

微电子学实验教程

赵萍 邢立冬 编

西安邮电大学

序 言

本教材适用于微电子学专业及电子信息类专业研究生及本科生高年级学生。本课程是一门面向微电子学专业的重要实践课程，要求学生先修完：大学物理，半导体物理，半导体器件物理，微电子学概论，模拟电子技术，数字集成电路设计，微电子制造技术和计算机辅助设计等理论课程。

本实验教材涵盖半导体材料特性与微电子技术工艺参数测试分析、半导体器件性能参数测试、集成电路性能参数测试与 EDA 技术三部分实验内容。

要求学生掌握半导体材料特性测试技术、微电子技术工艺参数测试分析和微电子器件参数测试与应用技术，能够熟练使用集成电路 EDA 工具软件。

实验计划安排按照《微电子学实验》课程教学大纲，要求本科生在所列 22 个实验中选作完成 16 个实验，64 学时完成。

本教材是在参考和吸取了其他兄弟院校先进的实践教学经验，根据我院的实际情况，经过微电子学实验室教师进行大量实验的基础上编撰而成的。并增加了一定的设计性、创新性、综合性实验内容。

在教材编写过程中，得到了微电子学教研室全体教师的大力支持，在这里要感谢微电子学教研室老师的支持和帮助，尤其要衷心感谢西安电子科技大学桂智彬老师的无私帮助和指导。限于水平和经验，加之时间仓促、实验条件有限，本教材中难免存在一些缺点和不足，望使用本书的教师和同学提出批评指正。

微电子学实验室

2012 年 7 月

目 录

实验一	四探针法测电阻率	1
实验二	半导体霍尔效应	12
实验三	用图示仪测量双极型晶体管直流参数	23
实验四	晶体管开关时间的测量	34
实验五	场效应晶体管参数测量	41
实验六	光电导衰减法测量单晶硅非平衡少数载流子寿命	48
实验七	半导体材料层错、位错的显示	55
实验八	p-n 结的显示与结深的测量	60
实验九	用椭偏仪测量薄膜厚度	64
实验十	晶体管特征频率的测量	71
实验十一	晶体管瞬态热阻的测量	77
实验十二	双极性运算放大器参数的测试	82
实验十三	版图电路分析	96
实验十四	几种数字门电路的计算机模拟与仿真	100
实验十五	运算放大电路应用电路的仿真与测试	104
实验十六	数字电路版图设计	110
实验十七	MOS 结构高频 C-V 特性测试	117
实验十八	模拟集成电路设计与仿真	125
实验十九	微电子芯片、分立器件解剖及图形观察	129
实验二十	稳压电源及应用电路的设计与测试	133
实验二十一	晶闸管伏安特性及触发特性测量	142
实验二十二	晶闸管通态峰值压降的测量	148
实验二十三	变温霍尔效应实验	150
实验二十四	恒流源及脉冲法测试实验	164
实验二十五	功率放大电路的测试	170
实验二十六	压力和温度传感器实验	180
附录	本书涉及到的主要器件的管脚图	186

实验一 四探针法测电阻率

电阻率是反映半导体材料导电性能的重要参数之一。测量电阻率的方法很多，四探针法是一种广泛采用的标准方法。它的优点是设备简单、操作方便、精确度高，对样品的几何形状无严格要求。

实验目的：掌握四探针测试电阻率的原理和方法；针对不同几何尺寸的样品测试电阻率时，应掌握其修正方法；了解影响电阻率测量的各种因素及改进措施；了解利用阳极氧化剥层法求扩散层中杂质浓度分布的方法。

一、实验原理

在一块相对于探针间距可视为半无穷大的均匀电阻率的样品上，有两个点电流源1、4，电流由1流入，从4流出。2、3是样品上另外两个探针的位置，它们相对于1、4两点的距离分别为 r_{12} 、 r_{42} 、 r_{13} 、 r_{43} ，如图1所示。在半无穷大的均匀样品上点电流源所产生的电力线具有球面对称性，即等位面为一系列以点电流源为中心的半球面，如图2所示。

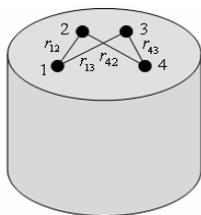


图1 位置任意的探针

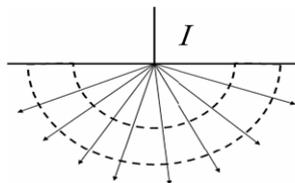


图2 半无穷大样品上点电流源的半球等势面

若样品电阻率为 ρ ，样品电流为 I ，则在离点电流源距离为 r 处的电流密度 J 为：

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1)$$

又根据

$$J = \frac{\varepsilon}{\rho} \quad (2)$$

其中， ε 为 r 处的电场强度，有（1）、（2）式得

$$\varepsilon = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (3)$$

根据电场强度和电势梯度的关系及球面对称性可得

$$\varepsilon = -\frac{dV}{dr}$$

取 r 为无穷远处得电势 V 为零，则有

$$\int_0^{V(r)} dV = \int_{\infty}^r -\varepsilon dr$$

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r} \quad (4)$$

式 (4) 就是半无穷大均匀样品上离开点电流源距离为 r 的点的电位与探针流过的电流和样品电阻率的关系式，它代表一个点电流源对距 r 处点的电势的贡献。

对于图1的情况，2、3两点的电势应为1、4两个极性相反的点电流源的共同贡献，即：

$$V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{42}} \right) \quad (5)$$

$$V_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{13}} - \frac{1}{r_{43}} \right) \quad (6)$$

2、3两点探针的电势差为

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{42}} - \frac{1}{r_{13}} + \frac{1}{r_{43}} \right)$$

由此可以得出样品的电阻率为：

$$\rho = \frac{2\pi V_{23}}{I} \left(\frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{42}} - \frac{1}{r_{13}} + \frac{1}{r_{43}} \right)^{-1} \quad (7)$$

上式就是利用直流四探针法测量电阻率的普遍公式。只需测出流过1、4探针的电流 I ；2、3探针间的电势差 V_{23} 以及四根探针之间的距离，就可利用 (7) 式求出样品的电阻率。

实际测量中，最常用的是直线型四探针，即四根探针的针尖在同一直线上，并且间距相等，都为 S ，见图3所示。

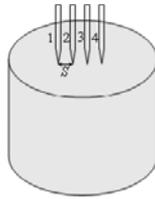


图3 直线型四探针

此时公式 (7) 变为

$$\rho = 2\pi S \frac{V_{23}}{I} \quad (8)$$

以上公式是在半无穷大样品的基础上导出的。实际上只要满足样品厚度及边缘与探针之间

的最近距离大于4倍探针间距，（8）式就可保证精度要求，该式为实验中要用的计算公式之一。

若被测样品几何尺寸不满足此条件就需对（8）式进行修正。修正后的计算公式为：

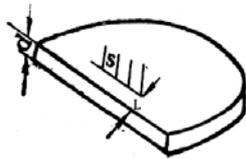
$$\rho = \frac{2\pi S V_{23}}{B_0 I} \quad (9)$$

式中 B_0 为修正系数， B_0 与样品的尺寸及所处的条件关系见表1、2。

表 1 四探针平行于样品边缘的修正系数

L/S S/d	0	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
0.0	2.000	1.9661	1.8764	1.5198	1.1890	1.0379	1.0029	1.0004
0.1	2.002	1.97	1.88	1.52	1.19	1.040	1.004	1.0017
0.2	2.016	1.93	1.89	1.53	1.20	1.052	1.014	1.0094
0.5	2.188	2.15	2.06	1.70	1.35	1.176	1.109	1.0977
1.0	3.009	2.97	2.87	2.45	1.98	1.667	1.534	1.512
2.0	5.560	5.49	5.34	4.61	3.72	3.104	2.838	2.795
5.0	13.863	13.72	13.32	11.51	9.28	3.744	7.078	6.699
10.0	27.726	27.43	26.71	23.03	18.56	15.49	14.156	13.938

说明：样品为片状单晶（如下图），四探针针尖所连成的直线与样品一个边界平行，距离为 L，除样品厚度及该边界外其余周界为无穷远，样品周围为绝缘介质包围。

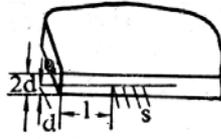
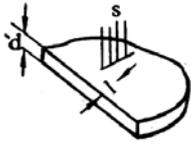


$$\rho = \frac{2\pi s V}{B_0 I}$$

表 2 四探针垂直于样品边缘的修正系数

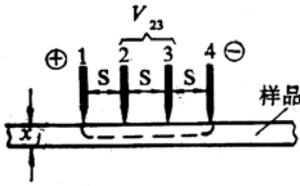
L/S S/d	0	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	∞
0.0	1.4500	1.3330	1.2555	1.1333	1.0595	1.0194	1.0028	1.0005	1.0000
0.1	1.4501	1.3331	1.2556	1.1335	1.0597	1.0193	1.0035	1.0015	1.0009
0.2	1.4519	1.3352	1.2579	1.1364	1.0637	1.0255	1.0107	1.0084	1.0070
0.5	1.5285	1.4163	1.3476	1.2307	1.1648	1.1263	1.1029	1.0967	1.0939
1.0	2.0335	1.9255	1.8526	1.7294	1.6380	1.5690	1.5225	1.5120	1.5045
2.0	3.7236	3.5660	3.4486	3.2262	3.0470	2.9090	2.8160	2.7913	2.7799
5.0	9.2815	8.8943	8.6025	8.0472	7.5991	7.2542	7.0216	6.9600	6.9315
10.0	18.5630	17.7836	17.2050	16.0944	15.1983	14.5083	14.0431	13.9199	13.8629

说明：样品为片状单晶（如下图），四探针针尖所连成的直线与样品一个边界垂直，探针与该边界的最近距离为 L，除样品厚度及该边界外，其余周界为无穷远，样品周围为绝缘介质包围。



$$\rho = \frac{2\pi s V}{B_0 I}$$

另一种情况是极薄样品，即样品厚度 d 比探针间距小很多，而横向尺寸为无穷大，如图4所示，类似上面对半无穷大样品的推导，很容易得出当 $r_{12}=r_{23}=r_{34}=S$ 时，极薄样品的电阻率 ρ 为



$$\rho = \left(\frac{\pi}{\ln 2}\right) d \frac{V_{23}}{I} = 4.5324 d \frac{V_{23}}{I} \quad (10)$$

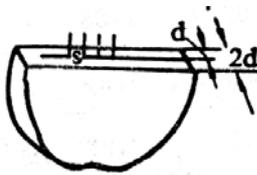
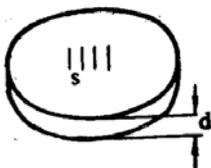
图4 极薄样品电阻率测试

当片状样品不满足极薄样品条件时，仍需按式 (9) 计算电阻率 ρ ，其修正系数 B_0 列在表 3 中。

表 3 薄样品的修正系数

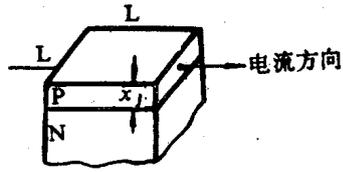
S/d	B_0	s/d	B_0	s/d	B_0
0.1	1.0009	0.6	1.1512	1.2	1.7329
0.2	1.0070	0.7	1.2225	1.4	1.9890
0.3	1.0227	0.8	1.3062	1.6	2.2410
0.4	1.0511	0.9	1.4008	1.8	2.5083
0.5	1.0939	1.0	1.5045	2.0	2.7799
				2.5	3.4674

说明：样品为片状单晶（如下图），除样品厚度外，样品尺寸相对探针间距为无穷大，四探针垂直于样品表面测试，或垂直于样品侧面测试。



$$\rho = \frac{2\pi s V}{B_0 I}$$

四探针法在半导体工艺中还普遍用来测量扩散层的薄层电阻，由于反向 pn 结的隔离作用，扩散层下的衬底可视为绝缘层，若样品扩散层厚度远小于探针间距 S ，横向尺寸无限大，则薄层电阻又称方块电阻，其定义就是表面为正方形的半导体薄层，在电流方向所呈现的电阻，见图 5 所示，单位为 Ω/\square ，其电阻值为式 (11)



$$R_s = \rho \cdot \frac{L}{Lx_j} = \frac{\rho}{x_j} \quad (11)$$

图5 方块电阻

进而得到

$$R_s = \frac{\rho}{x_j} = 4.5324 \frac{V_{23}}{I} \quad (12)$$

实际测量中，一般的扩散片尺寸不是很大，不满足式（12）的要求，同时又有单面扩散与双面扩散之分，因此需要将式（12）修正为

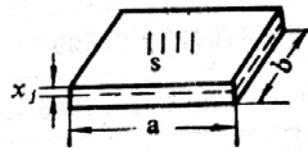
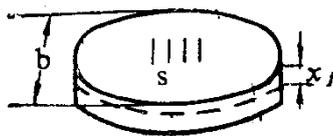
$$R_s = B_0 \frac{V_{23}}{I} \quad (13)$$

式中 B_0 为修正系数，其值见表4、表5。

表4 单面扩散样品薄层电阻修正系数

$\frac{b}{s}$	圆	长方形			
		$\frac{a}{b}=1$	$\frac{a}{b}=2$	$\frac{a}{b}=3$	$\frac{a}{b} \geq 4$
1.0				0.9988	0.9994
1.25				1.2467	1.2248
1.5			1.4788	1.4893	1.4893
1.75			1.7196	1.7238	1.7238
2.0			1.9454	1.9475	1.9475
2.5			2.3532	2.3541	2.3541
3.0	2.2662	2.4575	2.7000	2.7005	2.7005
4.0	2.9289	3.1137	3.2246	3.2248	3.2248
5.0	3.3625	3.5098	3.5749	3.5750	3.5750
7.5	3.9273	4.0095	4.0361	4.0362	4.0362
10.0	4.1716	4.2209	4.2357	4.02357	4.2357
15.0	4.3646	4.3882	4.3947	4.3947	4.3947
20.0	4.4364	4.4516	4.4553	4.4553	4.4553
40.0	4.5076	4.5120	4.5129	4.5129	4.5129
∞	4.5324	4.5324	4.5324	4.5324	4.5324

说明：（见下图）四探针的中心点在样品的中心。

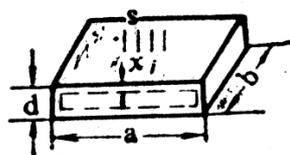
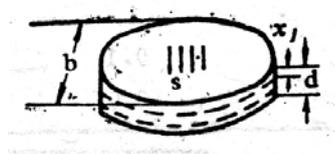


$$R_s = B_0 \frac{V}{I} \qquad \rho = B_0 \frac{V}{I} X_j \qquad \frac{X_j}{S} < 0.5$$

