

内 容 简 介

本书介绍半导体材料物理参数、表面参数和双极与场效应晶体管参数以及TTL、CMOS集成电路与运算放大器参数的测试方法，还着重介绍了实验原理和测试分析方法。

本书可作为高等学校工科电子类半导体物理与器件专业及其他大专院校有关专业的教材，也可供中专、技校有关专业选用，还可作为从事半导体材料、工艺及器件参数测试研究的科研单位和工厂的有关科技人员参考。

半导体实验教程

(基础部分)

郑云光 王 编

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本：787×1092 毫米¹/₁₆ 印张：10¹/₄ 字数：253千字

1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷

印数：1—1300

ISBN 7-5618-0182-3

TM·13

定价：2.15元

前 言

目前国内出版的有关半导体专业实验教学的教材,只有半导体物理参数测试与分析方面的书,内容比较单一。我们的目的是编写既包括半导体物理参数和工艺参数测试,又包括晶体管 and 集成电路参数测试,内容比较完整,适用于高等学校工科电子类半导体物理与器件专业及其他大专院校有关专业使用的教材。而且本书还可供有关研究所和工厂的科技人员参考。

本书所列实验包括半导体物理、晶体管和集成电路三部分。其中包括半导体材料的导电类型、电阻率、少子寿命和缺陷密度的测试;器件工艺中的结深、膜厚、表面电荷、界面态密度、方块电阻和杂质浓度分布的测试;双极和场效应晶体管参数,TTL和CMOS集成电路以及运算放大器参数的测试。

本书的特点是着重介绍实验原理和对一些问题的分析方法,对测试方法的叙述则力求从简。本书能帮助大学生或其他读者提高分析问题和解决问题的能力。书中的每个实验都附有思考题,每一部分后面附有参考资料。为便于有关院校、研究所和工厂使用本书,在上述实验中多采用半导体测试方面常用的仪器设备。

天津大学半导体物理与器件专业对实验教学进行了多年的改革与探索,专业实验独立设课已有七年,这方面的教材已经过长期使用,比较成熟。在此基础上我们对原有教材作了整理、修改和补充,编写了本书。本书内容比较丰富、完整,但由于编写时间限制,有些综合性设计型实验只能在以后另行编写。

本书由郑云光主编。全书共包括29个实验,其中实验1-1、1-2、1-4、1-7、1-8由姚素英编写;实验1-5、1-6、1-11、1-12由王彦芬编写;实验1-9、1-10由郑丽滋编写;实验1-13、2-2、2-4、2-5、2-8由申云琴编写;实验2-1、2-3、2-6由郑云光编写;实验3-1、3-2、3-3、3-4由张生才编写;实验3-5、3-6、3-7、3-8由宋玉兴编写;实验1-3由李斌桥编写;实验2-7由陈德里编写。参加本书编写工作的还有孙锡兰、杨玉玲、牛秀文和贾宝华。

由于我们水平有限,书中难免缺点和错误,恳切希望各兄弟院校和读者批评指正。

编 者

目 录

第一部分 半导体物理

实验1-1	半导体常温霍尔效应研究	3
实验1-2	双脉冲法测量半导体中少数载流子寿命	9
实验1-3	光电导衰减法测量硅中少子寿命	14
实验1-4	硅缺陷显示与观察	18
实验1-5	四探针法测半导体材料电阻率及方块电阻	22
实验1-6	椭圆偏振法测量半导体表面介质薄膜厚度和折射率	32
实验1-7	p-n结电容的测量	40
实验1-8	MOS结构C-V特性测量	44
实验1-9	用准静态C-V法测量硅-二氧化硅界面态密度	51
实验1-10	硅太阳能电池的测量	57
实验1-11	电解水氧化-干涉法测p-n结结深	61
实验1-12	滚槽法测结深	65
实验1-13	二次谐波法测量纵向杂质浓度分布	69
附录		73
参考文献		75

第二部分 晶体管

实验2-1	用JT-1图示仪检测双极型晶体管	79
实验2-2	晶体管 h_{FE} 随注入电流变化测试	89
实验2-3	晶体管电流增益 h_{FE} 的温度特性测试	91
实验2-4	晶体管热阻测量	94
实验2-5	晶体管低频H参数与反向电流测量	100
实验2-6	晶体管 f_T 随工作电流、工作电压的变化	104
实验2-7	晶体管开关时间测量	107
实验2-8	用JT-1 图示仪检测场效应晶体管	110
参考文献		117

第三部分 半导体集成电路

实验3-1	TTL与非门电路的模拟与测试.....	121
实验3-2	TTL静态参数测试.....	124
实验3-3	TTL与非门电路输入输出特性测试.....	131
实验3-4	TTL与非门电路电压传输特性的测试.....	135
实验3-5	CMOS集成电路的直流参数测试（一）.....	138
实验3-6	CMOS集成电路的直流参数测试（二）.....	142
实验3-7	CMOS集成电路动态参数测试.....	146
实验3-8	集成运算放大器参数的测量.....	148
参考文献		154

