为外加磁场 B 时的电流强度。

从图6可以看出,磁灵敏度随偏压变化,当外加偏压足够高时灵敏度才比较高,且比较稳定。

磁灵敏度与器件的几何尺寸关系很大,表2、表3是灵敏度与几何尺寸关系的数值结

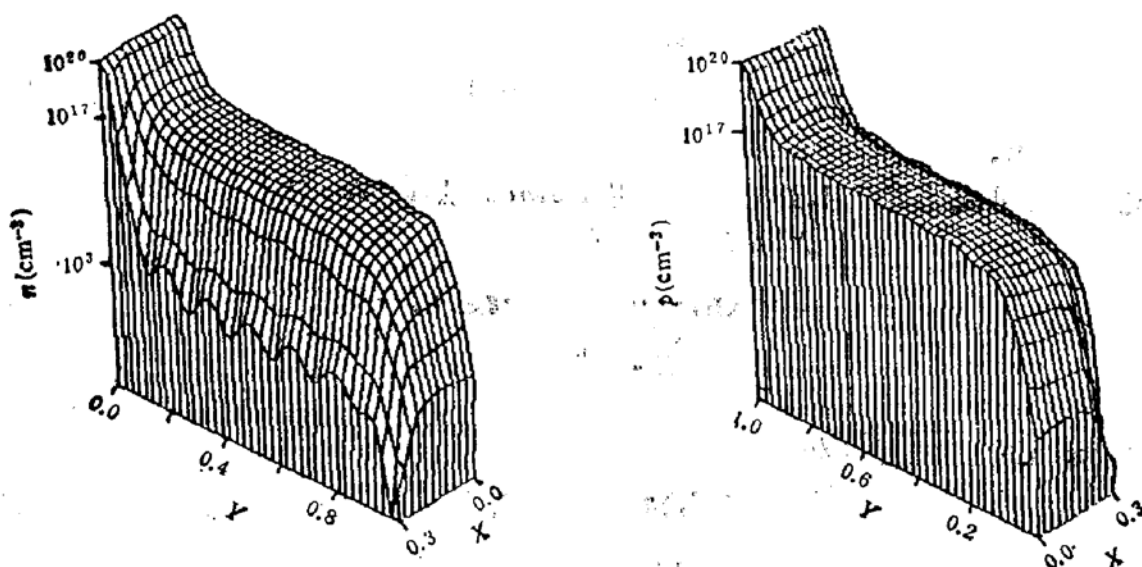


图3 $V = 4.0V$, $B = 0.1T$ 时载流子分布图,为清楚显示,图底部做了截断处理

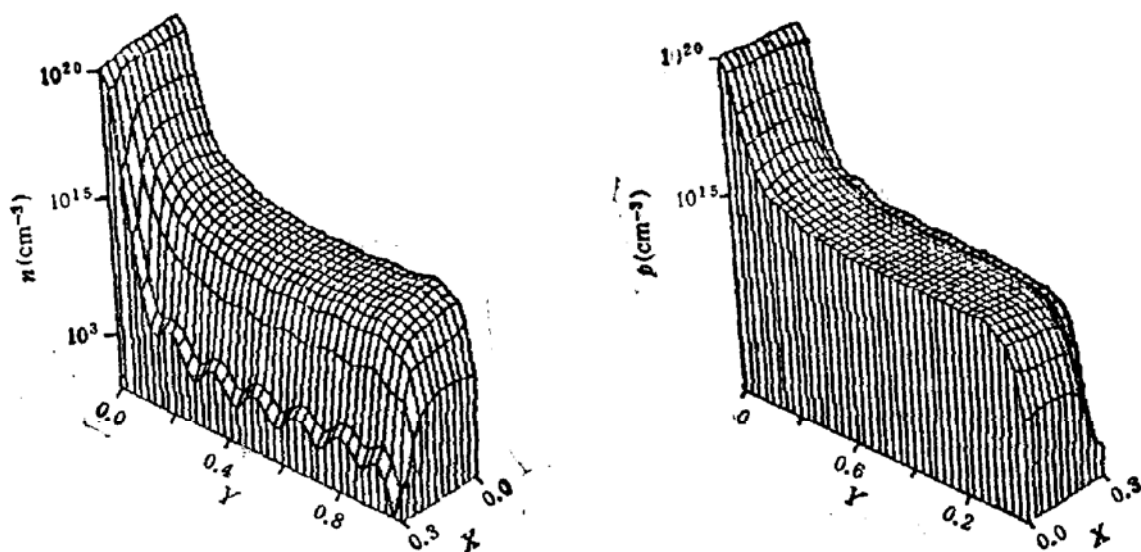


图4 $V = 4.0\text{V}$, $B = 0.2\text{T}$ 时载流子分布图,为清楚显示,图底部做了截断处理

果,从表中可以看出,磁灵敏度在 $W_x = 30\mu\text{m}$, $W_y = 100\mu\text{m}$ 附近有一个峰值。这与实验结果比较接近,可以做如下的理论解释。这和器件的主要机理是边界复合效应,为了有效复合,器件的宽度应小于载流子扩散长度,而器件长度要大于扩散长度;但是,宽度太小,长度太大又会影响注入效率和工作电流而使灵敏度降低。据估算,这种器件电子和空穴的扩散长度分别为 $L_n \approx 70\mu\text{m}$, $L_p \approx 30\mu\text{m}$ 。

