

InSb 磁敏电阻器导电机理及可靠性*

张之圣 胡 明 刘志刚 王文生

(天津大学电子工程系 天津 300072)

摘要 本文详细讨论了 InSb 磁敏电阻器的导电机理,在文献[1]、[2]的基础上,提出了提高它的灵敏度的途径.本文首次研究了 InSb 磁敏电阻器的可靠性,通过可靠性寿命试验,其失效率 $\lambda(t) < 1 \times 10^{-5}/h$.

EEACC: 2520D

1 引言

磁敏电阻器是一种磁电转换元件,它是根据霍尔效应和磁阻效应的原理制成的.早在 1883 年就发现了金属导体内磁阻效应.五十年代对 III-V 族化合物半导体进行了研究,发现 InSb 等材料具有极高的迁移率,促进了磁敏电阻器的开发.近年来,磁敏电阻器得到了广泛的应用,如检测杂散的磁场强度,磁场分布及方向,测量位移、角度、转速等;在计算技术方面,用作函数发生器、乘法器、除法器、开立方器等;此外,由于磁敏电阻输出功率与电流、磁场乘积成比例,用作功能敏感元件的潜力很大.

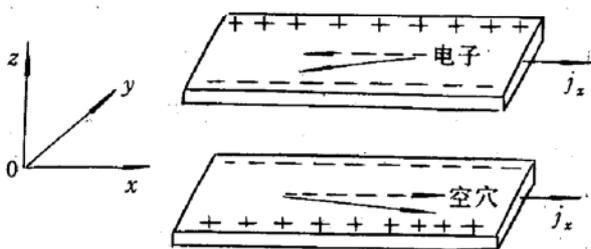


图 1 霍尔效应示意图

2 导电机理及结构

在直角笛卡尔坐标系下,沿 x 方向通以电流 I_x (安培),沿 z 方向施加磁场 B_z ,在 y 方向上将出现横向电场 E_y ,这种现象称为霍尔效应,如图 1 所示.实验表明,在弱电场范围内,横向电场 E_y 正比于电流密度 j_x 和磁感应强度 B_z ,

* 国家“七、五”科技攻关资助项目

张之圣 男,1945 年生,副教授,硕士生导师,从事电子材料与元器件的教学与科研工作

胡 明 女,1951 年生,讲师,硕士学位,从事薄膜物理的教学与科研工作

刘志刚 男,1948 年生,教授,从事薄膜物理的实验与科研工作

王文生 男,1933 年生,教授,从事薄膜物理的教学与科研工作

1994 年 9 月 6 日收到初稿,1994 年 12 月 28 日收到修改稿

$$E_y = R_H j_x B_y \quad (1)$$

式中,比例系数 R_H 称为霍尔系数,单位 m^3/C ,横向电场 E_y 称为霍尔电场, j_x 是 x 方向的电流密度, $j_x = \frac{I_x}{bd}$, 霍尔电压

$$V_H = E_y b = \frac{R_H I_x B_y}{d} \quad (2)$$

产生霍尔效应的原因是,作漂移运动的载流子在垂直方向的磁场中,因受洛伦兹力的作用而发生偏转,结果在样品两侧造成电荷积累,形成横向电场,由横向电场所引起的漂移电流和洛伦兹力产生的霍尔偏转电流抵消,因此,霍尔效应是洛伦兹力和霍尔电场所产生的静电力之间平衡的结果.其平衡时电子的速度 V_0 为

$$V_0 = \frac{V_H}{B_y b} \quad (3)$$

如果电子运动的速度 $V_1 > V_0$ 时,电子将沿着洛伦兹力作用的方向偏转,使得沿着外加电场方向的电流密度减小,即由于磁场的存在而增加了电阻,且阻值随着磁场强度绝对值的增加而增大,这就是磁阻效应,又称物理磁阻效应.对于只有一种载流子的半导体,其电阻率的变化是

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = 0.275\mu^2 B^2 \quad (4)$$

ρ 为加磁场后的电阻率, ρ_0 为未加磁场时的电阻率, μ 是载流子的迁移率, B 是磁感应强度.

