

磁场对 Ge 表面场效应的影响^{*1)}

邢益荣 白洪耐 张立鹏 王 智

(中国科学院)

提 要

本文研究了横向磁场对 Ge 表面交流场效应的影响,提出了与其他作者不同的解释。根据我们的实验结果,可以认为磁场对场效应的影响主要是由于磁浓缩效应引起了样品电导的附加变化,而不是由于霍尔电压改变了表面势垒。并且指出利用这个实验来决定表面复合速度与表面势垒关系的可能性。

一、引 言

十多年以来,人们对半导体的表面性质已经进行了广泛的研究,特别是对 Ge 表面的研究工作最多。在这些研究中,最普通的实验方法是表面场效应,或者是场效应和表面复合速度的联合测量,通过这些测量,可以探讨载流子在半导体表面上的各种行为以及求出表面能级的参数。

近几年来,也进行了一些关于 Ge 表面电磁性质的研究。例如, Petritz^[1] 和 Zemel 等^[2,3] 分别从理论和实验两方面研究了片状 Ge 单晶的电导率、霍尔系数和磁阻随表面势垒的变化; Пикус^[4] 详细地分析了,当考虑载流子浓度变化时,在近本征半导体中的热电磁效应,得出了在弱磁场中通有电流的片状样品电阻变化的表达式。式中包含两项,一项正比于磁场强度 H 的平方,与电场 $\mathcal{E}$ 无关;而另一项与 H 和 $\mathcal{E}$ 成线性关系。前一项是一般的磁阻效应,而后一项就称为磁浓缩效应 (магнитоконцентрационный эффект),它与表面复合速度有关。此后不久, Жузе 等人^[5,6] 便利用这个磁浓缩效应研究了 Ge 的表面复合速度; Aerts 等人^[7,8] 最先报导了在横向磁场中测量场效应的实验。后来, Einspruch^[9] 又继续研究了磁场对 Ge 表面电导的影响。这些作者一致指出,横向磁场对 Ge 表面场效应有很显著的影响,并且他们都认为,这是由于漂移电流和磁场相互作用所引起的霍尔电场,改变了 Ge 表面势垒和空间电荷区形状的结果。

本文进一步研究了横向磁场对 Ge 表面场效应的影响。根据我们的实验结果,可以认为横向磁场对 Ge 表面场效应的影响,主要地不是由于霍尔电场改变了表面势垒,而是由于磁浓缩效应引起了样品电导的附加变化。同时也指出利用这个实验来确定表面复合速度和表面势垒的关系的可能性,并进行了初步的尝试性测量。

二、实 验 部 分

本文所利用的实验装置是一般的具有桥式平衡的交流场效应测量线路,这种线路在

* 1965年7月16日收到。

1) 本文曾在1965年第三届全国半导体学术会议上宣读过。

文献[10]中已经作了详细的描述,现在仅画出它的方框图,如图1所示。调制样品表面势垒的电压是频率在30至100赫兹之间的正弦电压,这样的频率能够使Ge表面上的快态与能带达到平衡,而慢态来不及发生作用。电压是通过电容器的方式加到Ge表面上的,最大电场达到 $\pm 10^5$ 伏·厘米⁻¹的数量级。场效应信号经过差分放大器放大后,加到示波器的y轴上,而在x轴上,通过移相器加一个与横向电场频率相同的小电压,以便把表面电导变化曲线展开。这样,从示波屏上摄下来的示波图迹,就是样品电导变化与横向电压之间的关系。

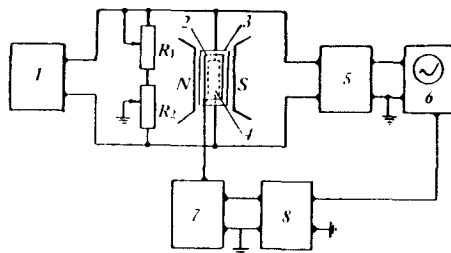


图1 实验装置方框图

1——直流电源; 2——金属电极; 3——云母片;
4——样品; 5——差分放大器; 6——示波器;
7——交流高压电源; 8——移相器; N, S——电
磁铁磁极; R_1, R_2 ——调平衡电阻。