表 5 双面扩散样品薄层电阻修正系数

$\frac{b+d}{s}$	圆	长方形			
		$\frac{a+d}{b+d}=1$	$\frac{a+d}{b+d}=2$	$\frac{a+d}{b+d}=3$	$\frac{a+d}{b+d} \geq 4$
1.0				1.9976	1.9497
1.25				2.3741	2.3550
1.5			2.9575	2.7113	2.7010
1.75			3.1596	2.9953	2.9887
2.0			3.3381	3.2295	3.2248
2.5			3.6408	3.5778	3.5751
3.0	4.5324	4.9124	3.8543	3.8127	3.8109
4.0	4.5324	4.6477	4.1118	4.0899	4.0888
5.0	4.5324	4.5970	4.2504	4.2362	4.2356
7.5	4.5324	4.5415	4.4008	4.3946	4.3943
10.0	4.5324	4.5353	4.4571	4.4536	4.4535
15.0	4.5324	4.5329	4.4985	4.4969	4.4969
20.0	4.5324	4.5326	4.5132	4.5124	4.5124
40.0	4.5324	4.5325	4.5275	4.5273	4.5273
∞	4.5324	4.5324	4.5324	4.5324	4.5324

说明：(见下图) 四探针的中心点在样品中心。



$$R_s = B_0 \frac{V}{I} \qquad \frac{x_j}{s} < 0.5$$

$$\rho = B_0 \frac{V}{I} x_j \qquad x_j < \frac{d}{2}$$

本实验的测试装置如图 6 所示。它主要包括三个部分：四探针探头；电流可调的直流恒流源；电压测试仪。

1. 四探针探头 探头的四根探针等距离地排列在一直线上。探针针尖的曲率半径为 25—50 μm ，探针间距要固定(通常为 1mm 左右)，游移度要小。为了使探针和样品形成较好的欧姆接触，减少非平衡载流子的注入，探针和被测样品之间加一定压力，一般为 20N 左右。探针要用导电性能好的硬质、耐磨金属制成，并要求探针与待测半导体材料有较低的接触电势差，通常可用钨、碳化钨、钨钨合金、合金钢等作为探针材料。探针之间电绝缘性能要好。

2. 恒流源 所谓恒流源就是指电源内阻很大，输出电流大小与负载电阻变化无关。其输出电流应能从微安级到几十毫安可调。电流 I 要选择适当。电流太小，检测电压有困难；电流太大由于非平衡载流子注入或发热引起电阻率降低。在本实验中，电流一般选择 1 毫安档。

3. 电压测试仪 由于探针很尖，探针和样品接触时探针和样品之间的电阻很大，为了避免它对测试的影响，通常用电位差计，采用补偿法测微小电压的仪器，其优点是测量线路和被测线路间都无电流流过。或用高内阻数字电压表来测量2, 3两探针间的电位差。

另外还需有一个温度计，测量环境温度。

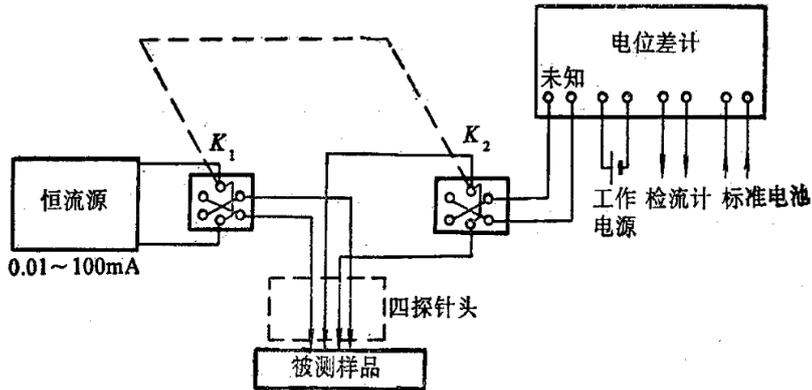


图6 四探针测试仪原理示意图

二、实验内容

1. 对给定的2~3个厚度不同的样品分别测量其电阻率、方块电阻值。
2. 对单面扩散和双面扩散样品分别测量其薄层电阻R。
3. 参考附录一，用阳极氧化剥层法求扩散层中的杂质浓度分布。（选做）

三、实验步骤

1. 按原理图连接好测试线路。
2. 用金钢砂研磨被测样品（单晶硅片），并用去离子水冲洗，再用酒精棉球擦干。获得新鲜磨毛的测试平面，将样片放入探针台面上，确保探针和样品实现较好的欧姆接触。
3. 打开电源，进行测量。一般选电流1mA，记录电压值。注意：对每个样品进行电阻率测量时，要测20个不同点（正、反面各测10个点，每个点分别在正、反向电流条件下测试，共40个数据）。
4. 对所测的不同样品，需先用千分尺测量样品的尺寸及探针离样品边缘的最近距离，由此判断是否需要对测试结果给予适当的修正，并记下测试时的环境温度。
5. 改变测试电流并观察电流过大会造成什么后果。
6. 观察光照对不同电阻率样品测试结果的影响。

四、实验数据处理和结果分析

1. 对给定样品的测试数据，用EXCEL（见附录2）进行计算和处理，求出电阻率的平均值、方均根及不均匀度，并画出电阻率波动曲线，并根据样品的不同几何尺寸，进行电阻率的修正

计算。

2. 对比样品电流不同时测试结果的变化，并讨论测试时样品电流选择的原则。
3. 被测样品的断面电阻率不均匀度E，可利用下面公式进行计算：

$$E = \frac{\Delta\rho}{\rho} \times 100\% \approx \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{\frac{1}{2}(\rho_{\max} + \rho_{\min})} \times 100\%$$

其中， ρ_{\max} 为样品所测点中电阻率的最大值， ρ_{\min} 为所测点中电阻率的最小值。

4. 根据不同扩散情况的样品计算扩散层薄层电阻。

五、思考题

1. 为什么要用四探针法测量？如果用两根探针既作电流探针又作电压探针，这样能否对样品进行较为准确的测量？

2. 分析测量电阻率中误差的来源，指出公式 $\rho = 2\pi S \frac{V}{I}$ 和 $\rho = \frac{2\pi s V}{B_0 I}$ 的区别及应用条件？

件？

3. 为什么测量单晶样品电阻率时测试平面要求为毛面，而测试扩散片扩散层薄层电阻时测试面可为镜面？

附录一 用阳极氧化去层法求扩散层中杂质浓度分布

1. 阳极氧化法

硅的阳极氧化装置见图 1。溶液是四氢糠醇和亚硝酸钠的混合液。电极间加入 100V 左右电压。一分钟后可在硅片上长出约 80nm 的 SiO_2 层。 SiO_2 层可用 HF 去除。

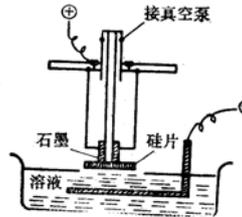


图 1 阳极氧化装置示意图

生长厚为 d 的 SiO_2 需要消耗 $0.43d$ 厚的硅，这是根据：

$$\text{SiO}_2 \text{ 重量} / \text{SiO}_2 \text{ 分子量} = \text{Si 减少的重量} / \text{Si 原子量}$$

必须指出，转换系数 0.43 并非不变，需要按不同情况来选取，一般在 0.3~0.45 之间。

2. 利用阳极氧化去层法求扩散层中杂质浓度分布

扩散层薄层电阻 R_s 与半导体中有效杂质总量有关，若逐层剥去一定厚度的硅表面，每除去一层就测量一次 R_s ，随着硅中有效杂质总量的不断变化，测得的 R_s 也将变化，经过一定变换，则可以求出杂质浓度的分布 $N_e(x)$ 。

设衬底原有杂质浓度分布为 $N_b(x)$ ，扩散杂质浓度分布为 $N(x)$ ，则扩散层中有效杂质浓度 $N_e(x) = N(x) - N_b(x)$ ，若杂质全部电离，则载流子浓度分布也是 $N_e(x)$ ，于是

$$\sigma(x) = Ne(x)q\mu$$

$$\therefore \bar{\sigma} = \frac{1}{x_j} \int_0^{x_j} \sigma(x) dx = \frac{1}{x_j} \int_0^{x_j} N_e(x) q\mu dx$$

$$\therefore R_s = \frac{1}{x_j \bar{\sigma}} = \left[\int_0^{x_j} N_e(x) q\mu dx \right]^{-1}$$

$$\text{即 } R_s^{-1} = \int_0^{x_j} Ne(x)q\mu dx = \int_0^{x_j} \sigma(x) dx$$

$$\therefore \frac{dR_s^{-1}}{dx} = \sigma(x) = N_e(x)q\mu$$

可见，测出 $R_s^{-1} \sim x$ 关系曲线，再逐点求其斜率，就可以得到杂质浓度分布 $N_e(x)$ 。具体测量 $R_s^{-1} \sim x$ 关系时则采用阳极氧化法，利用椭圆仪测量 SiO_2 厚度，精确控制从样品表面逐层剥掉的厚度。

有时为简便起见，也可按下面步骤求出 $N_e(x)$

(1) 作出 $\log R_s(x) \sim x$ 曲线；

(2) 再作出 $d(\log Rs)/dx \sim x$ 曲线;

(3) 按 $\rho(x) = \frac{Rs(x) \log e}{d[\log Rs(x)]/dx}$ 逐点计算出相应的电阻率;

(4) 由求出的 $\rho(x)$ 查出 $N_e(x)$ 。

附录二 EXCEL 数据处理表:

四探针法测量半导体电阻率 EXCEL 处理									
仪器型号: XDWDZ					2πS=				
样品一 (正面)					样品二 (d=1.916mm)				
正向测定		反向测定		电阻率	正向测定		反向测定		电阻率
电流	电压	电流	电压		电流	电压	电流	电压	
(mA)	(mV)	(mA)	(mV)	Ω.cm	(mA)	(mV)	(mA)	(mV)	Ω.cm
平均电阻率 (Ω.cm)				平均电阻率 (Ω.cm)					
均方差				均方差					
表面不均匀度				表面不均匀度					
样品一 (反面)					样品三 (d=0.457mm)				
正向测定		反向测定		电阻率	正向测定		反向测定		电阻率
电流	电压	电流	电压		电流	电压	电流	电压	
(mA)	(mV)	(mA)	(mV)	Ω.cm	(mA)	(mV)	(mA)	(mV)	Ω.cm
平均电阻率 (Ω.cm)				平均电阻率 (Ω.cm)					
均方差				均方差					
表面不均匀度				表面不均匀度					
薄层电阻 (Ω)				薄层电阻 (Ω)					

系列1

系列1

系列1

实验二 半导体霍尔效应

半导体霍尔效应是研究半导体物理性质的一种重要方法。利用霍尔效应可以判断半导体材料的导电类型，测量半导体的载流子浓度和迁移率。通过实验可对材料多种电学参数（如电阻率 ρ ；霍尔系数 R_H ；载流子浓度 P_0 、 n_0 等）进行分析；低温下霍尔效应实验还是研究半导体材料补偿度和杂质电离的有效方法。同时，利用霍尔效应已研制出硅、锗、砷化镓等霍尔器件和传感器，目前在测量技术、自动化技术及信息处理等方面得到广泛应用。

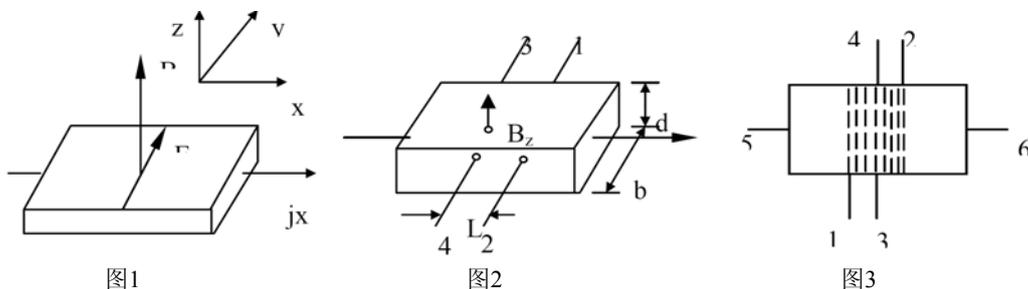
本实验目的是熟悉霍尔效应的测试原理；掌握电阻率和霍尔系数的测量方法,并用EXCEL计算多项电学参数，如电阻率 ρ 、霍尔系数、载流子浓度 P_0 、 n_0 等；观察半导体的磁阻现象。

一、实验原理

把一个通有直流电流的半导体样品放入均匀磁场中，设电流沿X方向流动，磁场方向与样品电流的方向垂直。这时，在样品中运动的载流子受到洛仑兹力的作用而偏转。在垂直于电场和磁场的方向上，样品两端就有电荷积累而产生一个横向电场。这种现象称为霍尔效应。横向电场称为霍尔电场。令霍尔电场为 E_y ，流过样品电流密度为 J_x ，磁场强度为 B_z ，则霍尔电场 E_y 正比于电流密度 J_x 和磁场强度 B_z ，用数学式表示为：

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

式中 R_H 为霍尔系数，也是本实验待测指标。由于磁场对电子和空穴偏转作用相同，而两种载流子带电符号相反，从而在样品两端的积累方向相反，霍尔电势的方向相反，从而可判别其导电类型，如图1、2、3所示。



在不同的温度范围， R_H 有不同的表达式。为简单起见，设样品的温度是均匀的，所有载流子都具有相同的速度，即不考虑载流子速度的统计分布。

对空穴浓度为 p_0 的P型样品可推导出：

$$R_H = \frac{1}{p_0 q} > 0 \quad (2)$$

对电子浓度为 n_0 的 N 型样品也可导出

$$R_H = -\frac{1}{n_0 q} < 0 \quad (3)$$

式中 q 为电子电荷，求得 R_H 后可通过 (2), (3) 式计算载流子浓度。

当考虑载流子速度的统计分布时，必须求解玻耳兹曼方程，这里不予推导，只给出结果。可参考“半导体物理学”，式 (2) 及 (3) 应分别修改为

$$R_H = \left(\frac{\mu_H}{\mu}\right)_p \frac{1}{p_0 q} \quad (4)$$

$$R_H = -\left(\frac{\mu_H}{\mu}\right)_n \frac{1}{n_0 q} \quad (5)$$

式中 μ_H 为霍尔迁移率； μ 为电导迁移率。对于简单能带结构的半导体，

$$\left(\frac{\mu_H}{\mu}\right)_p = \left(\frac{\mu_H}{\mu}\right)_n \equiv \gamma_H \quad (6)$$

γ_H 称霍尔因子，其值与半导体内的散射机制有关，对球形等能面的非简并半导体，晶格散射 $\gamma_H = 3\pi/8 = 1.18$ ；对电离杂质散射 $\gamma_H = 315\pi/512 = 1.93$ ，在一般粗略计算中， γ_H 值可近似取为 1。

对于 Si，晶格散射可以为： $\left(\frac{\mu_H}{\mu}\right)_n = \left(\frac{\mu_H}{\mu}\right)_p = 1$

对于 Ge，晶格散射时为： $\left(\frac{\mu_H}{\mu}\right)_n = 1.15$ $\left(\frac{\mu_H}{\mu}\right)_p = 1.84$

对于简并半导体和强磁条件时 $\frac{\mu_H}{\mu} = 1$

在半导体中主要由一种载流子导电的情况下，电导率表示式为

$\sigma_n = nq\mu_n$ 或 $\sigma_p = pq\mu_p$ ，由式 (4) 及 (5) 可得

$$\left|R_H \sigma_p\right| = (\mu_H)_p \quad (7)$$

$$|R_H \sigma_n| = (\mu_H)_n \quad (8)$$

由此看出，只要测出样品的霍尔系数和电导率，就求得霍尔迁移率以及电导迁移率。

以上讨论只适用于杂质导电范围内的半导体，在温度较高，半导体进入过渡区及本征导电范围，必须考虑样品中同时存在两种载流子的影响。则有：

$$\sigma = n_0 q \mu_n + p_0 q \mu_p \quad (9)$$

式中 σ 为电导率，令 $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ ，则

$$R_H = \left(\frac{\mu_H}{\mu}\right) \frac{(p_0 - b^2 n_0)}{q \cdot (b n_0 + p_0)^2} \quad (10)$$

