

# 结型磁敏器件——硅磁敏二极管

黄得星 温殿忠

(黑龙江大学物理系半导体教研室)

## 一、前言

结型磁敏器件是一种新型半导体磁电转换器件。它有锗、硅磁敏二极管<sup>[1]</sup>、锗<sup>[2]</sup>、硅磁敏晶体管、磁敏可控硅<sup>[3]</sup>以及集成式磁敏补偿电路等几种。它们的特点是磁灵敏度很高,比霍尔元件高几百倍到几千倍。这样高的磁灵敏度是利用半导体的磁阻效应实现的。所谓磁阻效应是利用 p-n 结性质向半导体注入高电平载流子,利用载流子在磁场中会受到洛伦兹力作用而发生偏转的特性,以改变非平衡载流子的有效寿命和运动路程,达到调制半导体电导率的目的。

六十年代初,有人开始探讨 p<sup>+</sup>-π-n<sup>+</sup> 型长基区二极管的磁阻效应<sup>[4]</sup>。过了十年,日本索尼(Sony)公司研制了一种特殊结构的 p<sup>+</sup>-π-n<sup>+</sup> 型磁敏二极管<sup>[5]</sup>,使这种结型磁敏器件逐渐得到实际应用,受到人们的高度重视。

1975 年,苏联报道了硅磁敏二极管的研究成果<sup>[6,7]</sup>,同时从理论上做了分析,并且对磁敏二极管近几年来在各种技术领域里获得的应用给了高度评价。其他一些国家研究磁敏器件也取得了一定的成果<sup>[7,8]</sup>。

磁敏二极管实际上是 p<sup>+</sup>-π-n<sup>+</sup> (或 p<sup>+</sup>-i-n<sup>+</sup>) 型双注入长基区二极管,而它的磁阻效应是传导电流在 x, y 轴方向运动的二维问题。为了解释磁敏二极管的伏安曲线随磁场变化的现象,要求解它的二维连续方程。但是要求得它的解是非常困难的。目前提出的几种磁敏二极管理论<sup>[7,9]</sup>都是一维近似结果。因此,尚未建立磁敏二极管的完整理论。

## 二、结构和原理

图 1 给出了一个 p<sup>+</sup>-π-n<sup>+</sup> 型磁敏二极管的板型结构模型。在它的一个侧面设置了一个复合中心浓度很高的表面复合区 r,而它的对面是表面复合速度非常小的“理想”表面。

硅磁敏二极管经多次高温处理,载流子体内寿命下降到数微秒,载流子的扩散长度为 30 微米左右。为了使衬底复合区有效地调制体内载流子寿命,它的厚度 l 必须小于电子扩散长度,即 l ≤ 30 微米。对单面

复合速度为无限大的薄层,有效寿命公式为

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_n} + \frac{\pi^2 D_p}{l^2} \approx \frac{\pi^2 D_p}{l^2},$$

式中 τ<sub>n</sub> 为电子的体内寿命, D<sub>p</sub> 为空穴扩散系数。由上式可以算出载流子有效寿命 τ<sub>eff</sub> ≈ 0.1 微秒,相应的电子有效扩散长度为 10 微米左右。基区宽度 l 要一般为电子有效扩散长度的 10—20 倍,所以取 l 为 100—200 微米。

在 p<sup>+</sup>-π-n<sup>+</sup> 型长基区二极管两端加正向偏压 V 时,它的一部分降在 p<sup>+</sup>-π 结上,即结偏压 V<sub>ip</sub> 和 V<sub>in</sub>,其余全部降在 π 区的漂移区,电压降为 V<sub>π</sub>,即 V = V<sub>ip</sub> + V<sub>in</sub> + V<sub>π</sub>。当外加偏压较小时,从两个结注

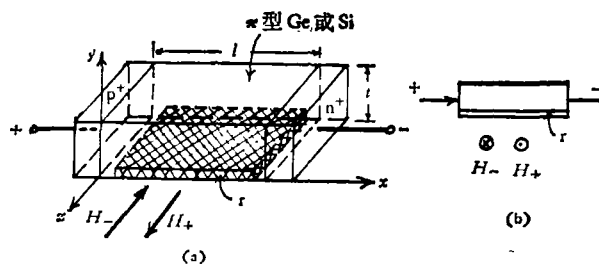


图 1 磁敏二极管的板型结构模型 (a) 和线路符号 (b)