第一部分 半导体物理

实验 1-1 半导体常温霍尔效应研究

一、概 述

在半导体的基本研究和应用中,霍尔效应有着极其重要的意义。霍尔效应测量不仅是研究半导体性质的一个重要实验方法,而且利用半导体材料制成的霍尔元件及霍尔集成电路已广泛地应用于测试仪器及自动控制系统中。

霍尔效应是霍尔于1879年首先在金属中发现的一种磁电效应^[1]。然而后来在半导体中发现的霍尔效应要比金属中的大几个数量级。半导体霍尔效应有常温和变温两种。所谓常温霍尔效应是指在室温下测量霍尔系数和电导率,以确定半导体样品的导电类型、样品掺杂浓度及霍尔迁移率等。所谓变温霍尔效应是指温度从低温杂质电离区到高温本征激发范围内的研究。这种测量除具有室温测量的功能外,还可确定杂质电离能、禁带宽度及杂质补偿度等参量,也可研究杂质带导电。目前,对量子霍尔效应的研究,又使霍尔效应有了新的发展^[2]。

二、实验目的

在常温下测量给定半导体样品的霍尔系数及电导率,从而判断样品的导电类型,计算样品的载流子浓度和霍尔迁移率,掌握霍尔效应的一般规律。

三、实验原理

半导体的霍尔效应是测量半导体中载流子在电场和磁场同时存在时的迁移现象。如果对半导体样品通以电流,在与电流垂直的方向加上磁场,则样品中会产生与电流和磁场方向垂直的横向电势差,这种现象称为霍尔效应^[3]。

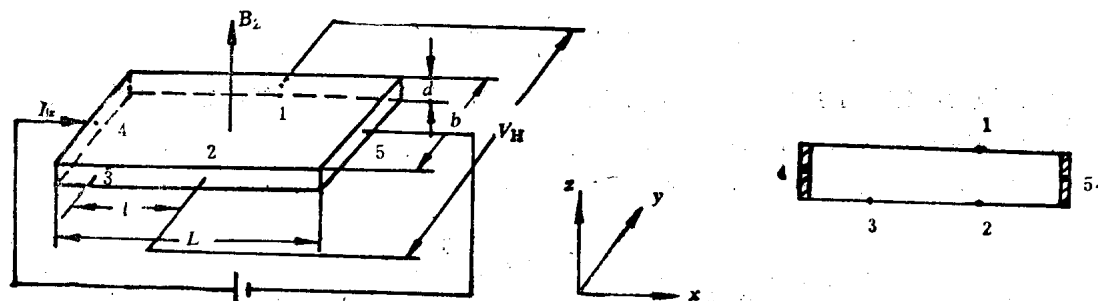


图 1-1 霍尔效应示意图

图1-1中样品为矩形，长宽厚分别为 L 、 b 、 d 。对样品沿 x 方向通有电流 I_x ，沿 z 方向加有磁感应强度为 B_z 的均匀磁场；则在垂直于电场和磁场的 $+y$ 或 $-y$ 方向上产生一横向电场 E_y ，这个横向电场称为霍尔电场，其方向视半导体导电类型而定。实验指出，霍尔电场强度 E_y 与电流密度 J_x 和磁感应强度 B_z 成正比，即

$$E_y = R_H J_x B_z \quad (1-1)$$

R_H 是比例系数，称为霍尔系数。

现以一种载流子导电的样品为例简单说明霍尔效应产生的原因。假设样品为 P 型半导体，且样品温度均匀，不考虑载流子速度的统计分布。在外加电场作用下， P 型半导体中多数载流子空穴以 v_x 的速度沿电流方向作定向漂移运动，电流密度为 $J_x = pqv_x$ 。这里 p 代表空穴密度， q 代表电子电荷。同时，在磁场 B_z 的作用下，运动着的空穴又受到洛伦兹力的作用而发生偏转。偏转方向是 $-y$ 方向，偏转力的大小为 $qv_x B_z$ 。于是在样品两端引起电荷积累，在 B 面积累空穴，从而产生一个沿 $+y$ 方向的横向电场 见图1-2(a)。