考虑到载流子速度的统计分布，对于某种速度的载流子，如果霍尔电场的作用与洛伦兹力作用刚好抵消时，那么小于此速度的载流子将沿霍尔电场所作用的方向偏转，大于此速度的载流子则沿反方向偏转，这种偏转将使沿电场方向运动的载流子数目减小，即电流密度减小。就是说由于磁场的存在，电阻率增大，这种现象称为磁阻效应。把磁场与外加电场相互垂直时产生的磁阻效应称为横向磁阻效应。通常用电阻率的相对改变量定义磁阻。

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{\rho_B - \rho_0}{\rho_0} \quad (11)$$

式中 ρ_0 为无磁场时的电阻率， ρ_B 为加磁场时的电阻率，当磁场不太强时， $\frac{\Delta \rho}{\rho_0}$ 与磁场平方

成正比；当磁场较强时， $\frac{\Delta \rho}{\rho_0}$ 均与磁场成正比；磁场再强时，电阻率则达到饱和。

电阻率的测试方法有二探针法，这种方法是先测出规则长条样品电流，再用二探针测出样品某两点之间电位差并将样品数据代入定义可得样品电阻率。

1. 矩形样品测试法：

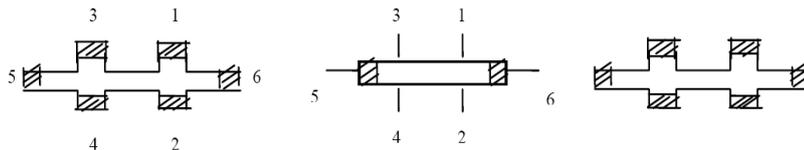


图4 样品几何形状

已知长度为L，宽度为b，厚度为d的半导体样品，其厚度，宽度远远小于长度。样品上有六个电极。“5、6”是样品电流电极；“1、3”，“2、4”是测电阻率电极；“3、4间”为霍尔电压电

极，并且“1、3间”，“2、4间”的距离为L。如果测得“5、6”电极的电流和“1、3”“2、4”电极之间电位差 V_{13} 、 V_{24} 代入下式，就可求得样品电阻率和电导率。

$$\rho = \frac{V_{13}bd}{I_{56}L} = \frac{[\text{伏}][\text{厘米}][\text{厘米}]}{[\text{安培}][\text{厘米}]} \Rightarrow [\text{欧姆}\cdot\text{厘米}] \quad (12)$$

而电导率

$$\sigma = \frac{I_{56}L}{V_{13}bd} \quad (13)$$

测量样品霍尔系统时，将样品放入磁场强度为B的均匀磁场中，先测出霍尔电压，代入下式可算出霍尔系数 R_H

$$R_H = \frac{\varepsilon_m}{j_{56}B_Z} = \frac{V_H/b}{(I_{56}/bd)B_Z} = \frac{V_H}{I_{56}B_Z} \cdot d \quad (14)$$

$$R_H = \frac{V_H}{I_{56}B} \cdot d \times 10^8 \quad [\text{厘米}]^3[\text{库仑}]^{-1} \quad (15)$$

式中 d 为样品厚度。式中各量的单位： V_H 单位取V； I 单位取A； B 单位取高斯（G_s）； d 单位取cm； R_H 取cm³/C。10⁴是单位变换时引入的。

测量 V_H 时，注意下列四组数据：（条件：I恒定，用“3、4”电极）

(1) 测 V_1 ：B+、I+； $V_1 = +V_M + V_E + V_{RL} + V_m + V_O$

(2) 测 V_2 ：B+、I-； $V_2 = -V_M - V_E + V_{RL} + V_m - V_O$

(3) 测 V_3 ：B-、I-； $V_3 = +V_M + V_E - V_{RL} - V_m - V_O$

(4) 测 V_4 ：B-、I+； $V_4 = -V_M - V_E - V_{RL} - V_m + V_O$

由 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 可近似求出 V_M 值，代入（16）式就

$$\frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} = V_H + V_E \approx V_H \quad (16)$$

可算出霍尔系数。需要说明一下付效应的消除；样品在磁场中不仅产生霍尔电压，还会产生其它一些付效应，迭加在霍尔电压上，现简述几种付效应及消除法。

(a) 付加电压差 V_O 的产生是由于霍尔电极不能在同一等位面上而产生，在B=0时，样品上有一电流通过，“3、4”电极就有电位差并迭加在霍尔电压上， V_O 方向与I有关而与B无关，见图3。

(b) 艾廷豪森效应 当沿样品的x方向通电流I，沿z方向加磁场B时，在y方向出现温度

差。根据温差电效应将在 y 方向上产生电势差 U_E , U_E 与 I 和 B 成正比, 且其极性总是与 U_H 相同。

(c) 里纪—勒杜克效应的产生是样品在 X 方向上因流过电流而产生热流 Q , 在该热电流和 Z 方向磁场 B 的作用下, 在 y 方向上产生温差, 该温差正比于 QB 。同样, 里纪—勒杜克效应也会产生一个温差电动势 V_{RL} , $V_{RL} = QB$, 其符号与磁场 B 方向有关。与电流方向无关。

(d) 能斯脱效应是样品在 X 方向的热流 Q 和 Z 方向磁场的的作用下, 在 Y 方向产生一电位差, 该电位差 V_m 正比于 QB , 符号与 B 有关, 与电流方向无关。

在实验中可以改变 I 和 B 的方向, 使 V_O , V_M , V_{RL} 从计算中消去, 因而采用测试 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 后, 求其代数平均值, 这样就消除了付效应的影响。而艾廷豪森效应不好消除, 并由 V_E 引入约 5% 的误差, 采用交流测量可以避免 V_E 的产生。

2. 范德堡样品测试法:

对于扩散层、离子注入, 表面反型等薄层样品, 且具有任意形状时, 可采用范德堡法测量电阻率、霍尔系数。采用样品必须是厚度均匀, 无孤立空洞的片子。四个电极分布在片子四边, 并有足够小的欧姆接触点, 如图 5 所示。

样品周边上设有四个欧姆接触点 A、B、C、D, 如图 5 范德堡样品形状测量电阻率时, 电极采用相邻接点, 如 A、B 通电并测得电流 I_{ab} , 用电压表测另一对接点 C、D 的电位差 V_{CD} , 由此得出

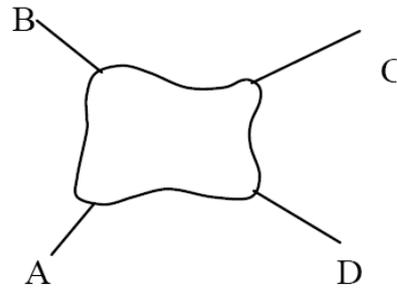


图 5 范德堡样品形状

$R_{AB-CD} = \frac{|V_{cd}|}{I_{ab}} = R_1$; 然后, 在 B、C 通

电流, 测 D、A 间电位差 V_{DA} , 也同样得到 $R_{BC-DA} = \frac{|V_{da}|}{I_{bc}} = R_2$, 根据范德堡公式的推导,

样品电阻率 ρ 与 R_1 、 R_2 构成如下关系:

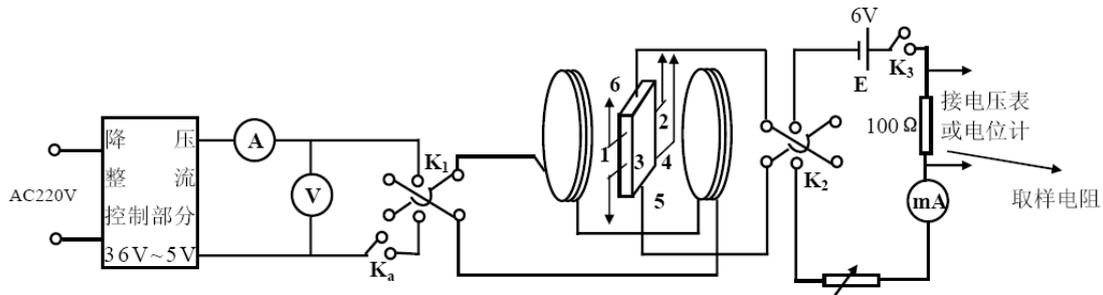
$$\exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} R_1\right) + \exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} R_2\right) = 1 \quad (17)$$

式中 d 为样品厚度, 由此得到电阻率公式:

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{2} \cdot f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (18)$$

其中 $f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ 称作范德函数，为一已知修正函数。其值在0~1之间并由 R_1/R_2 之比，由曲线直接查出。由此可见，实验中测得 R_1 、 R_2 并由 R_1/R_2 之比值由曲线上查得出 $f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ 的值代入公式（18）就可算出样品电阻率。

测定霍尔系数时，电流由 A 点至 C，测 B，D 间电位差 V_{BD} 。其方法同矩形样品法，求出 V_H 值，代入（15）求出霍尔系数，整个测量系统，见图 6。



其中:样品"1、3","2、4"为电阻率电极,"3、4"为霍尔电极

图6 长条、范德堡法霍尔装置图

二、实验内容

- (1) 认真预习实验内容，弄清实验装置的工作原理，及各个仪器的使用方法和作用。
- (2) 用长条法测试矩形样品(n-si)的 ρ 和 R_H 值。测电阻率时（磁场强度 $B=0$ ）样品电流分别取代 0.4mA 、 0.8mA 两个值，测霍尔电压时，磁场强度 $B=2000\text{Gs}$ 。
- (3) 用范德堡法测 Si 薄片半导体样品的 ρ 和 R_H 值。测试条件同上。
- (4) 用范德堡法测薄片样品的磁阻，样品电流在 0.2mA 取值。
- (5) 用 EXCEL 进行数据处理。

三、实验步骤

1、实验前，仔细检查电路中各仪器仪表的连接是否正常。充分熟悉数字电压表，半导体霍尔效应测试仪、激磁电源及样品的正确使用方法。在检验无误的情况下方可通电预热。

2、该实验测两种样品：矩形样品、范德堡样品。

具体对每种样品分别测电阻率(不需加磁场)、霍尔电压(加均匀磁场,磁感应强度约 2000GS)

(1) 矩形样品测试法：（长条法）

样品1：（N-Si） $L=0.41\text{cm}$ （长度）

$b=0.40\text{cm}$ （宽度）

$d=0.06\text{cm}$ （厚度）

a. 电阻率测量（这时磁场强度 $B=0$ ）

将“XD-1半导体霍尔效应测试仪”电源打开

方法选择开关置“长条法”,按下V13

下面一排琴键全部抬起： $R1+R1-R2+R2-RH+RH-$

第1组：调节旋钮使电流 $I_{56}=0.4\text{mA}$ $V=6\text{V}$ （指针表显示）

“换向开关”为正 分别测 V13、V24

“换向开关”为负 分别测 V31、V42

（注：开关每换一档时，都要使 $I_{56}=0.4\text{mA}$ ，电流若有变化，调节旋钮）

第2组：选 $I=0.8\text{mA}$ $V=6\text{V}$ 测试方法同上（1）

带入公式（12）求出电阻率。

b. 霍尔电压测量：（合上铡刀开关，调 $B=2000$ 高斯，注意：铡刀开关方向的选择）

第一步：调磁场强度 B 约为 2000 高斯。（将样品放入两线包中间，用高斯计测量 B ，调整恒流源的电流，可调节磁场的大小。）

首先测出霍尔电压 V_H 。

条件:在 调节旋钮 $I=0.4\text{mA}$ 时,按下 V34 按钮分别测出下面四组数据:

在 $B+$ 、 $I+$ 时，测 V1

在 $B+$ 、 $I-$ 时，测 V2

在 $B-$ 、 $I-$ 时，测 V3

在 $B-$ 、 $I+$ 时，测 V4

在 $I=0.8\text{mA}$ 时,按下按钮 V43 分别测出下面四组数据:

在 $B+$ 、 $I+$ 时，测 V1

在 $B+$ 、 $I-$ 时，测 V2

在 $B-$ 、 $I-$ 时，测 V3

在 $B-$ 、 $I+$ 时，测 V4

代入公式(16),求出 V_H ; 再将数据代入公式(15),求出霍尔系数 R_H

(2). 范氏样品测试法：（换样品）

样品 1: (N-Si) $d=0.06\text{cm}$ (厚度)

a. 电阻率测量 (这时磁场强度 $B=0$)

将上面一排琴键全部抬起, 按下 R1+键

调 $I=0.4\text{mA}$, $I=0.8\text{mA}$ 分别进行下面测试;

I+时,测 VR1+; I-时,测 VR1-

I+时,测 VR2+; I-时,测 VR2-

用公式(18) 计算出电阻率.

b.测定霍尔系数: 其方法与长条法相同,求 V_H 值代如公式(15) 加磁场, 调 $B=2000$ 高斯

按下 RH+键, 在 $I=0.4\text{mA}$, $I=0.8\text{mA}$ 时,分别测 VRH+

在 B+、I+时, V1

在 B+、I-时, V2

在 B-、I-时, V3

在 B-、I+时, V4

按下 RH-, 在 $I=0.4\text{mA}$, $I=0.8\text{mA}$ 时, 分别测 VRH-

在 B+、I+时, V1

在 B+、I-时, V2

在 B-、I-时, V3

在 B-、I+时, V4

代入公式(16), 求出 V_H ; 再将数据代入公式(15), 求出霍尔系数 R_H

四、数据处理及分析

1. 列表填入测量数据, 求出样品的电阻率和霍尔系数的平均值, 再求出载流子浓度霍尔迁移率, 电导迁移率及决定样品的导电类型。

2. 根据测量数据画出 $\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \sim B^2$ 曲线。

3. 对测试结果进行分析, 讨论。

五、实验用仪器:

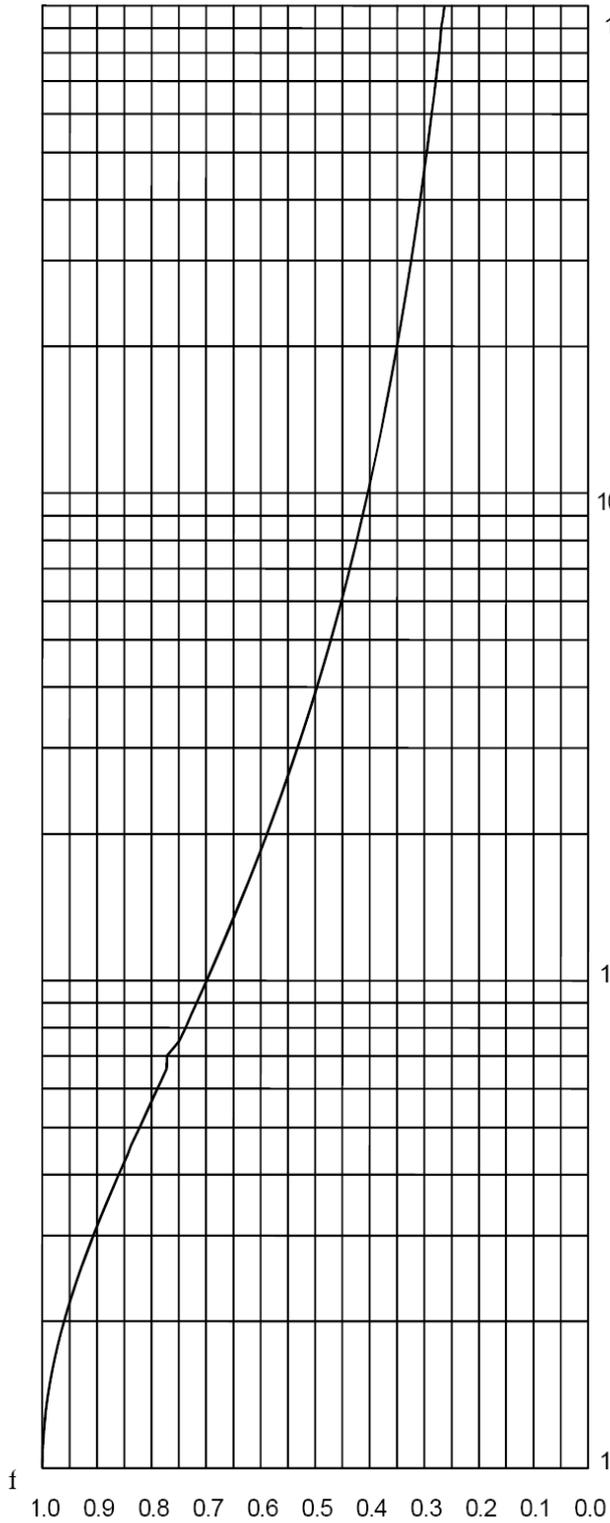
1. MPS-3010L (直流稳压稳流电源)
2. GDM-8245 双显示数字电表
3. XD-1 半导体霍尔效应测试仪
4. HT100G 普通型高斯计, 特斯拉计(上海亨通磁电科技有限公司)

5. 磁铁、样品

六、思考题

1. 如何从电场、磁场、霍尔电压的方向来判定半导体的导电类型？
2. 测量样品霍尔系数时，怎样才能消除负效应？
3. 为什么要采用高阻抗电压表或电位差计测量电位差？

附录一 范德堡函数表



附录二 (范德堡函数表)

R1/R2	F	R1/R2	F
1.00	1.0000	4.10	0.8560
1.10	0.9992	4.20	0.8519
1.20	0.9970	4.30	0.8479
1.30	0.9940	4.40	0.8439
1.40	0.9902	4.50	0.8400
1.50	0.9859	4.60	0.8372
1.60	0.9812	4.70	0.8325
1.70	0.9762	4.80	0.8287
1.80	0.9710	4.90	0.8252
1.90	0.9657	5.00	0.8215
2.00	0.9602	5.10	0.8181
2.10	0.9547	5.20	0.8147
2.20	0.9492	5.30	0.8113
2.30	0.9437	5.40	0.8080
2.40	0.9383	5.50	0.8047
2.50	0.9328	5.60	0.8015
2.60	0.9274	5.70	0.7980
2.70	0.9222	5.80	0.7953
2.80	0.9169	5.90	0.7922
2.90	0.9117	6.00	0.7892
3.00	0.9066	6.10	0.7863
3.10	0.9016	6.20	0.7834
3.20	0.8967	6.30	0.7805
3.30	0.8918	6.40	0.7777
3.40	0.8870	6.50	0.7750
3.50	0.8824	6.60	0.7722
3.60	0.8778	6.70	0.7695
3.70	0.8733	6.80	0.7669
3.80	0.8688	6.90	0.7643
3.90	0.8645	7.00	0.7717
4.00	0.8602		

附录 数据处理简表 (建议将数据填写在一张16K纸上)

1 长条法测定电阻率和霍尔系数表

附录 数据处理简表 (建议将数据填写在一张 16K 纸上)

1 长条法测定电阻率和霍尔系数表

被测样品尺寸:

		测试样品电阻率 ρ ($B=0$)					测量霍尔系数 R_H ($B=1000, 2000GS$)							
长 条 法	测试值	I_{56}	V_{13}	V_{24}	I_{56}	V_{31}	V_{42}	I_{56}	I_{56}	V_1 I^+B^+	V_2 I^+B^-	V_3 I^-B^-	V_4 I^-B^+	
	第1次													
	第2次													
	单端 ρ	1						V_H	1					
		2							2					
	单端 ρ							R_H	1					
2														
电阻率 ρ							样品 R_H							

电压单位: 电流单位:

2 范德堡法测定样品电阻率及霍尔系数

被测样品尺寸:

		测试样品电阻率 ρ ($B=0$)					测量霍尔系数 R_H ($B=1000, 2000GS$)							
范 德 堡 法	测试值	I	V_{R1}^+	V_{R1}^-	V_{R2}^+	V_{R2}^-	I	I	V_1 I^+B^+	V_2 I^+B^-	V_3 I^-B^-	V_4 I^-B^+		
	第1次													
	第2次													
	单端 ρ	1						V_H	1					
		2							2					
	单端 ρ							R_H	1					
2														
电阻率 ρ							R_H							

电压单位: 电流单位:

实验三 用图示仪测量双极型晶体管直流参数

双极型晶体管是集成电路的主要有源器件之一，在电子技术方面具有广泛的应用。在制造晶体管和使用过程中，都要对其参数性能进行检测。晶体管的直流参数及性能是评价晶体管质量及选择的主要依据。通常采用晶体管图示仪进行测量。

实验目的：了解晶体管特性图示仪的基本工作原理及其使用方法；掌握用晶体管特性图示仪测量晶体管各种特性曲线的方法；掌握用晶体管特性图示仪测量普通二极管、发光二极管、稳压管、三极管、结型场效应管等器件的各种直流参数的方法。

一、实验原理

晶体管的特性曲线及各种直流参数，可用逐点法测量，也可用晶体管特性图示仪直接测量。BJ4814 型半导体管特性图示仪是测量半导体器件直流及低频参数的专用仪器，通过示波管屏幕及标尺刻度，可直接观察各种晶体管的特性曲线族，准确测量出各种晶体管的直流参数。

图 1 为 BJ4814 型晶体管特性图示仪的整机原理方框图。从图中可见，该仪器主要由集电极扫描电源，阶梯波发生器 X、Y 轴放大器，高频高压源电路及低压供电电源几大部分组成，集电极扫描电源提供被测管的扫描电压 (C、E 端)，阶梯波发生器给 B 端注入信号，通过 X、Y 轴放大器将电压及电流调整后供给由高频电压源驱动加亮的示波管，显示出被测器件的特性曲线供观测。

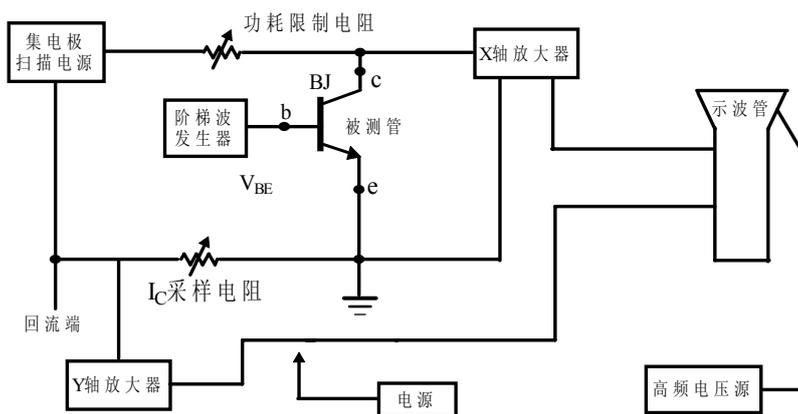


图 1 图示仪的整机原理方框图

图示仪测试晶体管输出特性曲线的原理如图 2 所示。图中 BJ 代表被测的晶体管， R_B 、 E_B 构成基极偏置电路。取 $E_B \gg V_{BE}$ ，可使 $I_B = (E_B - V_{BE}) / R_B$ 基本保持恒定。在晶体管 C-E 之间

加锯齿波扫描电压，并引入一个小的取样电阻 R_c ，这样加到示波器上 X 轴和 Y 轴的电压分别为

$$\begin{aligned} V_x &= V_{ce} = V_{ca} + V_{ae} = V_{ca} - I_c R_c \approx V_{ca} \\ V_y &= -I_c \cdot R_c \end{aligned} \quad (1)$$

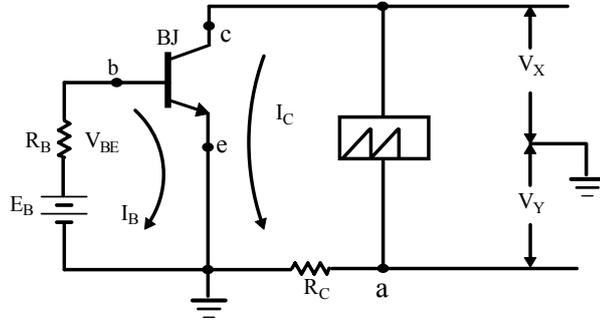


图 2 测试输出特性曲线的电路原理图

当 I_B 恒定时，在示波器的屏幕上可以看到一根 $I_c \sim V_{CE}$ 的特性曲线，即晶体管共发射极输出特性曲线。

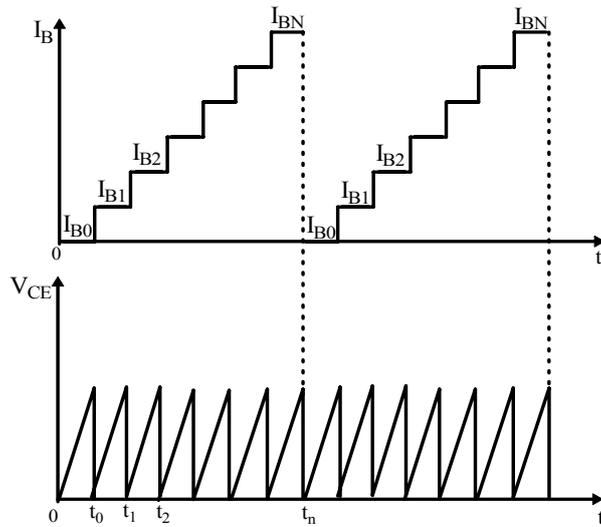


图 3 基极阶梯电流与集电极扫描电压之间的关系

为了显示一组在不同 I_B 的特性曲线簇 $I_{ci} = \Phi(I_{Bi}, V_{CE})$ 应该在 X 轴的锯齿波扫描电压每变化一个周期时，使 I_B 也有一个相应的变化，所以应将图 2 中的 E_B 改为能随 X 轴的锯齿波扫描电压变化的阶梯电压。每一个阶梯电压能为被测管的基极提供一定的基极电流，这样不同的阶梯电压 V_{B1} 、 V_{B2} 、 V_{B3} ... 就可对应地提供不同的恒定基极注入电流 I_{B1} 、 I_{B2} 、 I_{B3} ...。只要使每一阶梯电压所维持的时间等于集电极回路的锯齿波扫描电压周期，如图 3 所示，就可在 T_0 时刻扫描出 $I_{C0} = \Phi(I_{B0}, V_{CE})$ 曲线，在 T_1 时候扫描出 $I_{C1} = \Phi(I_{B1}, V_{CE})$ 曲线...。通常阶梯

电压有多少级，就可以相应地扫描出多少根 $I_c = \Phi (I_B, V_{CE})$ 输出特性曲线。

二、实验内容

- (1) 整流二极管、发光二极管、稳压管的正、反向特性测试；
- (2) 晶体三极管的测试（分别对 NPN、PNP 三极管进行测试），包括：
 - 1) 三极管的输出特性；
 - 2) 饱和压降 V_{ces} 的测量；
 - 3) 反向击穿电压： BV_{ceo} 、 BV_{cbo} 、 BV_{ebo} 和反向漏电流的测试；
 - 4) 三极管输入特性的测试；
- (3) 结型场效应管（3DJ7 为例）直流参数的测试（选做）

三、实验步骤

1. 准备

开机前先将各控制旋钮调整如下：

辉度, 聚焦, 辅助聚焦	适中
Y 轴选择开关 -----	1mA/度
X 轴选择开关 -----	2V/度 (Vc)
零电流, 零电压开关 -----	正常
阶梯选择开关 -----	0.02mA/级
阶梯极性 -----	正
级/簇 -----	10
集电极扫描极性 -----	正
峰值电压范围 -----	0 ~ 20V
峰值电压 -----	0V
功耗限制电阻 -----	2K Ω

然后接通电源预热 15 分钟。

2. 测量整流二极管、发光二极管、稳压管的正、反向特性：

首先判断+、-极，一般整流二极管、稳压管带圈的一端为负极；发光二极管长管脚为正（对光看，小面积为正），短管脚为负。

正向特性：选 0~20V 档；X 轴选择开关置 0.2V/度档；Y 轴选择开关置 0.5 mA/度。

按图 4(a)接入被测二极管，调节“峰值电压”旋钮，逐渐增大，即可得到如图 4(b)所示的正向特性曲线。

反向特性：选 0~200V 档；X 轴集电极电压：5~20V/度；Y 轴集电极电流：0.1 mA /度；

功耗电阻：1kΩ；将被测二极管极性反接，调节“峰值电压”旋钮，逐渐增大，即可得到反向特性曲线。

在曲线上测出各参数，记录测试结果。

注：发光二极管：一般正向特性： $I_f=2\text{mA}$ ； $V_f=1.9\text{V}$ (导通，发亮)

反向特性：击穿电压(40~118V)

稳压二极管：正向： $I_b=2\text{mA}$ ； $V_{be}=0.7\text{V}$ (导通) 反向：稳压值 3~10V

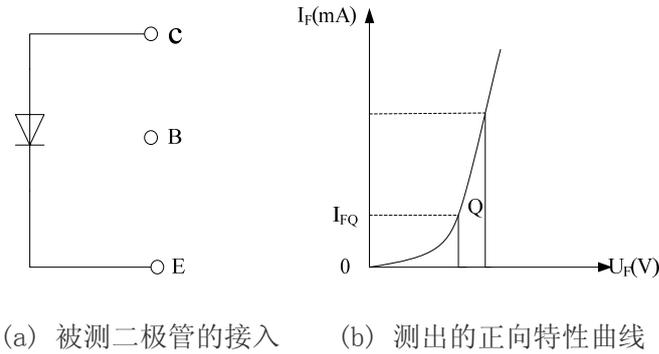


图 4 二极管的测量

3. 测试双极型晶体管的输出特性：

现以 9013 (NPN 型) 三极管为例, 进行几项参数的测试：

A. 电流增益的测试

共发射极电路电流增益的定义如下：

$$h_{FE} = \left. \frac{\partial I_C}{\partial I_B} \right|_{V_{CE}=\text{常数}} \approx \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{V_{CE}=\text{常数}} \quad (2)$$