入的电子和空穴较少,通过 π 区的电流是热平衡载流子和少量的注入载流子。随着外加偏压 V 的增加,注入电平也应该增加。但实际上由于衬底复合中心浓度很高,加上体内还存在着许多深能级杂质、热缺陷等形成的俘获中心,使从 p<sup>+</sup> 和 n<sup>+</sup> 区注入的载流子很快被这些结附近的俘获中心所俘获或复合,无法注入大量的载流子。这样,外加偏压增加的部分几乎都降在 π 区,形成漂移电场,通过 π 区的电流仍然是热平衡载流子和少量的注入载流子。因此,如图 2 所示,硅磁敏二极管的伏安曲线开始一段很平坦,电流随偏压 V 增加得非常缓慢。当进一步增加外加偏压时,从 p<sup>+</sup> 区和 n<sup>+</sup> 区注入的载流子逐渐填满俘获中心。填满后,才能从 p<sup>+</sup> 和 n<sup>+</sup> 区向 π 区注入大量的载流子,使 π 区内空间电荷很快增加,π 区电导率也随着增加。这样,外加偏压分布就发生变化,也就是说,π 区的电压降将减小,相应地结偏压增加,使通过 π 区的电流迅速增加,这就是图 2 所示的伏安曲线上升电流较大的一段。

如果两个结比较深,在 p<sup>+</sup>-π 结附近集中大量的

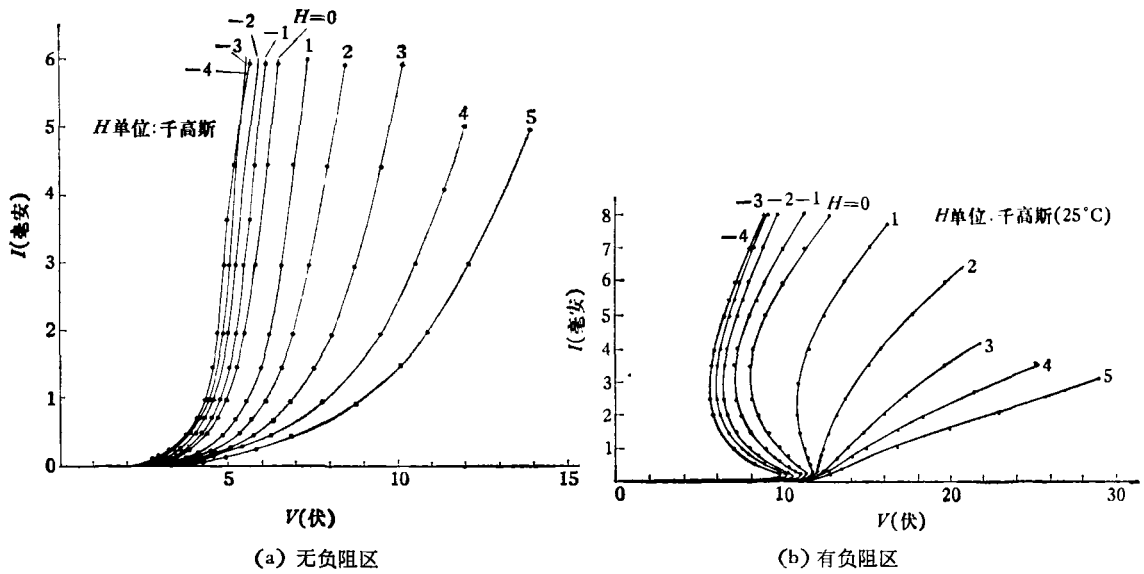


图2 硅磁敏二极管伏安曲线随磁场变化

深能级杂质时,只有外加偏压  $V$  足够大,才能使注入载流子填满俘获中心,随后才开始向  $\pi$  区注入大量的载流子。这样一来,  $\pi$  区的空间电荷迅速增加,使得它的电阻率突然降下来,相应地结偏压突然增加,又进一步提高注入电平。这样,在伏安曲线开始上升的一段出现 S 型负阻区,如图 2 (b) 所示。