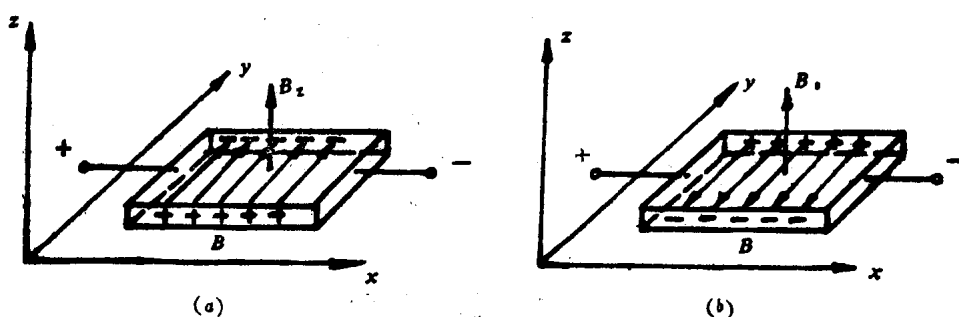


图 1-2 霍尔效应的产生

当横向电场对空穴的作用与洛伦兹力的作用相抵消时，达到稳定状态，此时的横向电场 E_y 满足

$$qE_y - qv_x B_z = 0 \quad (1-2)$$

$$E_y = v_x B_z \quad (1-3)$$

将 $v_x = \frac{J_x}{pq}$ 代入式 (1-3) 得

$$E_y = \frac{J_x B_z}{pq} \quad (1-4)$$

式 (1-1) 和 (1-4) 相比较得

$$R_H = \frac{1}{pq} > 0 \quad (1-5)$$

式 (1-5) 说明：霍尔系数的大小与载流子浓度有关，载流子浓度愈低，霍尔系数愈大，所以可通过测量霍尔系数大小确定样品掺杂浓度。

同理，对于 n 型半导体，在 $-y$ 方向产生一横向电场，见图1-2(b)。同样有：

$$R_H = -\frac{1}{nq} < 0 \quad (1-6)$$

这里的横向电场 E_y 称为霍尔电场。式 (1-5) 和 (1-6) 表明， n 型和 P 型半导体霍尔电场方向不同，故引起的霍尔系数符号也相反。因而，由霍尔系数正负可判断样品的导电类型。

横向霍尔电场的存在表明,在有垂直磁场时,电场和电流不在同一方向上,两者夹角 θ 称为霍尔角。稳定时,+ y 方向没有电流,电流仍沿 x 方向,但合成电场不再沿 x 方向。对P型半导体,电场偏向+ y 方向,霍尔角 θ_p 是正的,对n型半导体,电场偏向- y 方向,霍尔角 θ_n 是负的。如图1-3所示。

由图1-3可看出:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_p &= E_y / E_x \\ \operatorname{tg} \theta_n &= -E_y / E_x \end{aligned} \quad (1-7)$$

式(1-7)表明,霍尔角的符号和 R_H 一样,p型为正,n型为负。

如果考虑到载流子速度的统计分布,经严格的理论推导得出

$$R_H = \gamma_H \frac{1}{pq} \quad (1-8)$$

$$R_H = -\gamma_H \frac{1}{nq} \quad (1-9)$$

式中 γ_H 称为霍尔因子。它与散射机构和能带结构有关,是一常数,通常在0.5和1.5之间^[4]。

对球形等能面的非简并半导体,弱磁场下($\operatorname{tg} \theta \ll 1$), $\gamma_H = \frac{3}{8}\pi$,强磁场下($\operatorname{tg} \theta \gg 1$), $\gamma_H = 1$ ° 对简并半导体, $\gamma_H = 1$ 。

如果半导体中两种载流子均参与导电,则要同时考虑两者对霍尔系数的影响。弱磁场时有^[3]

$$R_H = \frac{1}{q} \frac{(p - nb^2)}{(p + nb^2)^2} \quad (\text{不考虑载流子速度统计分布}) \quad (1-10)$$

$$R_H = \frac{\gamma_H}{q} \frac{(p - nb^2)}{(p + nb^2)^2} \quad (\text{考虑载流子速度统计分布}) \quad (1-11)$$

式中 $b = \mu_n / \mu_p$

强磁场时有

$$R_H = \frac{1}{q} \frac{1}{(p - n)} \quad (1-12)$$

四、测量仪器及样品

1. 测量方法

实验中,通常是通过测量霍尔电压 V_H 、电导率电压 V 来确定霍尔系数和电导率的,如图1-1所示。 V_H 由电极1、2测出, V 由电极2、3测出。从图1-1可看出,霍尔电压和霍尔电场的关系为:

$$V_H = E_y b \quad (1-13)$$

而 x 方向的电流密度则为:

$$J_x = I_s / (bd) \quad (1-14)$$

将式 (1-13)、(1-14) 代入式 (1-1) 得:

$$V_H = R_H I_x B_z / d \quad (1-15)$$

$$R_H = V_H d / I_x B_z \quad (1-16)$$

在国际单位制中, R_H 单位为 m^3/c ($\text{米}^3/\text{库仑}$), B_z 单位是 T (特斯拉), V_H 单位是 V, I_x 单位是 A, 样品长度单位为 m。但一般在测量中, 长度单位用 cm 表示, B_z 单位 G (高斯), 故霍尔系数可表示为:

$$R_H = \frac{V_H d}{I_x B_z} \times 10^8 \quad \text{cm}^3/\text{c} \quad (1-17)$$