将三极管的 e、b、c 管脚插在测试盒相应的插座上

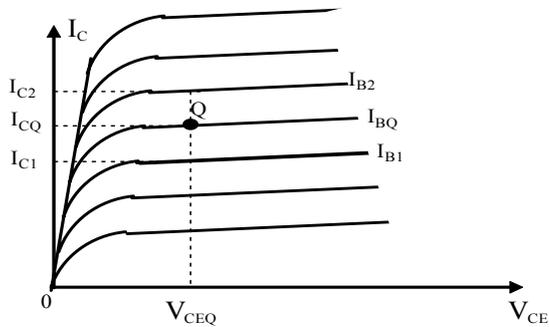


图 5 晶体管输出特性曲线

各开关所置档位：

Y 轴选择开关	-----	1mA/度
X 轴选择开关	-----	1V/度 (Vc)
阶梯选择开关	-----	0.01~0.02mA/级
阶梯极性	-----	正 (NPN 键按下)
级/簇	-----	10
集电极扫描极性	-----	正 (PNP 键弹出)
功耗限制电阻	-----	1KΩ
峰值电压范围	-----	0 ~ 20V
峰值电压调节	-----	调至零点
测试选择开关	-----	单管 (并将开关拨到被测管一边)

逐渐调高集电极扫描电压得到图 5 曲线，根据坐标刻度所在档位读出最大的 I_c 值，根据阶梯选择开关得到 I_b 值，先初步估算出 $\bar{\beta} = \frac{I_c}{I_b}$ (晶体管 9013 的 β 一般为 100~220)。

要求记录测试数据：对应于图中的工作点 Q ，可以求出电流增益为

$$h_{FEQ} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \Big|_{V_{CEQ}} = \frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{B2} - I_{B1}} \Big|_{V_{CEQ}}$$

静态工作点, $I_c=2mA$, $V_{ce}=6V$, 在第 3-4 条曲线处, 读 $\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$, 计算出 β_1 ; 再分别
在第 2-3 条、第 4-5 条曲线处重复读 3 次, 计算出 β_2 、 β_3 ; 求平均值即可。用方格纸描
下曲线。

9013 为 NPN 型三极管, 同样, 测量 PNP 型 (例 9012) 晶体管时, 将电源极性开关置负, 按下转换开关, 其余方法同 PNP 管。

B. 测饱和压降 V_{ces}

晶体管的饱和压降 V_{ces} 是指在给定的 I_b 和 I_c 条件下, “集—射” 之间的电压降。晶体管饱和压降曲线如图 6 所示。这组特性曲线是在输出特性曲线部分将 V_{ce} 轴放大之后得到的。根据饱和压降的定义, 当给定 I_b 和 I_c 的数值后, 可以从晶体管的饱和压降曲线上找出相应的饱和压降 V_{ces} 。 I_b 和 I_c 的取值由测试条件规定, 一般在测试中取 $I_c=10I_b$ 时的 V_{ce} 值作为 V_{ces} 。

测试时, 各档开关置:

基极电流阶梯选择开关	-----	从 0.01mA/级换到 0.1mA/级
级/簇	-----	10

将 X 轴选择波段开关置----- 0.02V/度挡

Y 轴选择开关 ----- 1mA/度

在 $I_B=1\text{ mA}$, $I_C=10\text{ mA}$ 处,可从 X 轴上直接读取晶体管 9013 的 $V_{CES}=0.02*1\text{ 格}=20\text{mv}$

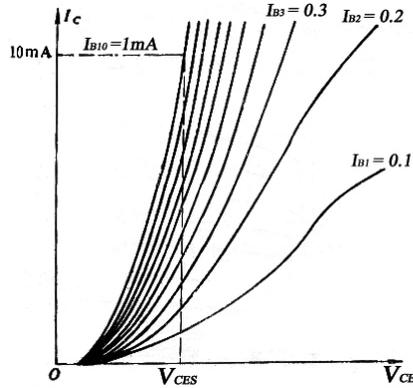


图 6 饱和压降的测量

C. 测饱和压降 V_{bes}

将 X 轴(基极电压)选择波段开关置 0.1V/度挡, 其它不变;

在 $I_C=10\text{mA}$ 处, 可从 X 轴上直接读取 $V_{bes}=0.70\text{V}$

D、反向漏电流和反向击穿电压的测试(只插晶体管的两个管脚)

将晶体管按规定的引脚插入之后, 逐渐加大反向峰值电压, 即可观察到晶体管反向伏安特性曲线, 进而可测出反向漏电流的大小。当反向电压增加到某一数值之后, 反向电流迅速增大, 这就是击穿现象。通常规定晶体管两极之间加上反向电压, 当反向漏电流达到某一规定值时所对应的电压值即为反向击穿电压。

晶体管的反向漏电流和反向击穿电压有三种情况:

- (1) I_{CBO} , BV_{CBO} : E 极开路时 C-B 极之间的反向漏电流和反向击穿电压。

测试时分别将晶体管 C、B 极插入图示仪上的插孔 C、E, 然后加上反向电压, 就可进行测量; (X 轴选择开关置 5-10V/度挡; Y 轴选择开关置 0.01-0.2 mA/度。

例: 测 9013 , BV_{CBO} 大约为 100V, I_{CBO} 大约为 0.1mA。测 I_{CBO} 时, 按表 1 测试条件进行。

- (2) I_{CEO} , BV_{CEO} : B 极开路时 C-E 极之间的反向漏电流和反向击穿电压。

测试时分别将晶体管 C、E 极插入图示仪上的插孔 C、E, 然后加上反向电压, 就可进行测量; (X 轴选择开关置 10V/度挡; Y 轴选择开关置 0.2 mA/度。漏电流 $<0.1\text{mA}$)

测 9013 , BV_{CEO} 大约为 40V

(3) I_{EBO} , BV_{EBO} : C极开路时 E-B极之间的反向漏电流和反向击穿电压。

测试时分别将晶体管 E、B极插入图示仪上的插孔 C、E，然后加上反向电压，就可进行测量；(X轴选择开关置 1V/度档；Y轴选择开关置 0.5 mA/度。漏电流 <0.1mA) 测 9013， BV_{EBO} 大约为 8.5V

注：插管脚时，那个字母在前，那个为高电位。在数值上，它们之间有如下关系：

$$BV_{CBO} > BV_{CEO} > BV_{EBO}$$

E、输入阻抗的测试

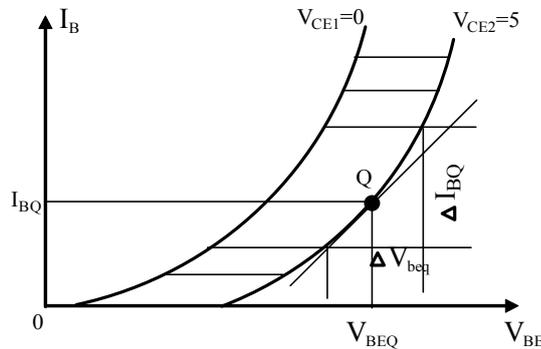


图 7 晶体管输入特性的测试

可调节“峰值电压” 0~20V 挡；

Y轴选择开关：阶梯；

X轴选择开关：基极电压 0.1V /度；

阶梯选择置：0.01mA/级；

功耗电阻：100 Ω；

晶体管的输入特性对于共发射极电路来说是指 I_b 和 V_{be} 的关系，输入阻抗用 h_{IE} 表示。

以 npn 管为例，将被测管 E、B、C极分别插入图示仪插座孔 E、B、C，然后加大“峰值电压”，可得到如图 7 所示的共发射极接法时的输入特性曲线。

共发射极输入阻抗 h_{IE} 的定义可表示如下：

$$h_{IE} = \left. \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} \right|_{V_{CE}=\text{常数}} \approx \left. \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{V_{CE}=\text{常数}} \quad (3)$$

例如，若要测出当 $V_{CE}=5V$ ， $I_B=40 \mu A$ 时的输入阻抗，从图 7 右边一根曲线上，可自下而上数到第 4 个亮点 (Q 点)，就对应于 $I_B=4 \times 10 \mu A=40 \mu A$ 的一点，然后过 Q 点作切线，以切线为斜边作直角三角形，即可求出被测管的输入阻抗，不同的 I_B 对应不同 h_{IE} 的值。

4. 场效应半导体管

场效应晶体管（FET）是利用输入回路的电场效应来控制输出回路电流的一种半导体器件。由于它仅靠半导体中的多数载流子的导电，故又称“单极型”晶体管。

现以 3DJ7G、(N 沟道耗尽型) JFET 场效应管为例，进行几项参数的测试：

A. 转移特性

各开关所置挡位：

Y 轴选择开关	-----	1.0~2.0mA/度
X 轴选择开关	-----	阶梯
扫描极性选择	-----	+  (集电极)、-  (基极)
基级阶梯信号	-----	0.1V/级~0.2V/级
功耗限制电阻	-----	100 Ω
峰值电压范围	-----	0~20V

转移特性描述当漏-源电压 U_{DS} 为常量时，漏极电流 i_D 与栅源电压 U_{GS} 的关系曲线称为转移特性。即

$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{u_{DS}=c}$$

转移特性曲线为图 8 所示。从曲线中可读出饱和漏电流值与夹断电压值。

当 V_{DS} 为确定值， U_{GS} 由零向负方向变化， i_D 将减小， $u_{GS} < U_{GS(off)}$ ，使 $i_D = 0$ ，此电压便是夹断电压 $U_{GS(off)}$ (或用 V_P 表示)。

测试条件：当 $U_{DS}=10V$ ， $i_D < 5\mu A$ 时， $u_{GS} = U_{GS(off)}$

当 $U_{GS}=0$ 时，漏极电流最大，称为饱和漏电流，用 I_{DSS} 表示。

测试条件：当 $U_{DS}=10V$ ， $U_{GS}=0V$ 时， $i_D = I_{DSS}$

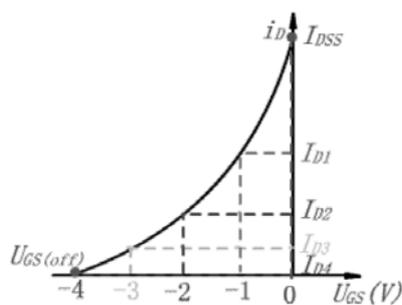


图 8 转移特性曲线

B. 输出特性

输出特性表示当栅—源电压 U_{GS} 为常量时,漏极电流 i_D 与漏—源电压 U_{DS} 之间的函数关系,即

$$i_D = f(u_{DS}) \Big|_{u_{GS}=C}$$

曲线如图 9 所示。从该曲线中可测出器件的交流参数跨导 g_m

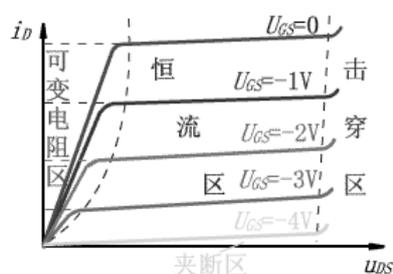


图 9 输出特性曲线

各开关所置挡位:

Y 轴选择开关	-----	1.0~2.0mA/度
X 轴选择开关	-----	集电极电压 2 V/度
基级阶梯信号	-----	0.05V/级~0.2V/级
扫描信号极性	-----	+ (集电极)、- (基极)
功耗限制电阻	-----	100 Ω
峰值电压范围	-----	0~20V

通过输出特性曲线图 9, 也可测试出饱和漏电流值 I_{DSS} 。

测试条件: 当 $U_{DS}=10V$, $U_{GS}=0V$ 时, $i_D = I_{DSS}$ (3DJ7G 的 I_{DSS} 大约为 6.5~7.5mA)

跨导是场效应晶体管的一个重要参数。它的数值大小表示栅源电压 U_{GS} 对漏极电流 i_D 的控制能力。跨导定义为漏源电压 V_{DS} 一定时, 漏极电流的微分增量与栅源电压的微分增量之比, 即

$$g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \Big|_{V_{DS}=C}$$

跨导的单位是 S(西门子)或 mS。

测试条件: 当 $U_{DS}=10V$, $i_D=3mA$ 或 $i_D = I_{DSS}$ 时, g_m 也可通过转移特性曲线图 8 进行测量, 曲线上某一点切线的斜率即为 g_m 。由于转移特性曲线为非线性, 因此 i_D 愈大, g_m 也愈大。

5. 注意事项:

(1)、根据待测管的类型 (npn 或 pnp) 及参数测试条件, 调整好光点坐标, 将待测管插入相应的位置。

(2)、参考表 1 所示的测试条件进行测试。

(3)、根据曲线水平和垂直坐标的刻度, 从曲线上读取数据。为了减少测试误差, 同一个数据要多读几次, 取其平均值。

(4)、实验结束后, 应将“峰值电压”调回零值, 再关掉电源。

四、实验数据处理

根据实验中观察到的波形及记录的数据, 拟成图表, 求出各个参数并对器件质量进行分析。

五、思考题

1、“功耗电阻”在测试中起什么作用? 应根据什么来选取?

表 1 双极型晶体管的测试条件举例

	3DG12	3AD6
待测参数	测试条件	测试条件
I_{CBO}	$V_{CB}=10V$	$V_{CB}=20V$
I_{EBO}	$V_{BE}=1.5V$	$V_{BE}=10V$
I_{CEO}	$V_{CE}=10V$	$V_{CE}=10V$
$V_{(BR)EBO}$	$I_B=100\mu A$	$I_B=5mA$
$V_{(BR)CBO}$	$I_C=100\mu A$	$I_C=5mA$
$V_{(BR)CEO}$	$I_C=200\mu A$	$I_C=10mA$
h_{IE}	$I_B=50\mu A, V_{CE}=5V$	$I_B=1mA, V_{CE}=2V$
h_{FE}	$I_C=3mA, V_{CE}=5V$	$I_C=0.2A, V_{CE}=2V$
V_{CES}	$I_C=10I_B$	$I_C=10I_B$

2、为保证测试管的安全, 在测试中应注意哪些事项?