当在图 1 所示的方向加磁场  $H_+$  (称为正向磁场) 时,电子和空穴受洛伦兹力作用均向衬底复合区偏转,使衬底复合区的复合率增加,从而使载流子寿命减小,也就是它的扩散长度变短。这就引起  $\pi$  区电压降增加,相应地两个结偏压下降,使得两个结的注入电平下降,通过  $\pi$  区的电流减小。这相当于  $\pi$  区的电导率减小,表现为正的磁阻效应。这样,硅磁敏二极管的伏安曲线向正轴方向偏移,如图 2 所示。反之,加反向磁场  $H_-$  时,通过  $\pi$  区的载流子受洛伦兹力作用均背离衬底复合区,向其对面偏转,所以衬底复合区的复合率减小,使载流子有效寿命增加,它的有效扩散长度变长。这样,  $\pi$  区电压降减小,相应地增加两个结偏压,它的注入电平增加,结果通过  $\pi$  区的电流将增加,相当于  $\pi$  区的电导率增加,表现为负的磁阻效应。因此,硅磁敏二极管的伏安曲线向负轴方向偏移(见图 2)。

如果进一步增加反向磁场,那么载流子背离衬底复合区偏向对面的速度加快,同时载流子往这表面集中,结果对面的复合速率迅速增加。当它的复合率与衬底复合率减小量相等时,反向磁灵敏度趋于最大值,然后随着  $H_-$  的增加,伏安曲线却向正轴方向偏移。如果表面处理不好,对面存在较多的复合中心时,就在不太大的反向磁场作用下,反向磁灵敏度很快达到最大偏移,甚至向正轴方向偏移。由此可见,这种板型结构的硅磁敏二极管,是通过衬底复合区对体内载流子

有效寿命的调制来改变  $\pi$  区电阻率的一种结型磁敏器件。衬底复合区和对面复合区的复合速度相差越大,它的磁灵敏度就越高。

在这种横向磁场  $H_x$  作用下,载流子偏向或背离衬底复合区的电子流密度  $i_{ny}$  和空穴流密度  $i_{py}$  为

$$i_{ny} = \mu_n i_{nx} \cdot H \approx +\mu_n^2 en E_x \cdot H_x,$$

$$i_{py} = -\mu_p i_{px} \cdot H \approx -\mu_p^2 ep E_x \cdot H_x,$$

式中  $i_{nx}, i_{px}$  分别为  $x$  轴方向电子、空穴电流密度,  $\mu_n, \mu_p$  分别为电子、空穴迁移率,  $n, p$  分别为电子、空穴浓度,  $E_x$  为  $\pi$  区的漂移电场。在上式中只考虑了漂移运动,因为基区长度  $l$  比载流子有效扩散长度长得多,在注入电平很高的情况下,可以忽略载流子的扩散运动。

上式表明,通过  $\pi$  区的电流或偏压  $V$  (即漂移电场  $E$ ) 越大,偏向衬底复合区的载流子也越多。图 2 表明在给定的磁场  $H$  中,伏安曲线的电流越大,它随磁场偏移的幅度(即磁灵敏度)也越大。

由于衬底和对面复合速度不同,在正、反向磁场中,它们的复合率改变不一样,硅磁敏二极管的正、反向磁灵敏度具有非对称性,正向灵敏度总大于反向灵敏度。

上述均属于正向偏压情况。在硅磁敏二极管两端加反向偏压时, p-n 结的反向漏电流很小,磁敏效应亦小。

### 三、工 艺

索尼公司 1971 年研制了硅磁敏二极管 (Si Sony Magnetodiode 简称为 Si-SMD)。它是采用平面工艺,在外延片子表面使杂质分别扩散到  $p^+, n^+$  区,做成  $p^+-\pi-n^+$  型长基区二极管,然后用砂子研磨衬底到 30 微

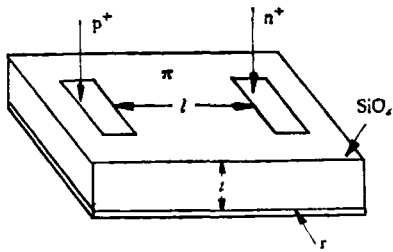


图3 Si-SMD 管芯结构

米厚度,即可制成(如图3所示)<sup>[1]</sup>。采用这样一种高阻衬底的外延技术,即在扩散区域上生长多晶,其余地方均生长一层厚度为30微米的完美的高阻单晶层,它的电阻率大于100欧姆·厘米,在选择性扩散时,杂质在多晶区内迅速扩散,形成结深为外延层厚度的p<sup>+</sup>,n<sup>+</sup>型区域。衬底用砂子研磨,以形成30微米厚度的外延层,而衬底粗糙的表面就作为高复合表面区r。Si-SMD的基区长度 $l = 0.1$ 毫米,它的伏安曲线中出现S型负阻区(见图4),具有正、反向磁灵敏度。