$$V_H = \frac{R_H I_x B_z}{d} \times 10^{-8} \quad \text{V} \quad (1-18)$$

电导率电压 V_s 是在无磁场情况下测量的。由图 1-1 中 2、3 电极测出。由图中可知

$$V_s = I_x l / \sigma db \quad \text{V}$$

则电导率

$$\sigma = I_x l / V_s db \quad \Omega^{-1} \text{cm}^{-1} \quad (1-19)$$

式中 l 为电极 2、3 之间的距离。

以上是矩形样品的测量方法, 如样品为不规则形状, 则可用 Van der Pauw 法测量。因原理相同, 这里不再赘述, 读者可参阅有关文献^[5]。

2. 实验装置

实验装置如图 1-4 所示, 共分三部分。

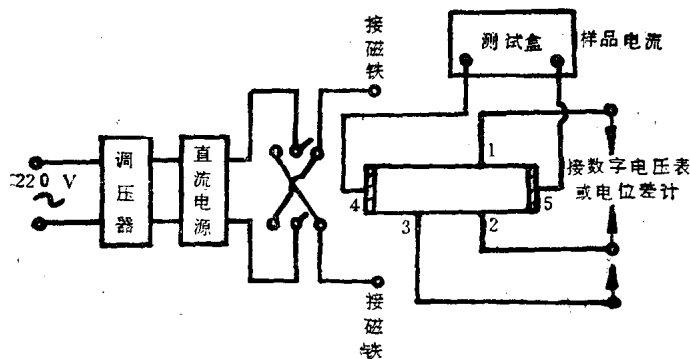


图 1-4 霍尔效应测量装置

(1) 磁场部分 可用 U-5 型电磁铁, 由直流稳压电源对其提供电流, 产生均匀恒定磁场。

(2) 样品电流部分 可用各种直流电源提供大小和方向均可改变的电流。

(3) 霍尔电压及电导率电压测量 可用数字电压表或电位差计进行测量。

3. 样品制备

将按要求切割的矩形样品进行电接触制备, 以便达到良好的欧姆接触。为了避免少子注入效应, 要求在样品两端面进行处理, 如磨毛或喷砂, 然后再做电接触。接触面要完全盖住两端面, 其它电极接触面要小于 0.02 cm。对 n 型硅, 可用金-锑合金作欧姆接触电极, P 型硅可用金-铜合金或铝做电极。接触方法可采用电镀、溅射或蒸发等技术完成。

五、实验步骤与要求

1. 实验步骤

- (1) 装样品 保证样品表面与磁场垂直, 同时要求电流方向与磁场方向垂直。
- (2) 测磁场 接通电源, 用高斯计测磁感应强度 B_z , 满足实验要求 (本实验为弱场测量)。
- (3) 测电流 调节样品电流达到所要求。
- (4) 测横向电压 用数字电压表或电位差计测量电极1、2间的横向电压。依次改变 I_x 、 B_z 方向, 测量四组数据, 分别对应于 $V_1(+I, +B)$ 、 $V_2(-I, +B)$ 、 $V_3(-I, -B)$ 、 $V_4(+I, -B)$ 。
- (5) 测电导率电压 撤销磁场, 用数字电压表或电位差计测量电极2、3间的电压 V_o 。依次改变电流方向, 测出 $V_{o1}(+I)$ 、 $V_{o2}(-I)$ 。

2. 实验要求

- (1) 由测得的横向电压 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 , 按下式计算出霍尔电压

$$V_H = (V_1 - V_2 + V_3 - V_4) / 4 \quad (1-20)$$

由测得的电导率电压 V_{o1} 、 V_{o2} 计算出平均电导率电压

$$V_o = (|V_{o1}| + |V_{o2}|) / 2 \quad (1-21)$$

- (2) 判断样品导电类型。
- (3) 计算样品的霍尔系数和载流子浓度 (设一种载流子导电)。
- (4) 确定样品电阻率和霍尔迁移率。

3. 关于实验的校正

- (1) 样品形状大小 式(1-17)、(1-18)是在样品长度 L 相对于宽度 b 为无限大的情况下导出的, 即 $L \gg b$ 。在样品为有限长的情况下, 公式需进行校正, 则式(1-18)变为

$$V_H = \{ (R_H I_x B_z f(L/b)) / d \} \times 10^{-8}$$

式中 $f(L/b)$ 称为形状系数。

实验表明, 当 $(L/b) > 4$ 时, $f(L/b)$ 接近1, 式(1-18)仍可使用。一般要求样品总长度在1.0~1.5cm之间, 而长宽比必须大于4。这主要是为了避免电流电极的短路作用对 V_H 的影响。

- (2) 附加电压 V_o 测量霍尔电压 V_H 的两个电极1、2理论上讲应在同一等位面上, 如图1-5所示的1、2'面 (虚线表示电流 I_x 通过样品产生的等位面)。