3、从晶体管结构、材料、器件原理及工艺方面对各种失效器件的原因进行分析。

4、对晶体管与场效应管的工作原理进行比较。

六、参考资料

[1] 张建华, 电子技术基础实验技术 P. 212-223, 北京工业学院出版社, 1987 年。

[2] 张保华, 模拟电路实验基础, 同济大学出版社, 2007 年。

[3] 林昭炯、韩汝琦, 晶体管原理与设计, P. 128-149, 科学出版社 1979 年。

[4] 童诗白、华成英, 模拟电子技术基础, P. 34-48, 高等教育出版社 2000 年。

实验四 晶体管开关时间的测量

晶体管开关时间是标志晶体管开关特性的一个极其重要的参数。当晶体管作为开关应用时，其开关时间将直接影响电路的工作频率和整机的性能。

本实验通过测量双极型晶体管的开关时间，熟悉开关时间的测试原理、掌握开关时间的测试方法、研究测试条件变化对晶体管开关时间的影响。

一、实验原理

图 1 是典型的 npn 晶体管开关电路，图中 R_L 和 R_B 分别为负载电阻和基极偏置电阻、 V_{BB} 和 V_{CC} 分别为基极和集电极的偏置电压。

如果给晶体管基极输入一脉冲信号 V_b ，基极和集电极电流 I_b 和 I_c 的波形如图 2 所示。

当基极无信号输入时，由于负偏压 V_{BB} 的作用，使晶体管处于截止状态，集电极只有很小的反向漏电流即 I_{CEO} 通过，输出电压接近于电源电压 $+V_{CC}$ 。此时晶体管相当于一个断开的开关。

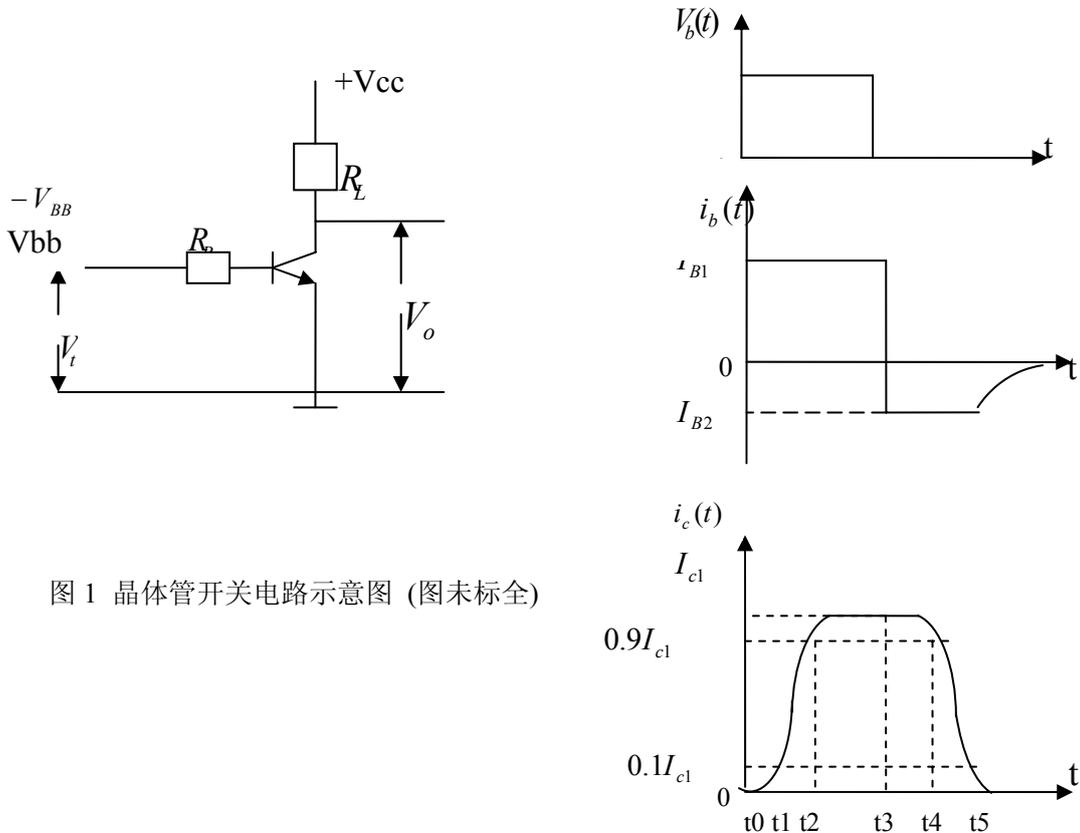


图 1 晶体管开关电路示意图 (图未标全)

图 2 开关晶体管输入.输出波形

当给晶体管输入正脉冲 V_b 时，晶体管导通。若晶体管处于饱和状态，则输出电压为饱和电压 V_{CES} ，集电极电流为饱和电流 I_{CS} 。此时，晶体管相当于一个接通的开关。

由图 2 可以看出：当输入脉冲 V_b 加入时，基极输入电流立刻增加到 I_{B1} ，但集电极电流要经过一段延迟时间才增加到 I_{CS} ，当输入脉冲去除时，基极电流立刻变到反向基极电流 I_{B2} ，而集电极电流也经过一段延迟时间才逐渐下降。

在实际测量中，如果使用双踪示波器，观察的是输入电压和输出电压的波形，如图 3 所示。

晶体管开关时间参数一般是按照集电极电流 i_c 的变化来定义：

延迟时间 t_d ：从脉冲信号加入到 i_c 上升到 $0.1I_{CS}$

上升时间 t_r ： i_c 从 $0.1I_{CS}$ 上升到 $0.9I_{CS}$

存贮时间 t_s ：从脉冲信号去除到 i_c 下降到 $0.9I_{CS}$

下降时间 t_f ： i_c 从 $0.9I_{CS}$ 下降到 $0.1I_{CS}$

其中 t_d+t_r 即开启时间 t_{on} 、 t_s+t_f 即关闭时间 t_{off} ，本实验所要测量的开关时间就是根据这种定义的开关时间，按这种定义方法测量开关时间比较方便。

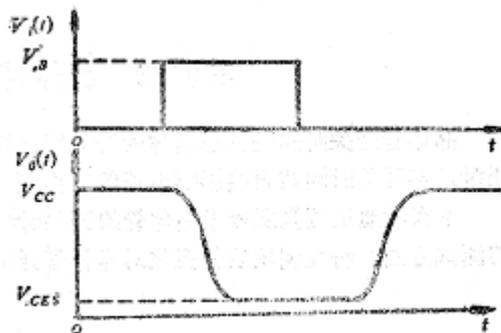


图 3 开关晶体管输入、输出电压波形

当晶体管作为开关应用时，可以把晶体管看作是一个“电荷控制”器件，根据少数载流子连续性方程可以推导出电荷控制分析的基本方程

$$\frac{dQ_b}{dt} = i_b - \frac{Q_b}{\tau_n} \quad (1)$$

式中 Q_b 是贮存在基区中电子的总电荷， τ_n 是基区中电子寿命。

根据延迟时间的定义，在延迟时间内，发射结偏压将由 $-V_{BB}$ 上升到微导通电压 V_{JO} （约 $0.5V$ ），集电结反向偏压由 $(V_{CC}+V_{BB})$ 减小到 $(V_{CC}-V_{JO})$ ，这个过程是基极电流 I_{B1} 对发射结和集电结势垒电容充电的过程。与此同时，基区将逐渐形成少子的浓度梯度。根据电荷控制分析的基本方程（1）可以写出与延迟时间对应的电荷微分方程，经过变换和数学处理，

最终可得到延迟时间

$$\begin{aligned}
 t_d = & \frac{V_{DE} C_{TE}(0)}{I_{B1}(1-n_e)} \left[\left(1 + \frac{V_{BB}}{V_{DE}}\right)^{1-n_e} - \left(1 - \frac{V_{JO}}{V_{DE}}\right)^{1-n_e} \right] \\
 & + \frac{V_{DE} C_{TC}(0)}{I_{B1}(1-n_c)} \left[\left(1 + \frac{V_{CC} + V_{BB}}{V_{DC}}\right)^{1-n_c} - \left(1 + \frac{V_{CC} - V_{JO}}{V_{DC}}\right)^{1-n_c} \right] \\
 & + \beta_{DC} (\omega_T + 1.7R_L C_{TC}) \ln\left(\frac{\beta_{DC} I_{B1}}{\beta_{DC} I_{B1} - 0.1I_{CS}}\right) \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中 V_{DE} 、 V_{DC} 分别为发射结和集电结的接触电势差， n_e 、 n_c 对于突变结和线性缓变结分别为 1/2 和 1/3。

在上升时间 t_r 时，基极驱动电流继续对发射结、集电结势垒电容充电，使发射结偏压由 V_{JO} 上升到导通电压 V_F (约 0.7V)，集电结反向偏压逐渐减小，使少子浓度梯度不断增加。此外，基极电流还要补充基区因复合而减少的电荷。与求延迟时间的方法类似，先写出与上升时间对应的电荷微分方程，进而可求得上升时间

$$t_r = \beta_{DC} \left(\frac{1}{\omega_T} + 1.7R_L C_{TC} \right) \ln\left(\frac{\beta_{DC} I_{B1} - 0.1I_{CS}}{\beta_{DC} I_{B1} - 0.9I_{CS}}\right) \quad (3)$$

存贮时间主要是基区、集电区过量存贮电荷消失，发射结、集电结电容放电的过程。由对应的电荷微分方程推导的存贮时间为

$$\begin{aligned}
 t_s = & \tau_s \ln\left(\frac{\beta_{DC} I_{B1} + \beta_{DC} I_{B2}}{\beta_{DC} I_{B2} + I_{CS}}\right) \\
 & + \beta_{DC} \left(\frac{1}{\omega_T} + 1.7R_L C_{TC} \right) \ln\left(\frac{\beta_{DC} I_{B2} + I_{CS}}{\beta_{DC} I_{B2} + 0.9I_{CS}}\right) \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中 τ_s 为存贮时间常数，对于 $W_C > L_{PC}$ 的外延平面管 $\tau_s \approx \tau_{PC}$ ，对于 $W_C \ll L_{PC}$ 的外延平面管 $\tau_s \approx W_C^2 / 2L_{PC}$ ，这里 τ_{PC} 和 L_{PC} 分别为集电区的少子寿命和扩散长度。

下降时间即上升时间的逆过程，用同样的方法可得

$$t_r = \beta_{DC} \left(\frac{1}{\omega_T} + 1.7R_L C_{TC} \right) \ln\left(\frac{\beta_{DC} I_{B1} + 0.1I_{CS}}{\beta_{DC} I_{B1} + 0.9I_{CS}}\right) \quad (5)$$

以上开关时间参数公式的详细推导见参考资料[1]。

由开关时间参数的表达式可以清楚地看到：开关时间既决定于 C_{TE} 、 C_{TC} 、 f_T 、 β_{DC} 等晶体管本身的参数，也取决于 I_{B1} 、 I_{B2} 及 I_{CS} 等外部电路参数。势垒电容的充放电、电荷的存贮和消失是影响开关时间的内因，而外电路对晶体管的注入和抽取是影响开关时间的外因。

因此，除晶体管的材料、结构和工艺参数以外，测试条件和使用条件也将对开关时间带来显著的影响。本实验除了测量晶体管在一定测试条件下的开关时间，还要改变测试条件，测出开关时间的变化，并和理论分析结果进行比较。

本实验采用 BJ2961A 实验装置测量双极型晶体管开关时间，该仪器由以下几个部分组成：

A、取样示波器部分：它将被测器件输入信号（以下简称 A 信号）和输出信号（以下简称 B）信号经“取样”处理后，原 A、B 高频信号在时间上等效为低频信号经缓冲电路供给 A/D 转换，计算机通过键盘和接口电路进行数字化输出，电路主要包括：

①A、B 通道探头：采保 A、B 信号的取样点电平。取样示波器的水平部分：它由信号源“前置脉冲”触发。产生扫描斜波和快斜波、频进延迟脉冲等电信号。由计算机接口电路来的控制信号可改变大斜波的幅度或快斜波的斜率，从而改变示波器的“等效扫速”量程。

②取样脉冲发生器：产生高速开门脉冲，垂直通道的展宽门脉冲及 A、B 垂直通道的前级放大电路。垂直通道部分电路：经过采保来的微弱信号展宽放入。

B、脉冲信号发生器：脉冲信号发生器由前级部分和后级部分组成。前级部分由振荡电路、前置脉冲电路，延迟电路等组成。由计算机来的控制信号通过接口可以改变前级输出脉冲对前置脉冲的延迟。末级电路在专用的“正负极脉冲头”内，它由电缆线接在仪器 B 屈“脉冲输出”插座上，由脉冲前级触发，由计算机极性，脉冲末级输出前沿为 2nS 的正负脉冲。

C、缓冲比较电路：A、B 取样放大后的信号，在此缓冲为适应 A/D 数字处理的电平和幅值。

D、A/D 轮换及显示部分：本模块的功能是将 A、B 信号在一定时序的控制下进行采样，A/D 转换，并将转换的结果送入微机内存，以供软件处理。

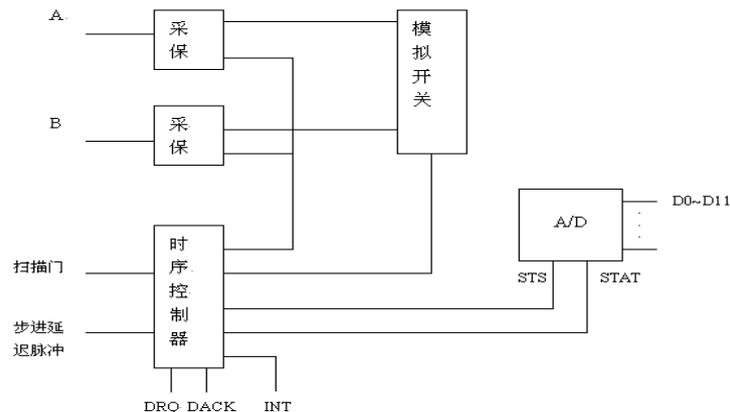


图 4 功能框图

原理说明：如图 4 所示，A、B 信号经采样保持后，由模拟开关进行切换，依次送入 A/D 转换器进行 A/D 转换。时序控制根据 A/D 转换的结束信号 STS 产生 DMA 申请信号 DRQ，以

申请 DMA 传送。DMA 响应信号 DACK 到来后,时序控制器将 A/D 转换结果送上微机总线, DMA 控制器读走数据以后, 时序控制器控制下一信号的 A/D 转换及 DMA 传送。这样高速运转, 周而复始, 便可将 A、B 信号数字化便于软件处理。

E、接口电路: 提供了从 3E0 到 3E7, 8 个 I/O 口, 以控制其它单元的量程转换, 参数转换, 也可读回键盘的键值。

F、被测晶体管电源: 被测晶体管电源 VB、VC 由本仪器 B 屈面板上琴键开关控制, 配合相应的测试盒, 为被测晶体提供 IB、IC 电流。注意琴键开关所处电流位置必须与所使用测试盒电流值一致。

G、IB、IC 电源表: 电流表为 3 位半的数字表头, 分别指示 IB、IC 电流, 电流单位为 mA。当被测晶体管 T_s 、 T_r 、 T_{off} 三个参数时, 调节电流表旁的“IB 调节”、“IC 调节”电位器可预置 IB、IC 电流值。

H、测试盒: 本仪器备五个测试盒, 根据所测管的测量条件进行选用, 五个测试盒分别为:

$I_{B1}=I_{B2}=1\text{ mA}$	$I_c=10\text{mA}$
$I_{B1}=I_{B2}=3\text{ mA}$	$I_c=30\text{mA}$
$I_{B1}=I_{B2}=10\text{mA}$	$I_c=100\text{mA}$
$I_{B1}=I_{B2}=30\text{mA}$	$I_c=300\text{mA}$
$I_{B1}=I_{B2}=50\text{mA}$	$I_c=500\text{mA}$

仪器的使用: 将仪器的四部分 (A 屈、B 屈、测试盒、正负极性脉冲头) 按下图连接在一起。

如图 5 所示:

注意 B 屈琴键开关所选择的测量条件应与所选用的测试盒相统一。

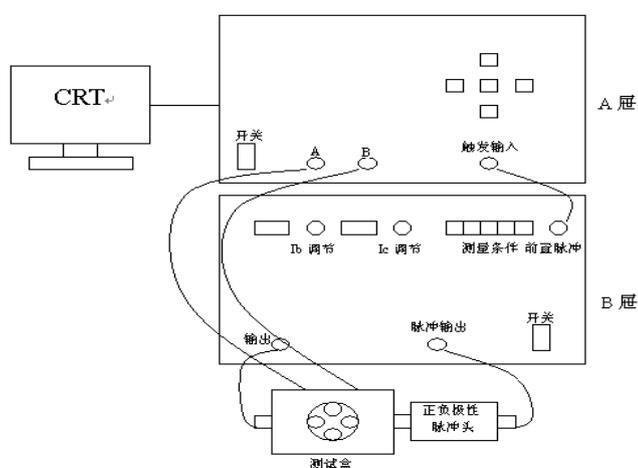


图 5 仪器连接示意图

二、实验内容

- 1、用图 5 所示的实验装置在显示器上观察晶体管输入和输出波形，读取各开关时间参数。
- 2、测量两只高频管（如 3DG12）和低频管或具有不同电流增益的晶体管的开关时间，研究晶体管本身参数对开关时间的影响。
- 3、改变外电路参数 I_{B1} 、 I_{B2} 和 I_{CS} ，测量晶体管的开关时间，研究测试条件变化对晶体管开关时间的影响。