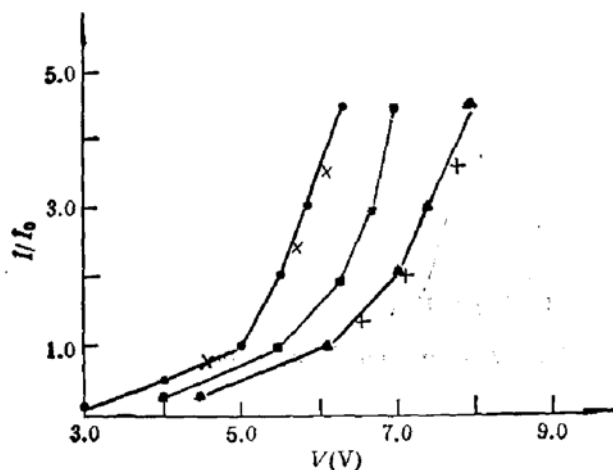


图5 磁敏二极管伏安特性曲线

图中×和+代表实验数据

● $B = 0\text{T}$ ■ $B = 0.1\text{T}$ ▲ $B = 0.2\text{T}$

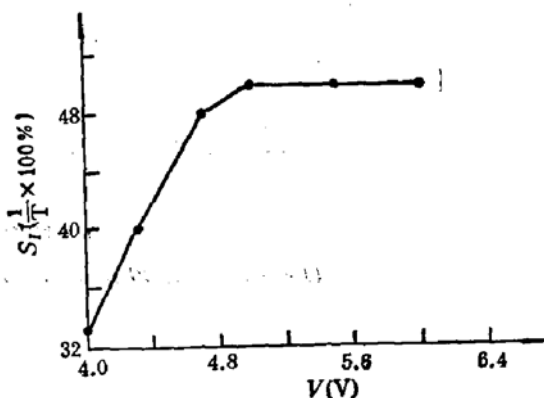


图6 磁敏二极管磁灵敏度曲线

表2 S_I 与 W_y 关系 ($W_x = 30\mu\text{m}$, $V = 4.5\text{V}$)

$W_y(\mu\text{m})$	50.0	80.0	100.0	110.0	120.0
$S_I(\%)$	26.5	45.6	48.2	48.0	47.2

表3 S_I 与 W_x 关系 ($W_y = 100\mu\text{m}$, $V = 4.5\text{V}$)

$W_x(\mu\text{m})$	20.0	25.0	30.0	40.0	60.0
$S_I(\%)$	47.8	48.0	48.2	40.0	21.1

3. 计算费用

本问题的计算费用较高。收敛速度较慢主要是由器件本身的复杂性决定的,同时收敛速度还受外加磁场、外加偏压、迭代初值以及迭代松弛因子等因素的影响。由于载流子在高复合边界附近变化剧烈,就需要比较细的局部剖分,因此要占用较多的内存空间。

我们所用的计算机是 IBM-4381 机,内存为 16Mb 指令周期为 68ns。为了得到一个具有足够精度的解,一般需要 10—20 个 Newton 迭代循环,而每个 Newton 循环又需要 15—30 个 SLOR 循环,这大概需要 30—50 分钟的计算时间。在每次计算过程中需要 3Mb 的内存空间。

具有高复合表面的磁敏二极管数值模拟的困难在于寻求稳定有效的模型和算法,实践证明本文所采用的方法是成功的。本文所得结果可以帮助理解磁敏二极管的内部机理,对器件的优化设计有指导意义。

目前实现的磁敏半导体器件数值模拟方案的计算费用还比较高,有必要探索占用内存及机时少,数值稳定性好的模拟方案。

参 考 文 献

- [1] L. Andor, H. Baltes, A. Nathan and H. G. Schmidt-Weinmar. *IEEE Trans. Electron Device*, ED-31, 1224 (1985).
- [2] 黄得星,“磁敏感器件及其应用”,科学出版社(1987).
- [3] 赛尔勃赫,“半导体器件的分析与模拟”,上海科学技术文献出版社(1988).

Numerical Modeling of Magnetodiode

Han Fengyan and Xu Qihua

(Department of Physics, Air Force College of Engineering Xi'an, China)

Abstract

A special magnetodiode with high recombination rate surface has been modeled for the first time. Boundary conditions and scaling method which are proper for numerical modeling of semiconductor magnetic field sensitive devices have been put forward. Our results are in agreement with the experimental data, and are very useful for the optimization of semiconductor magnetic field sensitive devices.

Key words Magnetic sensor, Magnetodiode, Numerical modeling