但实际上很难做到两电极在同一等位面内。因此实际测量的往往是电极1、2两点的电压, 它们包括了电流 I_x 在2、2'段电阻上产生的电压降, 即 $V_o = I_x r_{12}$ 。 V_o 的正负与电流 I_x 方向有关, 与磁场 B_z 方向无关。

- (3) 热磁效应引起的附加电压 当有电流或热流流经置于磁场中的半导体样品时, 样品两侧便产生附加电压。这种现象称为热磁效应。在霍尔效应测量中, 当外加电流沿 x 方向流经半导体样品时, 在电极4、5和样品接触处, 因为存在珀尔贴效应, 使样品一端发热, 温

度上升，另一端吸热，温度下降，故引起温度差。这表明，在霍尔效应测量中，样品中有热流、电流存在。热磁效应包括爱廷豪森效应、能斯脱效应以及里纪-勒杜克效应。这些效应与霍尔效应同时存在，从而引起霍尔电压误差（图1-6）。

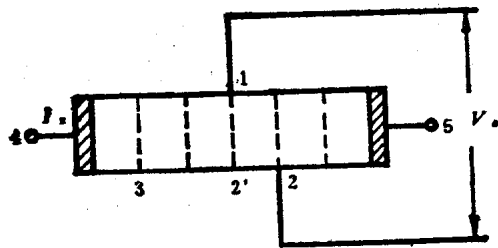


图 1-5 附加电压 V_0 的产生

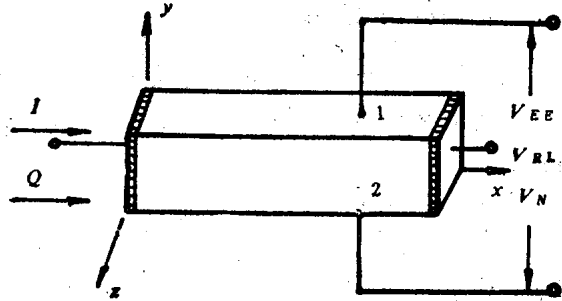


图 1-6 热磁效应示意图

①爱廷豪森效应（简称 $E.E.$ ） $E.E.$ 是电流磁效应。当样品沿 x 方向通以电流 I_x ，在 z 方向有磁场 B_z 存在时，则样品在 y 方向产生温度差 $T_1 - T_2$ ，且 $(T_1 - T_2) \propto I_x B_z$ 。这一温度差在电极 1、2 之间产生电动势 V_E ， $V_E \propto I_x B_z$ ， V_E 的正负与 I_x 、 B_z 方向有关。

②里纪-勒杜克效应 $R-LE$ $R-LE$ 是一种热磁效应。当样品沿 x 方向存在热流 Q 、在 z 方向加有磁场 B_z ，则在 y 方向产生温度差 $T_1 - T_2$ ， $(T_1 - T_2) \propto \frac{\partial T}{\partial x} B_z$ 。这一温度差引起 y 方向电极 1、2 间产生电位差 V_{RL} ， $V_{RL} \propto \frac{\partial T}{\partial x} B_z$ ， V_{RL} 正负与 B_z 有关，与 I_x 无关。这一效应与 $E.E$ 相似，只不过 $R-LE$ 是由热流引起的温度差， $E.E$ 是由电流引起的温度差。

③能斯脱效应（简称 $N.E.$ ） $N.E.$ 也是一种热磁效应。当样品沿 x 方向存在热流 Q ，在 z 方向加有磁场 B_z 时，则在 y 方向产生电势差 V_N ， $V_N \propto (\partial T / \partial x) B_z$ ， V_N 的正负与磁场有关，与电场无关。

从以上分析可知，样品电极 1、2 间测得的电压包括以上所有效应产生的电压，即

$$V = V_H + V_E + V_{RL} + V_N + V_0$$

由于以上各种效应均与电场或磁场方向有关，可以通过改变 I_x 和 B_z 的方向使 V_{RL} 、 V_N 、 V_0 从计算结果中消去，而 V_E 与 V_H 同样随 I_x 、 B_z 方向变，用改变电流磁场的方法不能在计算结果中使 V_E 自 V_H 中消去。但由 V_E 引起的误差约为 5% 左右，所以可以忽略。

在实验中测量下列四组数据

次数	磁场	电场	测量电压
I	$+B_z$	$+I_x$	$V_1 = V_H + V_E + V_{RL} + V_N + V_0 =$
II	$+B_z$	$-I_x$	$V_2 = -V_H - V_E + V_{RL} + V_N - V_0 =$
III	$-B_z$	$-I_x$	$V_3 = V_H + V_E - V_{RL} - V_N - V_0 =$
IV	$-B_z$	$+I_x$	$V_4 = -V_H - V_E - V_{RL} - V_N + V_0 =$