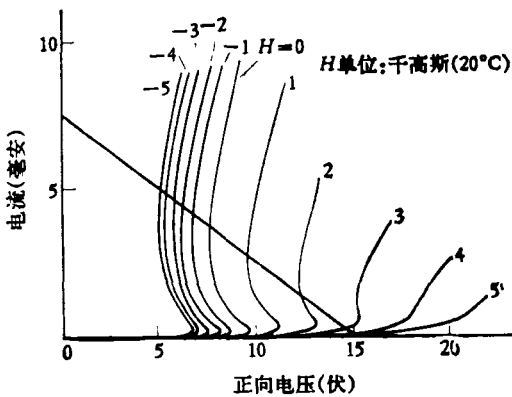


图4 Si-SMD 伏安曲线随磁场变化

苏联研究的硅磁敏二极管是采用合金工艺,在矩形硅棒两端用金锑合金和铝(或用金硼合金,效果一样)分别烧结形成n<sup>+</sup>型区域和金属欧姆结,制成单注入的n<sup>+</sup>-π-M型长基区二极管(M表示金属欧姆结)<sup>[3]</sup>;或者采用低温扩散工艺,在片子表面制成n<sup>+</sup>-π-M型磁敏二极管<sup>[6]</sup>。材料的电阻率为几千到几万欧姆·厘米的p型硅单晶。这种磁敏二极管不设置表面复合区,要求表面均为“理想”表面,因此不考虑表面复合对体内载流子寿命的调制作用。在烧结和扩散过程中,为了防止体内载流子寿命下降,采用低温合金和扩散工艺。在外加正向偏压时,从n<sup>+</sup>区注入的电子受横向磁场的作用发生偏转,使通过π区的电流发生弯曲,增加载流子的运动路程。这说明这种结构的机理与上述板型结构不同。因此,它的尺寸较大( $l \geq 1$ 毫米,  $t$ 也比板型结构的大得多,而载流子运动路程的弯曲与 $t$ 有关,从而 $t$ 越大,载流子运动路程的弯曲变化就

越大,它的灵敏度就越高);它的伏安曲线中不出现S型负阻区,具有单向磁灵敏度(均向正轴方向偏移);并

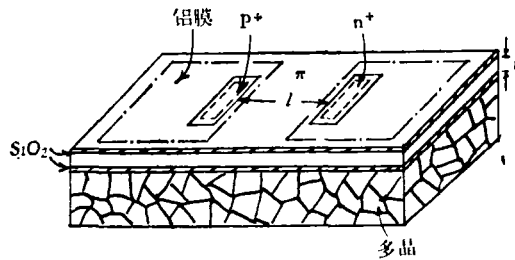


图5 硅磁敏二极管的管芯结构

且它的灵敏度与硅单晶的电阻率、寿命、尺寸等相关性很大<sup>[7]</sup>。

图5和2表示我们研制的硅磁敏二极管和它的伏安曲线随磁场变化关系。它的结构与上述Si-SMD基本一样,也是板型结构,采用平面工艺,但对Si-SMD结构和工艺做了重大改革。

首先在电阻率大于100欧姆·厘米的p型硅单晶片表面(抛光成镜面)热生长一层厚氧化膜后,在它上面再生长一层厚度为300微米左右的多晶外延层,作为片子的基座。然后在单晶片的背面进行研磨和抛光,使形成厚度为30微米的单晶层。接着在这上面进行选择性扩散,制成p<sup>+</sup>-π-n<sup>+</sup>型长基区二极管。经测试后切片,即可制成一只硅磁敏二极管的管芯(见图5)。

在单晶层的衬底用氧化膜与多晶层隔离的同时,设置了较多的复合中心,以此作为衬底的复合区r。为了提高磁灵敏度 and 稳定性,一方面要增加衬底和表面复合速度差值,为此在表面热氧化和选择性扩散中采用表面钝化措施,尽量减小表面复合中心;另一方面,在n<sup>+</sup>型区域周围设置隔离环,迫使电子从结底注入π区域。这样,电子的路程发生弯曲,同时靠衬底通过π区,以利于提高衬底复合中心对体内载流子寿命的调制作用。由此可见,这种硅磁敏二极管的磁灵敏度同Si-SMD一样,具有正、反向磁灵敏度,而且可以避免伏安曲线中出现S型负阻区。图2表示用上述结构和工艺研制的两种典型伏安曲线随磁场变化关系。