实验中利用了两类样品,第一类是电阻率为30欧姆·厘米左右的p型Ge;第二类是电阻率为10欧姆·厘米左右的n型Ge。它们都是从单晶上平行于(111)平面切割下来的矩形薄片,其一般的线度大约为 $2 \times 0.5 \times 0.05$ 厘米³。样品表面是利用由粗至细的金刚砂进行研磨,在两端镀上镍,再用锡焊上欧姆电极,然后把样品放在CP-4或H₂O₂中进行腐蚀,经去离子水冲洗后置于烘箱内加热(大约70—80℃)半小时左右,接着在大气中搁置几天,最后把它装到样品架上,并进行测量。

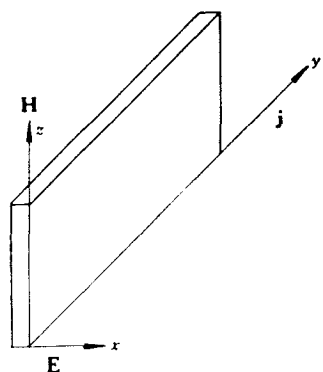


图2 磁场 $\mathbf{H}$ 、横向电场 $\mathbf{E}$ 和通过样品的漂移电流 $\mathbf{j}$ 之间的关系示意图

测量时,样品架是安装在电磁铁的磁极中间,使其磁场 $\mathbf{H}$ 的方向垂直于横向电场 $\mathbf{E}$ 和通过样品的漂移电流 $\mathbf{j}$ 的方向,如图2所示。磁场强度在2500至3650奥斯特之间,所有测量都是在大气中室温下进行的。

测量时,样品架是安装在电磁铁的磁极中间,使其磁场 $\mathbf{H}$ 的方向垂直于横向电场 $\mathbf{E}$ 和通过样品的漂移电流 $\mathbf{j}$ 的方向,如图2所示。磁场强度在2500至3650奥斯特之间,所有测量都是在大气中室温下进行的。

三、实验结果和分析

实验发现,横向磁场对Ge表面场效应曲线的影响,不仅依赖于磁场 $\mathbf{H}$ 和电流 $\mathbf{j}$ 的数值和方向,而且还明显地依赖于样品的电阻率、样品厚度和表面复合速度。

对于第一类样品(即电阻率 ~ 30 欧姆·厘米的p型Ge),当样品厚度不太薄(一般大于0.03厘米),并且表面是经过很好的腐蚀处理时,我们观察到,横向磁场对表面电导变化有很显著的影响。磁场越大,影响也越大,甚至当适当地改变磁场的大小和方向时,电导变化曲线的极小值可以从对应于横向电场的正值一边移动到负值一边,或者相反。Einspruch也观察到这个现象^[9]。实验还发现,改变磁场方向或改变电流方向,对场效应曲线影响的效果是一样的。此外,对于我们实验中的个别样品,当磁场存在时,电导变化曲线中出现了一个明显的极大值,如图3所示。

对于第二类样品(即电阻率 ~ 10 欧姆·厘米的n型Ge),虽然具有相同的厚度和经过完全一样的表面处理,但是,在我们的测量灵敏度范围内,没有观察到横向磁场对表面电导变化曲线的影响。

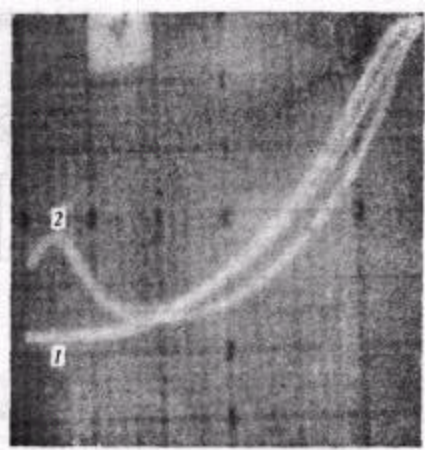


图3 电导变化(纵坐标)和横向电压(横坐标)关系曲线的示波图照片

1——不存在磁场时; 2——存在磁场时。

根据我们的实验结果,可以认为,在我们的实验条件下,横向磁场对场效应曲线的影响,主要地不是由于霍尔电场的影响,而是由于在表面场效应上迭加了磁浓缩效应所引起的样品电导的变化。