把测量出的四个电压经代数运算后得

$$V_H + V_E = (V_1 - V_2 + V_3 - V_4)/4$$

略去 V_E ,

$$V_H = (V_1 - V_2 + V_3 - V_4)/4$$

上式即为式 (1-20)。

六、思考题

- (1) 简述霍尔效应原理及其应用。
- (2) 比较霍尔迁移率和电导迁移率的概念。
- (3) 简述霍尔效应测量中各种副效应产生的原因及其消除方法。

实验 1-2 双脉冲法测量半导体中少数载流子寿命

一、概 述

半导体中少数载流子寿命对半导体的许多重要物理功能起着决定性作用,如p-n结注入、晶体管放大、开关速度等。半导体发光器件的发光效率、太阳电池的转换效率等也和少数载流子寿命有关。因此,在半导体基本理论的研究和器件设计中,都以此参量作为基本依据之一。

少数载流子寿命(简称少子寿命)是描述半导体处于非平衡状态的物理量^[1]。处于热平衡状态的非简并半导体,在一定温度下,多数载流子浓度 n_0 (或 p_0)和少数载流子浓度 p_0 (或 n_0)的乘积是恒定的。即

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

这里 n_i 表示该温度下的本征载流子浓度。但在外界作用下,这种情况可以被破坏,从而使半导体处于非平衡态。这些外来作用一般包括用光照射、加电脉冲等手段。如用一光子能量略大于半导体禁带宽度的光照射n型半导体表面时,则可将价带电子激发到导带,使电子浓度和空穴浓度分别增加 Δn 和 Δp (图1-7)。这部分多出的载流子叫非平衡载流子。其中 Δn 称为多数载流子, Δp 称为少数载流子(对p型半导体则相反)。若样品中无明显陷阱效应,则 $\Delta n = \Delta p$ 。当光照停止后,在半导体内部作用下,非平衡载流子将逐渐消失,即导带中非平衡电子将逐渐回到价带之中,与空穴复合,直到半导体最后回到原来的平衡态。非平衡载流子从产生到复合平均存在的时间就是载流子寿命。相对于非平衡多数载流子,非平衡少数载流子的影响处于主导决定地位,因而非平衡载流子寿命常称为少子寿命。实验证明,在简单情况

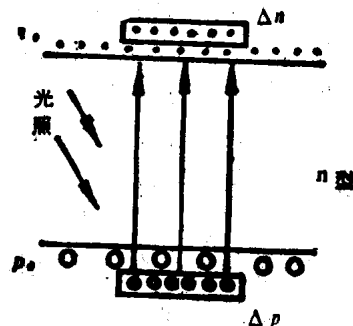


图 1-7 光照产生非平衡载流子

下, 非平衡载流子随时间按指数规律衰减。对n型半导体

$$\Delta p \propto \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

式中, τ 为少子寿命, 并设 $t = 0$ 时, 光照突然停止。

为了测量少子寿命, 近年来出现了很多测量方法。这些方法可分为两大类: 一类是材料测量, 一类是成品器件测量。在材料型测量中, 基于少数载流子的产生和检验方式不同, 故有多种测量方法, 如常用的双脉冲法、光电导衰退法、扩散长度法、表面光电压法等。在器件型测量中, 有p-n结二极管反向恢复时间法、开路电压衰减法、MOS结构电容法等。本实验采用双脉冲法。

二、实验目的

学会用双脉冲法测量单晶中的少子寿命, 掌握测准条件。进一步理解少子寿命的概念。

三、实验原理

双脉冲法是基于探针下半导体材料的电导调变效应提出的, 故又称电导调变法。其实质是: 利用金属探针和半导体样品表面相接触, 形成点接触二极管。通过接触点利用电脉冲给样品注入非平衡少子, 对样品电导进行调制, 从而测量少子寿命。

向样品注入两个矩形电流脉冲, 要求这两个电流脉冲前沿相等、幅度恒定, 但延迟时间(即两个脉冲间隔时间) t 可变, 如图1-8(a)所示。用示波器观察两个脉冲通过样品的压降, 其形状如图1-8(b)所示。