三、实验步骤

- 1.将仪器的四个部分（A 屉、B 屉、测试盒、正负极性脉冲头）按图 5 所示安装。
- 2.根据选用的测试盒按下 B 屉相应的琴键开关，注意：琴键开关必须与测试盒一致，否则仪器将会损坏，注：本实验选用的测试盒的标称是 $I_B = 30\text{mA}$ 、 $I_C = 300\text{mA}$ ，应将琴键的“30/300”键按下。
- 3.打开 A 屉、B 屉电源，显示器显示测试屏幕，预热 10 分钟后继续下一步操作。
- 4.开机后屏幕上显示的即为主菜单，有六个选项：“管序号”、“参数”、“扫速”、“图形分析”、“打印”、“帮助”，按 A 屉面板上的“ $\uparrow\downarrow$ ”键进行项目选择，按“确认”键确认所选。若未选择，则开机后仪器默认的“管序号”为 1，“测试参数”为 T_{off} ，“测试扫速”为 100 nS/cm。
- 5.插上被测管，如果 B 屉显示的 I_B 、 I_C 与测试盒的标称有误差，可调整相应的 I_B 、 I_C 调节旋钮使之一致。
- 6.此时图形显示区域有 AB 曲线显示，“参数”区域显示测试的参数值。
- 7.若需调整测量扫速或测量参数，请按“ $\uparrow\downarrow\leftarrow\rightarrow$ ”及“确认”键进行调整。
- 8.如果测试结果需要打印，按“打印”按钮，选择适当的“START”和“END，”连接好打印机，就可以打印了。
- 9.在测试过程中，可随时按“帮助”按钮，阅读使用说明书。

四、数据处理和分析

本实验测量双极型晶体管的开关时间并研究测试条件变化对开关时间的影响。需要记录以下实验结果：

- 1、记录在显示器上观察到的输入脉冲电压和输出电压波形。
- 2、在一定测试条件下，测量高频管和开关管的延迟时间 t_d 、上升时间 t_r 、开启时间 t_{on} 及存贮时间 t_s 、下降时间 t_f 、关闭时间 t_{off} ，记录测试数据。
- 3、改变测试条件后，对各开关时间参数的测试结果进行分析。

五、思考题

- 1、测试条件变化对晶体管开关时间参数带来什么影响？为什么？如何改变测试条件？
- 2、根据测试结果，比较晶体管各开关时间参数的大小，说明影响晶体管开关时间的主要因素，指出提高晶体管开关速度的主要途径。
- 3、比较一般高频管（3DG12）和开关管（3DK4）的开关时间，说明晶体管开关时间和频率特性之间的关系。

六、参考资料

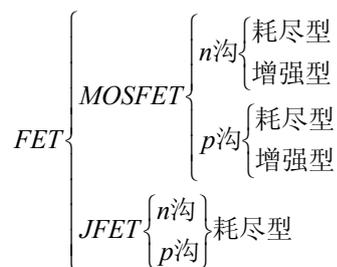
- [1] 浙江大学半导体教研室，晶体管原理，国防工业出版社，P.239，1980.
- [2] 顾德红，脉冲与数字电路，人民教育出版社，P.120，1979.
- [3] 张瑞华，电子线路分析基础，水利电力出版社，P708，1983.

实验五 场效应晶体管参数测量

场效应晶体管不同于一般的双极晶体管,它是一种电压控制器件。从工作原理看,场效应晶体管与电子管很相似,是通过改变垂直于导电沟道的电场强度去控制沟道的导电能力,因而称为“场效应”晶体管。场效应晶体管的工作电流是半导体中的多数载流子的漂移流,参与导电的只有一种载流子,故又称“单极型”晶体管。通常用“FET”表示。

场效应晶体管分为结型场效应管 (JFET) 和绝缘栅型场效应管 (MISFET) 两大类。目前多数绝缘栅型场效应管为金属-氧化物-半导体 (MOS) 三层结构, 缩写为 MOSFET。

本实验对结型、MOS 型场效应管的直流参数进行检测。场效应管按导电沟道和工作类型可分为:



一、实验原理

1. 参数定义

(1) 最大饱和电流 (I_{DSS})

当栅源电压 $V_{GS}=0$ 、漏源电压 V_{DS} 足够大时所对应的漏源饱和电流为最大饱和电流。它反映场效应管零栅压时原始沟道的导电能力。显然这一参数只对耗尽型管才有意义。对于增强型管, 由于 $V_{GS} = 0$ 时尚未开启, 当然就不会有饱和电流了。

(2) 跨导(g_m)

跨导是场效应晶体管的一个重要参数。它标志着栅极电压对漏极电流的控制能力。跨导定义为漏源电压 V_{DS} 一定时, 漏极电流的微分增量与栅极电压的微分增量之比, 即

$$g_m = \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=C}$$

跨导是衡量场效应管放大作用的重要参数, 类似于电流放大系数, 测量方法也很相似。

跨导常以栅压变化 1V 时漏电流变化多少微安或毫安表示。它的单位是西门子, 用 S 表示,

$1S=1A/V$ 。或用欧姆的倒数“姆欧”表示，记作“ Ω^{-1} ”。

(3) 夹断电压 V_P 和开启电压 V_T

夹断电压 V_P 是对耗尽型管而言，它表示在一定漏源电压 V_{DS} 下，漏极电流减小到接近于零（或等于某一规定数值，如 $50\mu A$ ）时的栅源电压。

开启电压 V_T 是对增强型管而言。它表示在一定漏源电压 V_{DS} 下，开始有漏电流时对应的栅源电压值。

MOS 管的夹断电压和开启电压又统称阈值电压。

(4) 击穿电压 (BV_{DS})

当栅源电压 V_{GS} 为一定值时，使漏电流 I_{DS} 开始急剧增加的漏源电压值，用 BV_{DS} 表示。

注意，当 V_{GS} 不同时， BV_{DS} 亦不同，通常把 $V_{GS}=0$ 时对应的漏源击穿电压记为 BV_{DS} 。

(5) 栅源击穿电压 (BV_{GS})

栅源击穿电压是栅源之间所能承受的最高电压。结型场效应管的栅源击穿电压，实际上是单个 $p-n$ 结的击穿电压，因而测试方法与双极管 BV_{EBO} 的测试方法相同。对 MOS 管，由于栅极下性面的缘绝层是 SiO_2 ，所以击穿是破坏性的。

二、实验内容与要求：

1、完成结型场效应管参数的测量。

2、熟悉场效应晶体管主要参数的物理意义及 BJ2922B 型场效应管参数测试仪的使用方法。

三、实验步骤与要求

利用 BJ2922B 型场效应管参数测试仪测量 n 沟耗尽型 MOSFET、(如 3D01)、n 沟 JFET(如 3DJ6) 的各项主要参数。本仪器可用于 J 型或 MOS 型小功率 (300mW 以下) 场效应管单管或对管常用参数测试，如 g_m (g_{fs})、饱和漏电流 I_{DSS} 、夹断电压 V_P ($V_{gs(off)}$) 或开启电压 V_T ($V_{gs(th)}$)。

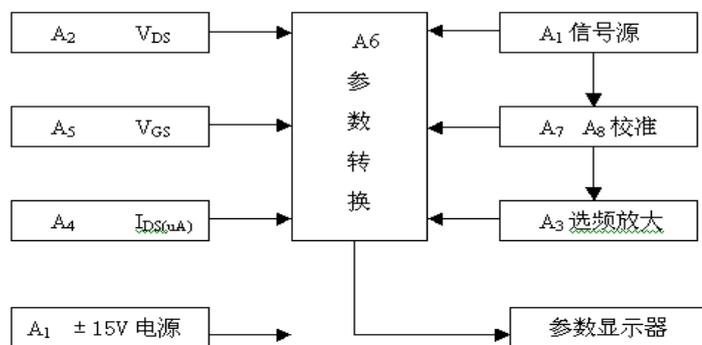


图 1 整机方框图

整机由 A1~A12 等单元电路及参数测试转换电路组成,

其中主要单元有:

A1——1kHz 振荡器及 $\pm 15\text{V}$ 机内电源

A2——15V 可调电源 (被测管) $\pm 5\text{V}$ 工作电源

A3——选频放大器、检波器

A4—— I_{DS} (μA) 源

A5—— V_{GS} (被测管栅极工作电压)

A6——琴键开关 (参数转换)

A7——DC 校 (调节)

A8——AC 校 (调节)

A9—— $g_{\text{m}} \times 2$

A10—— $I_{\text{DSS}} \times 10$

实验准备:

面板旋钮位置预置于下列位置

电源开关——关 (倒向左侧)

V_{GS} ——地键 (中) 按下

V_{GS} 调节——反钟向到底

V_{DS} ——N+键按下

V_{DS} 调节——反钟向到底

I_{DS} (μA) —— $10\mu\text{A}$ 键 (中) 按下

校——DC 键按下 (显示器右侧)

参数选择 (位于显示器下面, 简称下排) ——校键按下

1、仪器校准:

(1) 接通整机电源 (电源开关由左侧倒向右侧), 预热 15 分钟

(2) DC 校准: 先按下参数选择 (下排) 中的校键 (前已设定), 再按下显示器右侧校中的 DC 键 (前已设定), 显示器显示应为 100.0 ± 0.1 , 否则应微调其下方暗孔中的电位器 (220Ω);

AC 校准: 按下校 (显示器右侧) 中的 AC 键, 显示器显示应为 100.0 ± 0.1 , 否则应微调其下方暗孔

中的电位器（100Ω）

校准已毕，参数测试工作即可开始进行。

注：上述 DC、AC 校准工作，通常需要重复进行几次。另外，当参数测试工作持续时间较长时，上述校准工作还可随时返回再进行一次，这样其测试结果就变得更为有效。

2、实验参数测试：

现以 3DJ6G（结型，N 沟道耗尽型场管）为例说明：

(1) 饱和电流 I_{DSS} 测试

A. 由器件手册查知，该参数测试条件为： $V_{DS}=10V$ $V_{gs}=0V$ ；

B. 先按下 V_{DS} 键（下排），再按下 V_{DS} 极性 N^+ 键（前已设定），且顺时针向调节 V_{DS} 按钮，至数字表指示于 10V；

C. 按下 V_{GS} 极性 N 键，反时针向调节 V_{GS} 钮至尽头（前已调定，此时 $V_{gs}=0$ ）

注：也可直接按下 V_{GS} 中的地（中）键（此时 V_{gs} 直接接地）

也同样可以实现 $V_{gs}=0$ 之目的，且省去了 V_{gs} 调节步骤。建议设定 $V_{gs}=0$ 时，优先使用该键，此方法更简便，准确！

D. 插入被测管（3DJ6G），按下参数选择（下排）中的 I_{DSS} 键，再将测试盒上的扳键开关倒向被测管一边，此时，数字表显示的值即为所测 I_{DSS} 值。

注：1、如若 I_{DSS} 较大（如 3DJ8I 等），超过 20mA（此时显示器出现高位 1），则需取用（即按下） $\times 10$ 键（ I_{DSS} 键左侧），自然这时的 I_{DSS} 等于显示值 $\times 10$ （即扩大了 10 倍）

2、该项参数测试完毕后，如欲转向另一项参数测试，则需先将测试盒上的“左·右”按键置于中间“断”的位置，再进行下项参数转换操作，这样可以隔离被测器件与整机线路的联系，而确保被测器件及仪器的安全。

(2) 夹断电压 V_P （或开启电压 V_T ）测试

A. 由器件手册查知，该参数测试条件： $V_{DS}=10V$ $I_{DS}=10\mu A$ （或 $50\mu A$ ）

B. 按下 V_{DS} 键，设定 V_{DS} 值（该键前 5.3.1B 中已经设定，如有不同，可另行设定）

C. 按下 $I_{DS}=10\mu A$ 键（中），设定 $10\mu A$ 电流值

D. 按下 $V_P(T)$ 键，此时，数字表显示之值即为所测 V_P 值

(3) 低频正向跨导 g_m 测试

A. 由器件手册查知，该参数测试条件： $V_{DS}=10V$ ， $V_{gs}=0$ （或 $I_{DS}=3mA$ ） $f=1kHz$

B. V_{DS} 、 V_{GS} 上已设定完毕 (如有不同, 可另行设定); $f=1\text{kHz}$ 这一条件, 已由整机设计中保证, 实际使用中无需另行操作

C. 按下 g_m 键, 此时, 数字表显示之值即为所测 g_m 值 ($V_{GS}=0$ 时)

D. I_{DS} 设定: 如若 g_m 测试条件中给定的不是 $V_{GS}=0$, 而是 $I_{DS}=3\text{mA}$, 那么, 这时就应当改设 I_{DS} 这一测试条件了, 其具体步骤是: 按下 I_{DS} 键, 再按下 V_{GS} 中的 N 键 (注意极性, 此时要求的是负栅压!), 且顺时针方向调节 V_{GS} 钮至数字表所显示 I_{DS} 值为 3mA ; 然后再按下 g_m 键, 此时, 数字表显示之值即为 $I_{DS}=3\text{mA}$ 条件下的 g_m 值。

E. $g_m \times 2$ 键的选用

$g_m \times 2$ 键的使用应依据被测器件 g_m 值的大小而定, 如若被测器件 g_m 值太高, 使显示器出现“1” (超量限), 此时, 应按下 $\times 2$ 键 (下排右侧), 即 g_m 量程扩展 1 倍 ($20\text{mS} \times 2$)。自然, 此时的 $g_m = \text{显示数字} \times 2$ (倍), 最高可达 40mS

四、数据处理及分析

1、对 MOSFET 进行参数测量, 并将测量结果列入下表:

被测管型号: _____

	参数和符号	单位	测试条件	测试结果
直流参数	I_{DSS}	mA	$V_{DS} =$, $V_{GS} =$	
	V_p/V_T	V	$V_{DS} =$, $I_D =$	
交流参数	g_m	μS	$V_{DS} =$, $I_{DS} =$, $f =$	

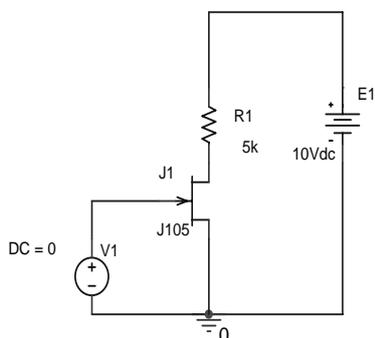
2、对结型晶体管进行测量, 结果仿照上表, 列入表中, 并对测试结果进行分析。

五、思考题

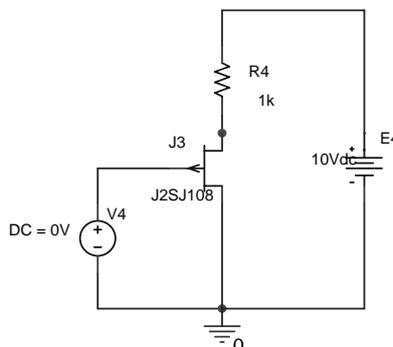
- 1、测量 PMOSFET 时, 衬底应接稳压源的哪一极?
- 2、假设我们有一个封装好的 NMOS 晶体管, 其四个引脚未标识。利用欧姆表测定器件的直流特性确定栅、源/漏和衬底端, 说明所需要的最少检测步骤。