对于同时有电子和空穴两种载流子的半导体,由于磁场的作用,使得电子电流和空穴电流因相对倾斜而抵消了在垂直方向上的总电流,即减小了电流方向上的总电流,从而使得电阻率增大,其电阻率的变化是

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{\rho}{n} \mu_n \mu_p B^2 \quad (5)$$

n 为电子密度, p 为空穴密度, μ_n 是电子迁移率, μ_p 是空穴迁移率.

磁敏电阻器是利用霍尔效应和磁阻效应原理制成的.这种元件随着磁场的增加,电阻值的增加很明显,电流偏转的霍尔角也较大,主要是由于材料的迁移率高而决定的,因此,必须选用高纯度的锑化铟之类的材料.

磁阻效应还与样品的形状、尺寸密切相关.这种与样品形状、尺寸有关的磁阻效应称为几何磁阻效应.

长方形磁阻器件只有在 l (长度) $< W$ (宽度) 条件下,才表现出较高的灵敏度.把 $l < W$ 的扁条状器件串联起来,就会成为零场电阻值较大、灵敏度较高的磁阻器件.

图 2(a) 是没有栅格的情况,电流只在电极附近偏转,电阻增加很小.

在 $L > W$ 的长方形半导体薄片上面制作许多平行等间距的金属条(即短路栅格),以短路霍尔电势,这种栅格磁阻器件(如图 2(b))就相当于许多扁条状磁阻器件的串联.所以,栅格磁阻器件既增加了磁阻器件的零场电阻,又提高了它的磁阻灵敏度.

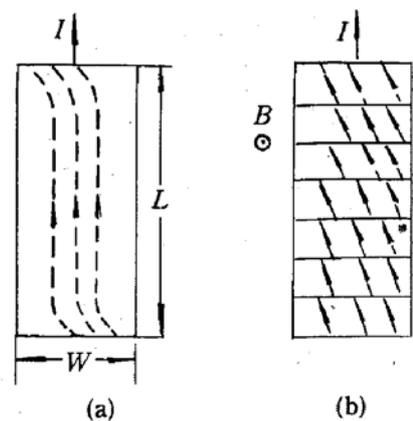


图 2 在磁场中电流的流动

磁敏电阻器的构造是以霍尔元件为基础,它易于作成任意形状的两端子元件,也可以作成多端子元件,这有利于电路设计.另外,霍尔元件输出电压的极性随磁场方向而变化,磁敏电阻器的阻值变化仅与磁场的绝对值有关,与磁场方向无关.

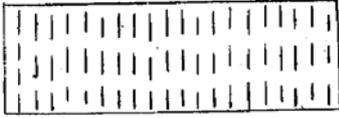


图 3 铋化锑-铋化镍共晶半导体

在铋化锑熔体中掺入镍(Ni),结晶时使铋化镍以针状析出,形成短路栅,如图 3 所示,这就是铋化锑-铋化镍共晶半导体材料.把这样的半导体片经过研磨、抛光,最后刻蚀出需要的形状,制成磁敏电阻器.我们研制的铋化锑-铋化镍共晶磁敏电阻器,零场电阻 R 最大为 5,10k Ω ,见表 1.

表 1 InSb-NiSb 共晶磁敏电阻器

序 号	$R_0/k\Omega$	$R_B(0.3T)/k\Omega$	R_B/R_0
1	5.10	8.50	1.67
2	1.39	2.78	2.00
3	1.09	2.66	2.44
4	0.68	1.43	2.10

3 提高灵敏度的途径

InSb 是一种 III - V 族化合物,它的能带与最简能带模型相似,能带极值都位于布里渊区中心,属于直接跃迁型. InSb 具有闪锌矿型结构,其晶格常数为 6.478 \AA ,密度为 5.7751g/cm³,其禁带宽度 0K 时为 0.265eV,200K 时为 0.18eV. 由于它的禁带宽度十分窄,使得它的温度特性差,因而不能制作二极管和三极管.但是,正是由于禁带宽度窄,对外界条件的影响、反应比较灵敏,适合制作敏感元器件.由于 InSb 是载流子迁移率最高的半导体, $\mu_n=7.8\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, $\mu_p=0.075\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,很适合于制造磁敏电阻器.

当 InSb 材料选定之后,若想再提高其灵敏度,必须有新的途径.