我们采用上述结构和工艺,避免了伏安曲线负阻区的出现,提高了管子的磁灵敏度和稳定性,使硅磁敏二极管特性的均匀性和一致性易于控制,同时还解决了两只管子按补偿电路集成化的难题。

#### 四、特 性

我们规定硅磁敏二极管磁灵敏度的测试条件为:电源电压 $E = 21$ 伏;负载电阻 $R = 3000$ 欧;在正、反向1000高斯恒定磁场中,输出电压 $V_0$ 的改变量 $\Delta V_+$

和  $\Delta V_-$  分别为正向和反向磁灵敏度;工作电压  $V_0$  为 4—18 伏。图 6 表示硅磁敏二极管的测试线路。在上

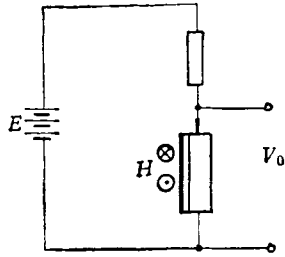


图 6 磁敏二极管的测试线路

述测试条件下,图 2(a)中的管子的工作参数为:  $V_0 = 6.3$  伏,  $\Delta V_+ = 1.0$  伏/千高斯,  $\Delta V_- = 0.4$  伏/千高斯。图 2(b)中的管子的工作参数为:  $V_0 = 8.3$  伏,  $\Delta V_+ = 2.7$  伏/千高斯,  $\Delta V_- = 0.8$  伏/千高斯。

文献[1]报道了 Si-SMD 在  $E = 15$  伏、 $R = 2000$  欧的测试条件下,  $V_0 = 8.0$  伏的管子正、反向磁灵敏度分别为  $\Delta V_+ = 1.7$  伏/千高斯,  $\Delta V_- = 1.2$  伏/千高斯(见图 4)。

硅磁敏二极管的温度特性比锗磁敏二极管小得多,因为硅的热平衡载流子浓度比锗小三个数量级,而且硅的禁带宽度比锗大,所以在  $p^+$  和  $n^+$  区大注入的情况下,热激发载流子参与漂移所造成的温度漂移很小,可以忽略不计;但在注入很小时,热激发载流子的影响就不可忽略了。通常在大注入的情况下,硅磁敏二极管的温度漂移主要决定于载流子迁移率随温度的

变化。因此,它的温度系数同锗恰好相反,表现为正,即随着温度的升高,伏安曲线往正轴方向偏移。图 7 表示两只硅磁敏二极管的伏安曲线随温度变化的情况。

由图 7 可以看出,在一定温度下,伏安曲线的大电流部分温度系数为正,而小电流部分温度系数却为负。在小电流时,注入比较小,热激发载流子浓度随温度升高而迅速增加,超过迁移率随温度变化所带来的影响,所以表现为负温度系数。由此可见,在伏安曲线中存在一个温度系数为零的“无温漂点”,即有的随温度升高而缓慢上升(如图 7(b)所示),有的在一个有限范围内变化(如图 7(a)所示)。这说明工作点  $V_0$  的温漂就与它的电流大小有关。例如选择工作电流较小的工作点,  $V_0$  的温漂就比较小,而选择工作电流很大的工作点,则温漂显然大些。另外,负阻区的温度系数总是负,而且随温度变化较明显。图 8 表明它在温度  $-40 \sim 100^\circ\text{C}$  范围内工作点  $V_0$  温度系数平均为 9.5 毫伏/ $^\circ\text{C}$ 。总之,硅磁敏二极管的温度系数一般在 5—20 毫伏/ $^\circ\text{C}$ ,而锗磁敏二极管的温度系数则为  $-60$  毫伏/ $^\circ\text{C}$ [1]。磁敏二极管的  $V_0$  温度系数除了与它的工作点有关外,还与管子的封装与散热条件有关。

硅磁敏二极管的磁灵敏度随温度升高而缓慢下降,它的温度系数最大不超过  $-0.5\%/^\circ\text{C}$ (图 8 所示,它的温度系数为  $-0.4\%/^\circ\text{C}$  左右)。