所谓磁浓缩效应,就是在上述取向的电流和磁场的作用下,样品中的载流子向两个大表面方向聚集,在 x 方向形成了载流子的浓度梯度,当样品两面的表面复合速度 s_1 和 s_2 不相等时,就会引起样品电阻的变化。根据 Пикус^[4] 的分析,当满足一定条件时^[5],样品电导率变化的表达式可以写为

$$\frac{\Delta\sigma_H}{\sigma_0} = \left(\frac{\mu_n H}{c}\right)^2 (b_m - a_m^2) \frac{n + pb^3}{n + pb} + \frac{a_m}{2} \left(\frac{\mu_n H}{c}\right) \frac{pn}{n + p} \frac{(b+1)^2}{n + pb} \frac{e\mathcal{E}d}{kT} \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2 + d/\tau}, \quad (1)$$

公式中的第二项就被称为磁浓缩效应。其中 σ_0 是没有磁场时样品的电导率; $\Delta\sigma_H$ 是磁场存在时样品电导率的变化; H 是磁场强度; $\mathcal{E}$ 是样品中的电场强度; d 是样品厚度; s_1 和 s_2 分别是样品两个大表面的表面复合速度; $b = \mu_p/\mu_n$ 是空穴和电子迁移率之比; τ 是样品体寿命; n 和 p 分别是电子和空穴的体内平衡浓度; a_m 和 b_m 是与样品体内散射机构有关的数量级为 1 的系数。

从(1)式我们看到,磁浓缩效应所引起的电导变化依赖于样品的电阻率、厚度和表面复合速度。并且已知,表面复合速度是表面势垒(或横向电压)的函数,因而,同表面电导一样, $\Delta\sigma_H$ 也受到横向电场的调制。电阻率越高,则 $\Delta\sigma_H$ 越大;当电阻率降低时, $\Delta\sigma_H$ 的值随之急剧减小。这就是横向磁场只对第一类样品的场效应曲线有很大影响,而对第二类样品没有影响的原因。

由于磁浓缩效应讯号正比于乘积 $\mathcal{E}H$,当单独地改变磁场方向或电流方向时,磁浓缩效应讯号的符号也随之改变,因而改变磁场方向或改变电流方向,磁场对场效应曲线影响的效果都是一样的。

为了证明横向磁场对表面电导变化的影响是由于磁浓缩效应的作用,我们还对第一类样品做了如下两方面的实验。

第一,对于原来被观察到横向磁场对场效应曲线有显著影响的样品,用砂纸磨擦其非测量的一面(被测量的一面保持不变),使其表面复合速度满足 $s_2 \gg s_1$ 的条件,然后在磁场中重新进行测量。这时发现,磁场对表面电导的影响大大减小,甚至有时已经观察不出来。这可解释如下:根据公式(1),当 $s_2 \gg s_1$ 时, $\frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2 + d/\tau}$ 的绝对值趋近于 1,即磁

浓缩效应讯号的值几乎不再随横向电场而变化,因而观察不到它对场效应曲线的影响。

第二,把同样的样品磨薄,使其厚度 ≤ 0.02 厘米,表面经过很好的腐蚀,然后进行同样的测量。这时也发现,横向磁场对场效应曲线几乎没有影响。对它的解释是,由于场效应讯号的值与样品厚度 d 成反比关系,而根据(1)式,磁浓缩效应讯号与 d 成正比关系。

这样,当 d 变得很小时,场效应讯号变得很大,而磁浓缩效应讯号变得很小,因此,没有观察到横向磁场对场效应曲线的影响。

象图 3 所示的实验结果,即对于个别样品,当加上横向磁场时,电导变化曲线中出现了一个明显的极大值,这也是上述解释的一个很好证明。我们可以认为,这时在示波器上所观察到的电导变化应为