H·Weiss 和藤定在研究 InSb 材料物理磁阻效应时发现,由于 InSb 单晶生长过程中杂质的分凝存在各向异性,在与[111]方向垂直的平面中会出现施主浓度周期性的不连续变化.因此,切割 InSb 晶片的方向与[111]生长方向成不同角度时,物理磁阻效应明显不同.当切割方向与[111]方向平行时,物理磁阻效应反常地增大;当切割方向与[111]方向垂直时,表现为一般的物理磁阻效应.理论研究结果可用下式表示

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{\cos^2\theta[\langle n \rangle \langle \frac{1}{n} \rangle - 1]}{1 + \cos^2\theta[\langle n \rangle \langle \frac{1}{n} \rangle - 1]} \cdot \frac{(\mu B)^2 \sin(\varphi + \theta)}{1 + (\mu B)^2 \cos^2(\varphi + \theta)} \quad (6)$$

式中 θ 是切割方向与[111]生长方向间的夹角, φ 是在 InSb 晶片平面上电流密度与磁感应强度之间的夹角, $\langle \quad \rangle$ 代表平均值, n 是载流子浓度, μ 是电子迁移率.

我们切割 InSb 晶片时,选择 $\theta = 0^\circ$,大大提高了磁敏电阻的灵敏度.

InSb 磁敏电阻的基片材料有铁氧体和微晶玻璃,尺寸是 10 \times 5 \times 0.5mm 和 6 \times 4 \times 0.5mm. InSb 电阻条的宽度 W 选择 0.3mm,电阻条间距离 $a = 0.05\text{mm}$,厚度 $d = 20\mu\text{m}$,短路条的长度和条间距离都选用 0.06mm,形成若干个长度 $L=0.06\text{mm}$,宽度 $W=0.3\text{mm}$,厚

度 $d=20\mu\text{m}$ 的 InSb 电阻串联,如图 4 所示. 每一个扁条状 InSb 电阻,其阻值

$$R_0 = \frac{\rho_0 L}{Wd} \quad (7)$$

制备工艺主要包括研磨、抛光、制板、光刻、蒸发等. 制作短路栅格的材料是银、铜等良导体. 制作方法采用蒸发、电镀的方法. 为了满足不同阻值的需要,研制的 InSb 磁敏电阻,阻值在 $17\sim 319\Omega$ 范围内.

4 可靠性寿命试验

假设 InSb 磁敏电阻的失效规律服从指数分布,其失效率 λ 为常数. 在温度为 40°C 、额定电流 1mA 的条件下进行可靠性寿命试验. 试验后,若 $R_B/R_0 < 1.5$ 即判为失效 (R_0 是 $B=0$, 电流为 1mA 时的电阻值, R_B 是 $B=0.3\text{T}$, 电流为 1mA 时的电阻值).

由置信度为 60% 的可靠性寿命试验抽样表查得,若元件失效率 λ 定为五级,元件的允许失效数为零,则试验元件小时数 $T=91600$. 投入的试验样品分两批,共 114 支,累积到试验元件小时数 $T=124512$ 停止试验. 试验后逐个测量, R_B/R_0 均大于 1.5 , 一般分布在 $2\sim 3$ 之间,最大者达 3.23 , 允许失效数 γ 为零,通过公式

$$\lambda = \frac{\chi^2_{1-\alpha}(2\gamma+2)}{2T} \quad (8)$$

计算 λ 值,式中 $\chi^2_{1-\alpha}(2\gamma+2)$ 是置信度为 $1-\alpha$ 和自由度为 $2\gamma+2$ 的 χ^2 分布. 查 χ^2 分布表,当 $1-\alpha=60\%$, $\gamma=0$ 时, $\chi^2=1.833$, 所以

$$\lambda = \frac{1.833}{2 \times 124512} = 7.36 \times 10^{-6}/\text{h} < 1 \times 10^{-5}/\text{h}$$

即 InSb 磁敏电阻的失效率 $\lambda(t) < 1 \times 10^{-5}/\text{h}$, 符合失效等级 W 级.

在可靠性寿命试验前,所测 R_B/R_0 的数值列入表 2, 由此得曲线 I, 见图 5, 近似于正态分布上, 峰值出现在 $2.6\sim 2.8$ 之间.