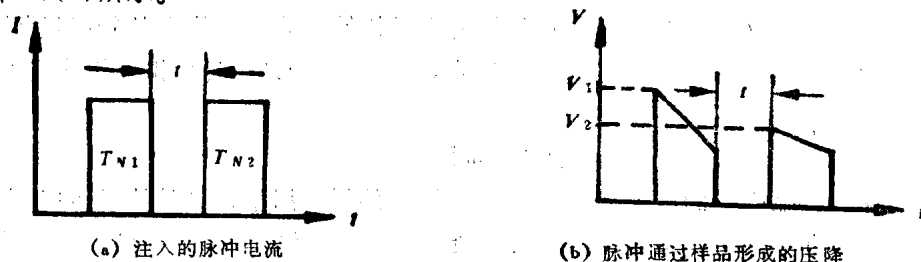


图 1-8

在第一个脉冲(注入脉冲)通过的时间内注入到样品中去的载流子, 在两个脉冲间隔时间 t 内进行复合。因而, 在第二个脉冲(测量脉冲)开始瞬间的电压, 决定于样品中贮存的非平衡载流子浓度。脉冲通过样品时, 电压的减少是由于引入非平衡载流子而使样品电导增加的缘故(电阻率减小, 而脉冲电流是常数, 故导致样品电压下降)。当注入脉冲停止注入后, 由它注入的少子因复合而减少。复合过程中样品的分布电阻随时间增加, 一直恢复到其平衡时的值。在这个过程中, 电压的变化规律直接反映样品中载流子浓度的变化规律。若延迟时间较短, 则注入脉冲注入的少子在时间 t 内还有一部分尚未复合, 因而测量脉冲在样品上产生的电压值比注入脉冲的电压值(指脉冲前沿对应的电压值)低。随着延迟时间 t 的延长, 两个脉冲前沿的电压值相差逐渐减小。显然, V_2 的数值是脉冲延迟时间 t 的函数。图1-($V_2(t) \sim t$)曲线的包络线, 反映载流子浓度与延迟时间的关系。

如果认为注入脉冲停止后，被引入的载流子浓度仅由于体内复合而改变，则除 $t=0$ 外，可有

$$V_1 - V_2 = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

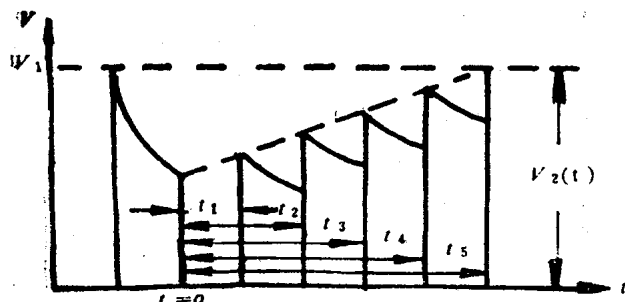


图 1-9 $V_2(t) \sim t$ 的关系

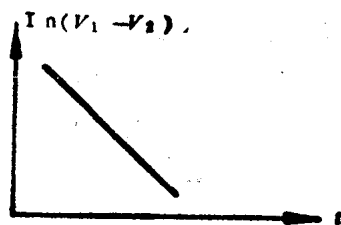


图 1-10

这里 V_1 是注入脉冲（即在第一个脉冲开始的瞬间）在样品上的电压降， V_2 是测量脉冲在样品上的电压降， τ 为少数寿命， t 为延迟时间。

将上式两边取对数，得

$$\ln(V_1 - V_2) = \ln A - t/\tau = K - t/\tau$$

上式显然为一直线方程。如果把两个脉冲电压前沿之差与相应的延迟时间 t 在半对数坐标纸上作图，便可得图1-10所示直线。

图中直线斜率的绝对值直接给出材料的非平衡少数寿命。式中 K 值并不影响斜率的值。

当 $V_1 - V_2 = e$ 时， $\ln e = K - t/\tau$ 。

从图中找到 $V_1 - V_2 = e$ 时对应的时间 t 就是寿命 τ 。

四、测量仪器及样品

1. 样品的制备

双脉冲法测寿命是利用点接触，加电脉冲给样品注入非平衡少子的。因此需要制备良好的欧姆接触点，其具体要求如下。

(1) 不同样品，对探针要求有所不同。如对 n 型硅样品，用银丝做探针较合适；对 n 型锗样品，用钨丝做探针效果较好；对 p 型锗、硅样品，可用磷铜丝做探针。要求探针与样品表面形成整流接触，也可用200~250V 0.1s的脉冲进行电形成。

(2) 样品表面要进行处理，以减少表面复合的影响。对于锗样品，正面用金刚砂研磨后，用 $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH}=5:3:3$ （体积比）腐蚀样品2~4 min，至表面光亮为止。对于硅样品，正面用金刚砂研磨后，用 $\text{HF}:\text{HNO}_3=1:3$ （体积比）腐蚀样品2~3 min至表面光亮为止。

(3) 样品背面用钢、镓、锡合金或金、镓合金做成良好的欧姆接触。

本实验采用电阻率为 $3\Omega \cdot \text{cm}$ 的 n 型锗样品，用直径 $\phi=0.3\sim0.5\text{mm}$ 电解抛光过的钨探