$$\Delta\sigma_T = \Delta\sigma_s + \Delta\sigma_H, \quad (2)$$

式中 $\Delta\sigma_T$ 是总的电导变化; $\Delta\sigma_s$ 是场效应所引起的表面电导变化; $\Delta\sigma_H$ 是如公式(1)所示的由磁场所引起的电导变化。因为(1)式中的第一项是不随横向电场变化的,所以(2)式中的 $\Delta\sigma_H$ 实际上就是表示磁浓缩效应所引起的电导变化。 $\Delta\sigma_H$ 正比于 $\left| \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2 + d/\tau} \right|$, 并且已知,表面复合速度 s 与表面势垒 ψ (或横向电场)的关系曲线一般来说具有一个极大值 $s_{\max}$, 因此, $\Delta\sigma_H$ 与横向电场的关系曲线也应该出现一个对应的极大值,如图 3 中的曲线 2 所示。至于在大部分的实验中,没有观察到这个极大值出现的原因,一方面可能是由于横向电场不够大,还不足以使表面复合速度出现极大值,因而相应地, $\Delta\sigma_H$ 也没有极大值出现;另一方面也可能是,虽然 $\Delta\sigma_H$ 已经出现了极大值,但是由于 $\Delta\sigma_s \gg \Delta\sigma_H$, 或者是 $\Delta\sigma_s$ 变化的斜率大于 $\Delta\sigma_H$ 变化的斜率,当 $\Delta\sigma_H$ 与 $\Delta\sigma_s$ 迭加起来时,极大值就看不到了。在我们的实验中,大多数是属于前面一个原因。

当然,要检验横向磁场对场效应的影响是否由于磁浓缩效应的作用,最好的方法是单独测量磁浓缩效应讯号,并把它同上述实验进行比较。为此,我们采用文献[10]中的方法测量了磁浓缩效应的讯号。它的简单原理是,当磁场存在并满足一定条件时,在样品两端加上一个角频率为 ω ($\omega < \frac{2D}{d}$, D 表示样品中载流子的扩散系数)的交变电压 $E_\omega \cos \omega t$ 时,由于磁浓缩效应所引起的电导变化,经过简单的分析可知,这时降落在样品两端上的电压降除了基波电压以外,还有直流分量 E_c 和二次谐波电压 $E_{2\omega}$ 。 E_c 的值为

$$E_c = AHE_\omega^2 \left| \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2 + d/\tau} \right|, \quad (3)$$

其中

$$A = \frac{a_m}{4} \frac{e\mu_n(b+1)^2}{ckT} \frac{pn}{(p+n)(n+pb)} \frac{d}{l} = \text{const},$$

l 是样品长度,其余符号同前面所述。这样,只要在图 1 所示的测量线路中,把方框 1 改为音频讯号发生器,并加上适当的滤波装置,使得加在样品两端上的电压是一个纯正弦电压。再在放大器前面也加上适当的滤波器,滤去基波电压 E_ω 和二次谐波电压 $E_{2\omega}$, 我们就能够测量 E_c 的值。

在交流场效应中,加在样品两端的是直流电压 E_0 ,当存在磁场时,根据类似的分析,可得到磁浓缩效应讯号 E_c 为

$$E_c = 2AHE_0^2 \left| \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2 + d/\tau} \right|. \quad (4)$$

讯号 E_c 和一般场效应讯号迭加在一起,把存在和不存在磁场时的电导变化曲线进行比较,我们就能求出 E_c 的值。

如果认为,在交流场效应中,加上磁场并没有引起样品表面势垒的附加变化,则对于

同一个样品,当磁场强度保持不变时,对应于同一横向电场的值,比较(3)和(4)式,我们得到

$$\frac{E_c}{E_\omega^2} = \frac{E_c}{2E_0^2} \quad (5)$$

图4画出了用两种方法所测得的结果,可以看出,两者基本上是相接近的。

根据(3)和(4)式,我们也可以计算出样品的被测表面的表面复合速度 s_1 与横向电压

的依赖关系,如图5。从图看出,利用两种方法所求出的表面复合速度的值是较好地一致的。这样一来,比较存在和不存在磁场时的电导变化而求出表面复合速度,初步看来是有可能的。

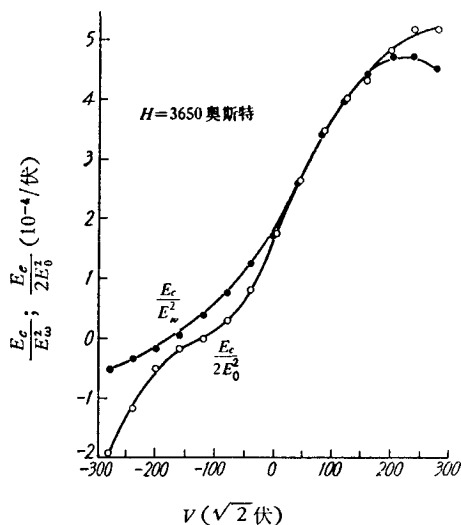


图4 利用两种方法分别测量的 $\frac{E_c}{2E_0^2}$ 和 $\frac{E_c}{E_\omega^2}$ 与横向

电压 V 的关系

○——表示 $\frac{E_c}{2E_0^2}$ 的实验点;