在可靠性寿命试验后,所测 R_B/R_0 数值列入表 3, 由此得曲线 II, 见图 6, 近似于正态分布, 峰值出现在 $2.8\sim 3.0$ 之间. 试验前后, 测量 InSb 磁敏电阻时的环境温度保持不变.

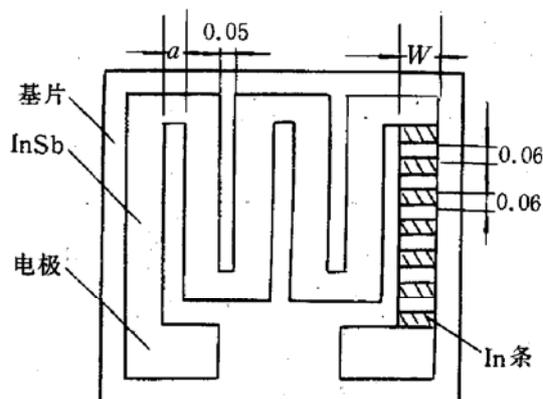


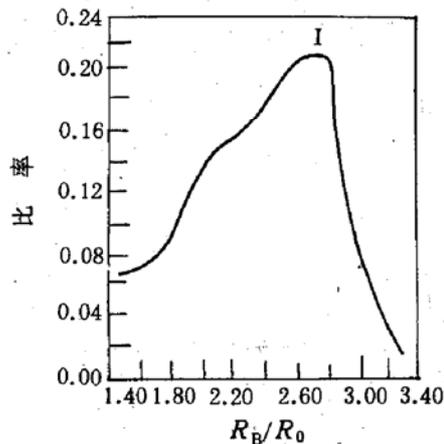
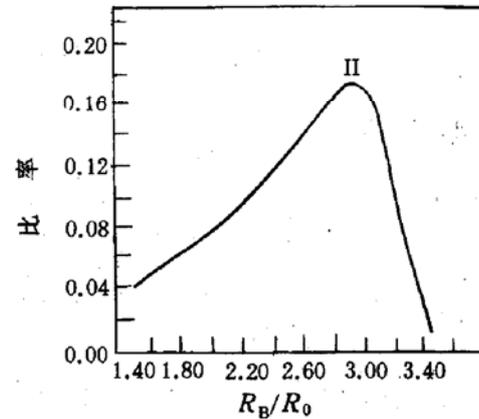
图 4 InSb 磁敏电阻的结构

表 2 试验前 R_B/R_0 的分布

R_B/R_0	<1.59	1.60 ~1.79	1.80 ~1.99	2.00 ~2.19	2.20 ~2.39	2.40 ~2.59	2.60 ~2.79	2.80 ~2.99	>3.00
样品数	8	8	15	8	18	13	24	16	4
比率 (占总数比)	0.07	0.07	0.13	0.07	0.16	0.11	0.21	0.14	0.04

表3 试验前 R_B/R_0 的分布

R_B/R_0	<1.59	1.60 ~1.79	1.80 ~1.99	2.00 ~2.19	2.20 ~2.39	2.40 ~2.59	2.60 ~2.79	2.80 ~2.99	3.00 ~3.19	>3.20
样品数	5	8	8	9	15	14	15	20	18	2
比率(占总数比)	0.04	0.07	0.07	0.08	0.13	0.12	0.13	0.18	0.16	0.02

图5 试验前 R_B/R_0 的分布图6 试验前 R_B/R_0 的分布

参 考 文 献

- [1] H. Weiss, J. Appl. Phys., 1961, 32(10):2064.
 [2] 藤定友幸, 电子技术综合研究报告, 1978, 第791号.
 [3] 叶良修, 半导体物理学, 北京: 高等教育出版社, 1983, 159~160.

Conduction Mechanism and Reliability of InSb Magnetoresistor

Zhang Zhisheng, Hu Ming, Liu Zhigang and Wang Wensheng

(Department of Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Received 6 September 1994, revised manuscript received 28 December 1994

Abstract The conduction mechanism of InSb magnetoresistor is discussed in detail. Based on the paper^[1,2], We have proposed a new way for improving its sensitivity. In this paper, we study the reliability of InSb magnetoresistor for the first time. Its failure rate is $<1 \times 10^{-5}/h$ obtained from the reliability lifetime test.