针。

2. 测量设备

本实验用测量方框图如图1-11所示。

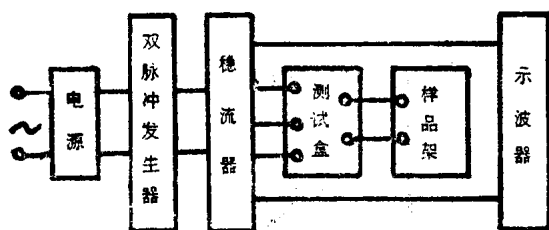


图 1-11 测量方框图

主要仪器有：

(1) 双脉冲信号发生器 (购买或自制)；

(2) 恒流器；

(3) 示波器 (SBT-5等)；

(4) 测试盒及样品架。

测量设备主要分两大部分：

第一部分 (发送) 用以产生振荡频率 f ，

延时 t 和可调脉冲宽度 T_{N1} 、 T_{N2} 的矩形脉冲 (恒流脉冲)。

第二部分 (接收测量) 用以接收测量 $V_s \sim t$ 的关系。它是将经过样品后输出的信号削波，将脉冲幅度削去一部分，然后放大，使这两脉冲差值明显可测，提高测量准确度，并测量出 $\Delta V \sim t$ 关系。

五、实验步骤与要求

1. 实验步骤

(1) 开机，预热。

(2) 调节 T_{N1} 、 T_{N2} 及延时 t ，使延时 t 变化时波形稳定，且能满足少子寿命的测准条件。

(3) 取 $I = 100 \text{ mA}$ ，测出 $\Delta V \sim t$ 的变化关系，算出寿命 τ 的值。

(4) 利用同步示波器的比较讯号读 ΔV 的值，利用时标在示波器上读出延时 t 的数值。

(5) 分别取 $I = 50 \text{ mA}$ 、 60 mA 、 70 mA 、 80 mA 、 100 mA 、 110 mA 、 120 mA 时，测出 $\Delta V \sim t$ 的变化关系。

2. 要求

(1) 将所测数据加以整理，在半对数坐标纸上或标准座标纸上做出 $\Delta V \sim t$ 或 $\ln \Delta V \sim t$ 关系图。利用中间点子的连线来计算 τ 值。

(2) 做出 $\tau \sim I$ 关系图，观察 τ 处于饱和的电流值。

(3) 确定本实验所测样品的寿命值。

3. 测准条件

在现有的实验条件下，两脉冲间隔内少子浓度的变化不仅决定于体内的复合，而且决定于在样品表面和接触点处的复合及扩散。为测量得更准确，对测试有一定要求，即所谓测准

条件:

(1) 在小注入范围内适当加大注入电流。

为了适当选取脉冲电流,可参考图1-12实验曲线。从图1-12中可看出,注入脉冲电流大于80mA时出现饱和现象,即当电流大于80mA时,寿命与脉冲电流几乎无关。

(2) 两脉冲之间延迟时间 t 的可调范围大一些,一般为 $\tau < t < 3\tau$ 。

(3) 脉冲宽度 T_N 在 $1.5\tau \sim 2\tau$ 之间。

图1-13给出寿命对注入脉冲宽度依赖关系的实验曲线。从图中可看出,当注入脉冲宽度大于寿命 τ 时,开始出现饱和,一般注入脉冲宽度大于1.5倍寿命值时为好。

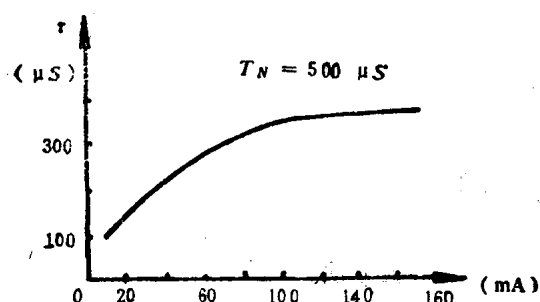


图 1-12 寿命对注入脉冲电流的依赖关系

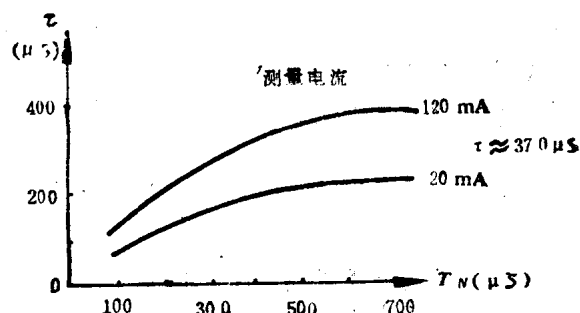


图 1-13 寿命与脉冲宽度的依赖关系

本实验取注入脉冲电流为100mA,注入脉冲宽度视寿命的大小而定,一般应先估算所测样品寿命(粗略)。

4. 双脉冲法特点

双脉冲法测寿命有以下特点:

- (1) 可测量任意形状和大小的样品;
- (2) 应用范围较宽,从几 μs 到几百 μs ;
- (3) 对于表面的敏感性较小,即表面复合影响小,测量结果较准确;
- (4) 便于研究对温度的依赖关系。

六、思考题

- (1) 试述双脉冲法测少子寿命的基本原理及其测试方法。
- (2) 简述双脉冲法测少子寿命的测准条件。
- (3) 简述少子寿命的概念。