●——表示 $\frac{E_c}{E_\omega^2}$ 的实验点。

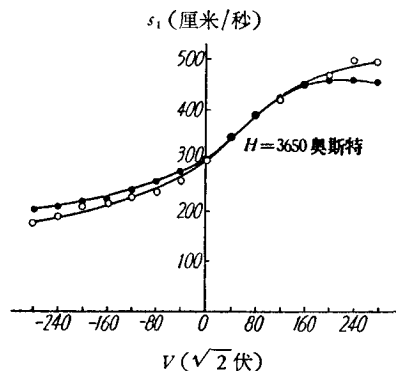


图5 应用图4的数据所计算的表面复合速度 s_1 与横向电压 V 的关系

○——表示从 $\frac{E_c}{2E_0^2}$ 计算出的结果;

●——表示从 $\frac{E_c}{E_\omega^2}$ 计算出的结果。

四、讨 论

根据我们上面所提出的实验结果和分析,可以认为,横向磁场对场效应的影响主要是由于在表面电导的变化上迭加上了一个磁浓缩效应所引起的电导变化。以前的作者却认为,这是由于霍耳电场改变了样品的表面势垒的结果。如果是这样的话,存在和不存在磁场时的两条场效应曲线的形状应该是完全一样的,只不过是极小值的位置向左或向右移动而已。但是,在我们的实验中观察到,当存在和不存在磁场时,不仅是电导变化曲线的极小值位置发生移动,而且整个曲线形状也发生变化,甚至有些曲线出现了明显的极大值。

上面也提到,比较存在和不存在磁场时的电导变化,可以求出样品的表面复合速度随横向电场的变化,初步测量的结果与从单独测量磁浓缩效应所得出的结果基本一致。但是,必须强调指出,这还不够严格的,因为在我们的分析中,仅仅考虑了磁浓缩效应对表面电导变化的影响,而忽略了其他可能引起表面电导变化的因素。例如,没有考虑霍耳电

场所引起的表面势垒变化, 虽然我们认为这变化与横向电场所引起的表面势垒变化比较起来是不大的; 同时, 也没有考虑到存在大的表面势垒时磁浓缩效应的修正问题。此外, 磁场对 Ge 表面能级参数以及表面载流子的弛豫过程是否发生影响, 也还是不知道的。上述这些原因造成了计算表面复合速度中的较大误差。为了弄清楚这些问题, 必须从多方面进行深入的研究。

本工作是在王守武先生指导下进行的。

参 考 文 献

- [1] Petritz, R. L., *Phys. Rev.*, **111** (1958), 1254.
- [2] Zemel, J. N. and Petritz, R. L., *Phys. Rev.*, **111** (1958), 1263.
- [3] Zemel, J. N. and Petritz, R. L., *J. Phys. Chem. Solids*, **8** (1959), 102.
- [4] Пикус, Г. Е., *ЖТФ*, **26** (1956), 22.
- [5] Жузе, В. П., Пикус, Г. Е. и Сорокин, О. В., *ЖТФ*, **27** (1957), 1167.
- [6] Жузе, В. П., Пикус, Г. Е. и Сорокин, О. В., *ФТТ*, **1** (1959), 1420.
- [7] Aerts, E., Amelinckx, S. and Vennik, J., *J. Electron. Contro.*, **7** (1959), 497.
- [8] Aerts, E., *J. Electron. Contro.*, **9** (1960), 217.
- [9] Einspruch, N. G., *J. Phys. Chem. Solids*, **23** (1962), 1743.
- [10] Сорокин, О. В., *ПТЭ*, № 2 (1959), 68.

INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON SURFACE FIELD-EFFECT IN GERMANIUM

HSING I-JUNG PAI HUNG-NAI CHANG LI-PENG WANG CHIH
(*Academia Sinica*)

ABSTRACT

The influence of transverse magnetic field on surface a.c. field-effect in germanium has been studied, and a different interpretation from other investigators is proposed. According to our experimental results, it may be considered that the influence of magnetic field on surface field-effect is predominantly referred to the additional change in conductance of sample caused by the "magnetic-concentration effect" rather than the change in surface barrier height caused by the Hall e.m.f., and we also suggest the possibility of using this experiment to determine the dependence of the surface recombination velocity on the surface barrier.