如果加于硅磁敏二极管的横向磁场是交变磁场,那么它的交变频率只有超过某一截止频率时,它的磁灵敏度才开始下降。这一频率取决于载流子的注入和

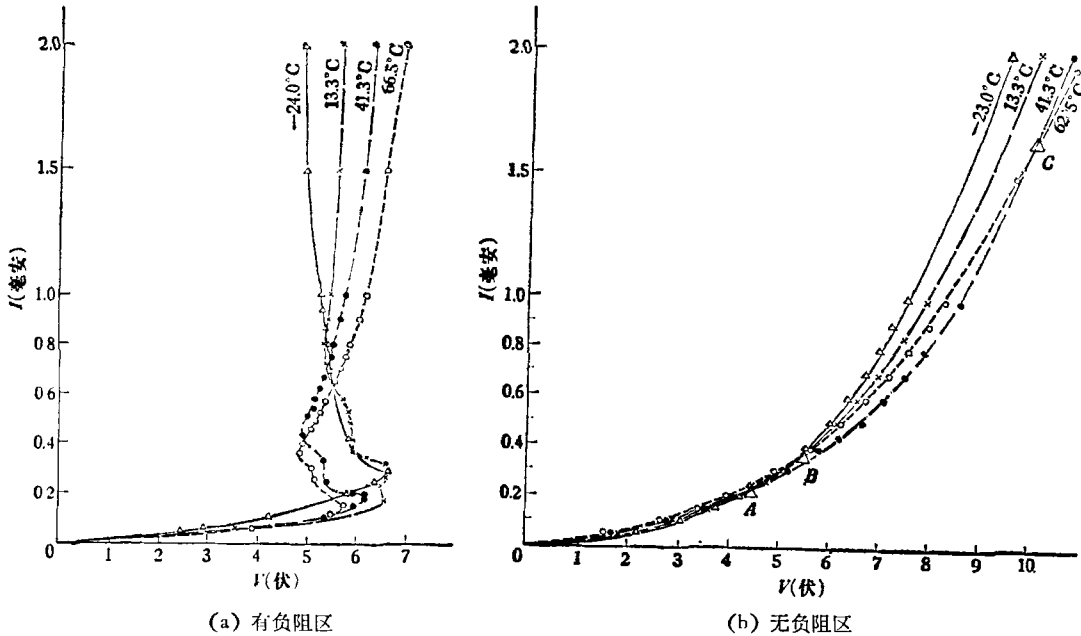


图 7 硅磁敏二极管伏安曲线随温度变化

A 是  $-23.0^\circ\text{C}$  和  $13.3^\circ\text{C}$  的两曲线的交点; B 是  $13.3^\circ\text{C}$  和  $41.3^\circ\text{C}$  的两曲线的交点; C 是  $41.3^\circ\text{C}$  和  $62.5^\circ\text{C}$  的两曲线的交点。

复合平衡时间。这一时间大致等于载流子的有效寿命。因此，硅磁敏二极管尺寸越小，它的截止频率越高。在磁场频率为 100 千赫时，硅磁敏二极管的灵敏度仍然保持不变<sup>[1]</sup>。

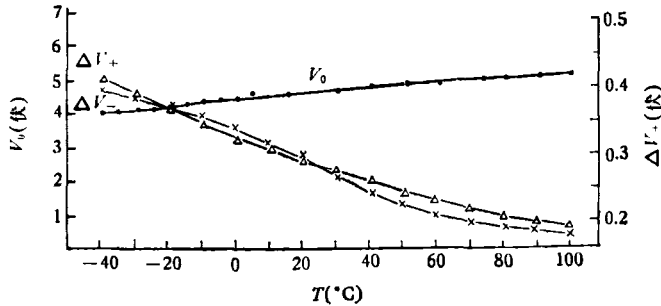


图 8 硅磁敏二极管的工作电压  $V_0$  和磁灵敏度随温度变化 (测试条件:  $E = 15$  伏;  $R = 2$  千欧;  $V_0 = 4.76$  伏;  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ )

硅磁敏二极管磁灵敏度同磁场保持线性关系的范围比较窄, 在 1000 高斯范围内近似保持线性关系 (见图 9)。

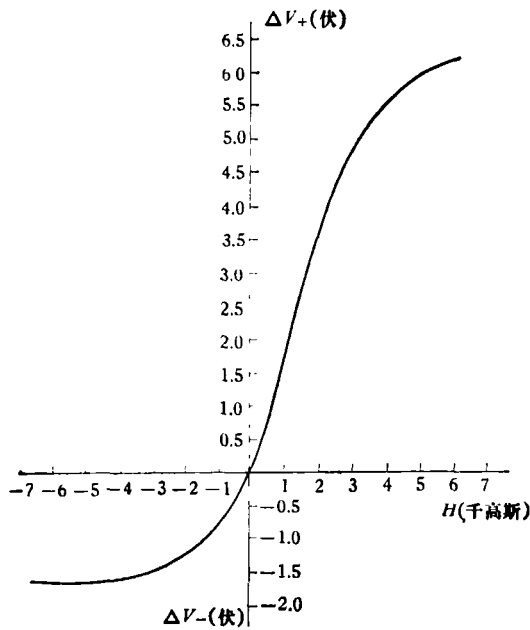


图 9 硅磁敏二极管的输出电压  $\Delta V_{\pm}$  同磁场关系 (测试条件:  $E = 15$  伏;  $R = 2$  千欧;  $V_0 = 7.2$  伏;  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ )

硅磁敏二极管的噪声包含着热噪声和复合与产生起伏所引起的配分噪声以及  $1/f$  表面噪声。硅片衬底用氧化膜保护, 显然比用破坏晶格的方法而形成的复合区的表面噪声小些。在应用中经过抽测, 上述硅磁敏二极管的噪声电平还是比较大的, 一般在 0.01 毫伏数量级到 1 毫伏数量级, 而用表面喷砂或衬底研磨方法制成的同类二极管的噪声电平是 0.1 毫伏数量级到

10 毫伏数量级。文献[1]报道 Si-SMD 的噪声电平为 0.3 毫伏。

硅磁敏二极管较大的噪声电平对检测弱磁场带来一定的困难。当然对于磁开关应用来说, 只要选用一定强度的磁场, 噪声不会影响磁开关的应用。

## 五、补偿电路

硅磁敏二极管的温漂给应用带来一定的困难。为了补偿温漂, 提高灵敏度, 可以采用几种补偿电路, 即选用两只或四只比较对称的硅磁敏二极管, 按磁极性互为相反的方向组合起来, 做成互补、差分和电桥电路 (如图 10 所示)。它们处在同一环境中, 温漂一致, 输出电压  $V_m$  或  $V_1 - V_2$ , 始终保持不变, 达到温度补偿的目的。具有负阻区的和伏安曲线斜率很小 (即微分电阻很小) 的硅磁敏二极管, 不适用于做互补和电桥电路<sup>[10]</sup>。

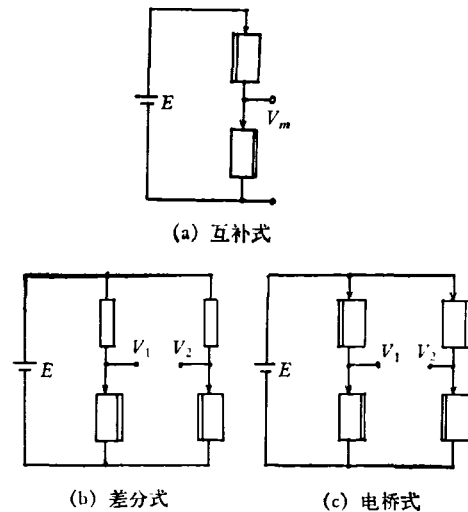


图 10 硅磁敏二极管的温度补偿电路

互补电路的工作曲线如图 11 所示。在外加磁场作用下, 由于两只管子磁极性相反, 它们的磁灵敏度也相反。例如曲线 (1) 为正向灵敏度, 由曲线 (1) 偏移到 (1)'; 而曲线 (2) 为反向灵敏度, 它由曲线 (2) 偏移到 (2)'. 因此, 输出电压由  $V_m$  增至  $V'_m$ , 其改变量为

$$\Delta V_m = V'_m - V_m = \Delta V_{i+} + \Delta V_{i-}$$

如果两只二极管的微分电阻非常小, 那么硅磁敏二极管的灵敏度  $\Delta V_{i+}$  和  $\Delta V_{i-}$  都是非常小, 因此总的输出电压改变不大, 但通过这一电路的电流改变量却很大。同理, 差分电路的灵敏度为正、反向灵敏度之和, 即

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \Delta V_{i+} + \Delta V_{i-}$$

如果两只硅磁敏二极管的工作电压不对称, 差分式组合电路的输出电压  $V_1 - V_2 \neq 0$ , 那么, 通过调节负载

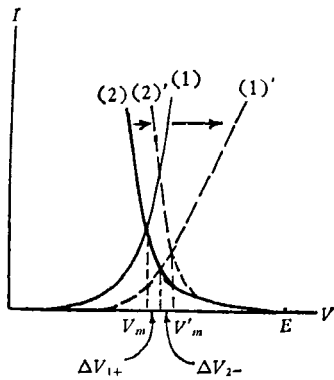


图 11 硅磁敏二极管互补电路工作曲线和输出电压

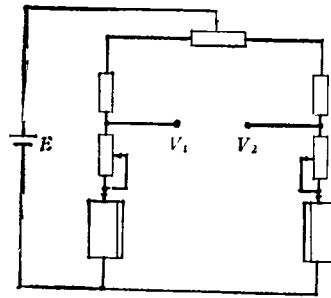


图 12 差分电路输出电压  $V_1 - V_2$  补偿方法

电阻(见图 12),总可以使输出电压  $V_1 - V_2 = 0$ 。由此可见,硅磁敏二极管和差分式补偿电路同其它两种补偿电路相比,具有灵敏度高、稳定性好等优点。

### 参 考 文 献

[1] 新井、山田, 电子材料, 12 (1971), 61.  
 [2] 山田敏之, 特許公報, 昭 45-24062.  
 [3] И. М. Викулин и др., ФТП, 9-12 (1975), 2360.

[4] Э. И. Каракушан и др., ФТП, 3 (1961), 677, 2031.  
 [5] Е. И. Гамолин и др., ФТП 9-8 (1975), 1465.  
 [6] Г. А. Егназарян и др., ФТП, 9-7 (1975), 1252.  
 [7] I. I. Munteanu, Rev. Roum. Phys., 18-3(1973), 323.  
 [8] 片岡照榮, 电子材料, 1 (1973), 70.  
 [9] Э. И. Каракушан и др., ФТП, 9-8 (1975), 1441.  
 [10] 黄得星, 电子科学技术, 1978 年, 第 2 期, 第 35 页。

## 微波段金属表面问题的基本理论和测量

黄 志 洵

(中国计量科学研究院)

微波元件的质量和精度, 极大地取决于金属表面的加工和镀覆状况。衡量微波段金属表面损耗的主要参数有: 表面电阻  $R_m$  (或  $R_f$ )、趋肤深度  $\tau$  和  $Q$  深度  $S_Q$ 、表面有效电导率  $\sigma_{\text{eff}}$  等。它们不取决于微波元件的尺寸, 又包括在微波电参数的主要公式中, 因而是表征金属表面损耗的良好参数。

确定金属材料的复表面阻抗是重要的。这一工作在微波段有多方面的应用。例如, 改进谐振腔的  $Q$  值, 减小传输波导的损耗, 提高标准截止衰减器的精确度, 改进反射标准的质量等。此外, 可以研究金属表面氧化层的影响 (例如铜放在空气中时氧化层厚度的增加与时间的平方根成正比, 它降低腔体  $Q$  值, 增大波导损耗)。因而, 对微波表面问题应给予足够的重视。

### 一、单层平面金属的表面阻抗

可以把金属看成为具有复介电常数的介质, 即

$$\epsilon_c = \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega} = \epsilon \left( 1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon} \right),$$

式中  $\sigma$  是电导率,  $\omega$  是角频率,  $\epsilon$  是介电常数 ( $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ )。上述关系式是根据麦克斯韦方程式得到的。 $\sigma \gg \omega\epsilon$  的材料叫良导体, 一般金属都满足。 $\sigma \approx \omega\epsilon$  只发生在很高的频段, 例如紫外光频率。金属的介电常数有很大的虚部。

在导体中, 均匀平面波的传播常数为

$$\gamma_c = j\omega \sqrt{\mu\epsilon_c}.$$

波在导体内的衰减将由下述因子决定:

$$e^{-\gamma_c z} = e^{-(\alpha_c + j\beta_c)z} = e^{-\alpha_c z} e^{-j\beta_c z},$$

这里  $z$  代表波传播方向的坐标轴。

均匀平面波的本征阻抗 (电场强度与磁场强度之比) 为

$$Z_m = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_c}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon \left( 1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon} \right)}},$$

式中  $\mu$  是导磁率 ( $\mu = \mu_r \mu_0$ )。

厚度为  $d$  的平面金属, 表面阻抗是  $Z_m \operatorname{cth} \gamma_c d$ , 故归一化表面阻抗为