附录：JFET、MOSFET 管 V_P/V_T 的测量

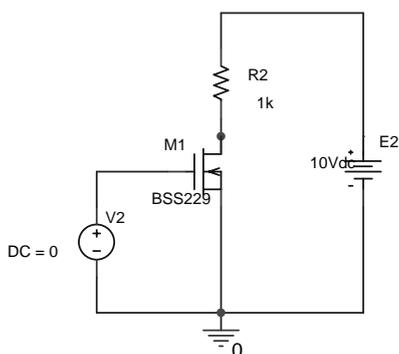
一、电路图：



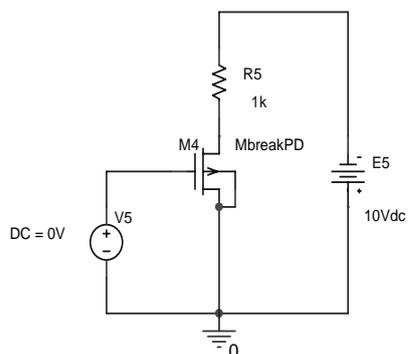
J 型 n 沟道场效应管 $V_P < 0$
 $V_1 = -7V \sim +5V$, $V_{T0} = -6.2V$



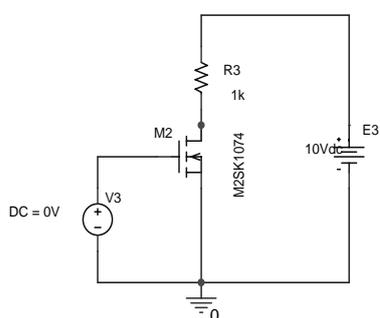
J 型 P 沟道场效应管 $V_P > 0$
 $V_2 = -7V \sim +5V$, $V_{T0} = -0.5376V$



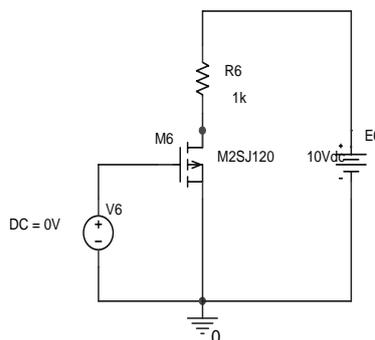
MOSFET 耗尽型 N 沟道 $V_T < 0$
 $V_1 = -7V \sim +5V$, $V_{T0} = -1.66V$



MOSFET 耗尽型 P 沟道 $V_T > 0$
 $V_1 = -7V \sim +5V$, $V_{T0} = 4.0V$



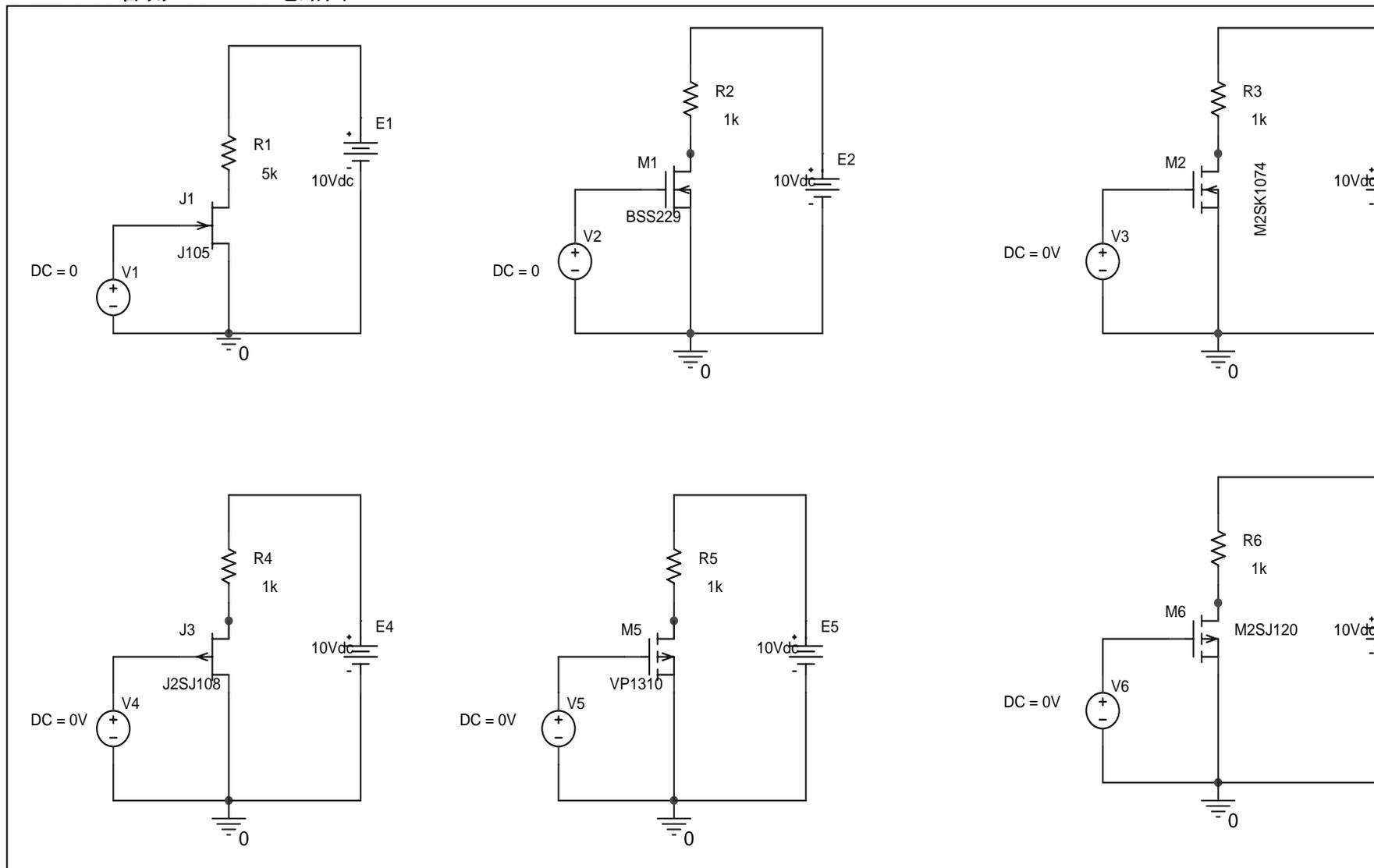
MOSFET 增强型 N 沟道 $V_T > 0$
 $V_1 = -5V \sim +5V$, $V_{T0} = 3.525V$



MOSFET 增强型 P 沟道 $V_T < 0$
 $V_1 = -5V \sim +5V$, $V_{T0} = -1.661V$

二、要求：用 ORCAD9.2 对以上电路进行仿真，了解工作原理，电路搭建与调试，测量数据及结果分析。

MOSFET 管测 VP、VT 电路图



实验六 光电导衰减法测量单晶硅非平衡少数载流子寿命

半导体中的非平衡少数载流子寿命是与半导体中重金属含量、晶体结构完整性直接有关的物理量。它对半导体太阳能电池的换能效率、半导体探测器的探测率和发光二极管的发光效率等都有影响。因此，掌握半导体中少数载流子寿命的测量方法是十分必要的。

测量非平衡少数载流子寿命的方法有许多种，一般可分为瞬态法和稳态法两大类。瞬态法是利用脉冲电或闪光在半导体中激发出非平衡载流子，改变半导体的体电阻，通过测量体电阻或两端电压的变化规律直接获得半导体材料的寿命。这类方法包括光电导衰减法和双脉冲法。稳态法是利用稳定的光照，使半导体中非平衡少子的分布达到稳定的状态，由测量半导体样品处在稳定的非平衡状态时的某些物理量来求得载流子的寿命。例如：扩散长度法、稳态光电导法等。

光电导衰减法有直流光电导衰减法、高频光电导衰减法和微波光电导衰减法，其差别主要在于是用直流、高频电流还是用微波来提供检测样品中非平衡载流子的衰减过程的手段。直流法是标准方法，高频法在 Si 单晶质量检验中使用十分方便，而微波法则可以用于器件工艺线上测试晶片的工艺质量。

本实验采用高频光电导衰减法来测量非平衡少子的寿命，它的优点是样品无须切割为一定的几何形状，对样品的几何尺寸要求不太严格，测量时不必制作欧姆电极，因此样品较少受到污染，测试方法也较为简单，缺点是仪器线路比较复杂，易受干扰。

实验目的：

1. 掌握用高频光电导衰减法测量 Si 单晶中少数载流子寿命的原理和方法；
2. 加深对少数载流子寿命及其与样品其它物理参数关系的理解。

一、实验原理

当能量大于半导体禁带宽度的光照射样品时，在样品中激发产生非平衡电子和空穴。若样品中没有明显的陷阱效应，那么非平衡电子 (Δn) 和空穴 (Δp) 的浓度相等，它们的寿命也就相同。样品电导率的增加与少子浓度的关系为

$$\Delta\sigma = q\mu_p\Delta p + q\mu_n\Delta n$$

q: 电子电荷； μ_p 和 μ_n 分别为空穴和电子的迁移率。当去掉光照，少子密度将按指数衰减，即

$$\Delta p \propto e^{-\frac{t}{\tau}}$$

τ : 少子寿命, 表示光照消失后, 非平衡少子在复合前平均存在的时间。

因此导致电导率

$$\Delta\sigma \propto e^{-\frac{t}{\tau}}$$

也按指数规律衰减。单晶寿命测试仪正是根据这一原理工作的。

下图是高频光电导测量装置示意图。

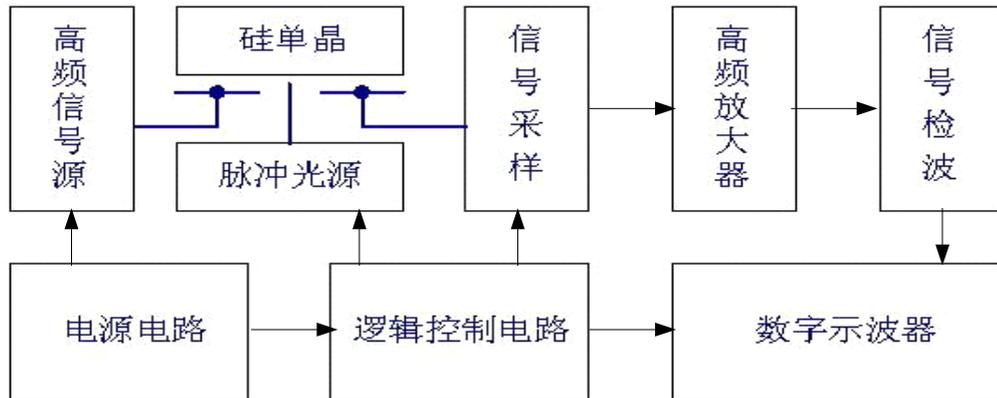


图1 高频光电导测量装置图

高频源提供的高频电流流经被测样品, 当红外光源的脉冲光照射样品时, 单晶体内产生的非平衡光生载流子使样品产生附加光电导, 从而导致样品电阻减小。由于高频源为恒压输出, 因此流经样品的高频电流幅值增加 ΔI , 光照消失后, ΔI 逐渐衰减, 其衰减速度取决于光生载流子在晶体内存在的平均时间, 即寿命。在小注入条件下, 当光照区复合为主要因素时, ΔI 将按指数规律衰减, 此时取样器上产生的电压变化 ΔV 也按同样的规律变化, 即

$$\Delta V = \Delta V_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

此调幅高频信号经检波器解调和高频滤波, 再经宽频放大器放大后输入到脉冲示波器, 在示波器上可显示下图的指数衰减曲线, 由曲线就可获得寿命值。

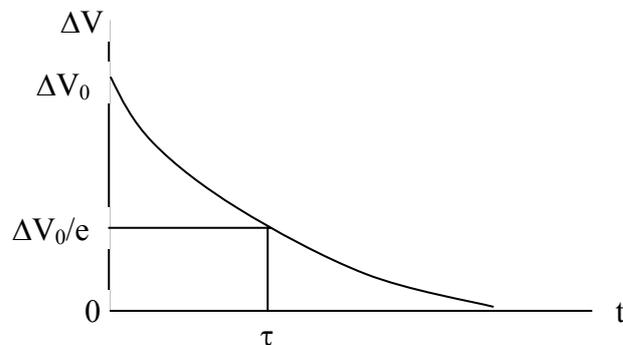


图2 指数衰减曲线

二、实验内容

1. 测量 3 个不同电阻率样品的非平衡少子寿命 τ 。
2. 每个样品测定 2—3 次，求出平均值，获得 Si 材料在光照下的 $\Delta V \sim t$ 曲线。
3. 对结果进行分析。

三、实验步骤

本实验使用 DSY-II 单晶少子寿命测试仪测量 Si 单晶的少子寿命，图 3 为仪器面板图。

仪器性能：采用光源类型：高亮度脉冲氙灯；闪光频率：25 次/秒，与工频电源同步；脉冲宽度：约 $80 \mu\text{s}$ 。配用示波器：频宽 0—25MHz，双通道数字存储示波器。

测试仪面板示意如下：

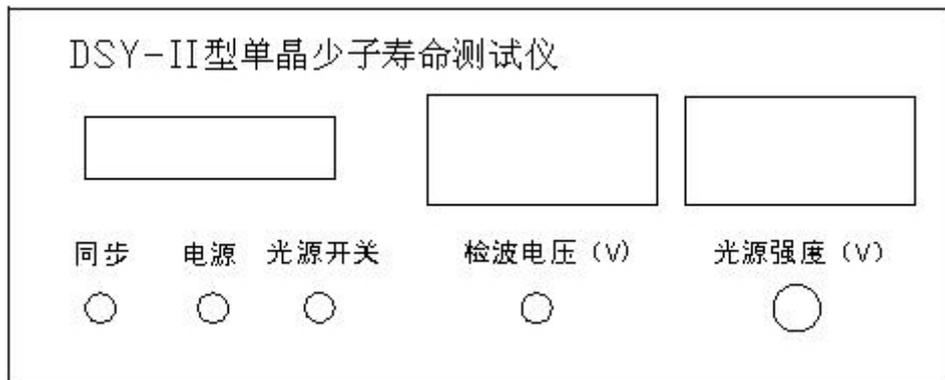


图 3 仪器面板

操作程序：

- 1、安装与放置：将仪器置于水平的试验桌上，将检波输出信号连接到示波器通道。
- 2、同步输出连接到示波器外同步输入。
- 3、高压开关置关闭状态。将试样涂一层水或甘油，平放到试验电极上。
- 4、先接通电源开关，再接通光源开关。
- 5、调节示波器，使之显示稳定的波形。
- 6、调节光源强度开关，使灯光达到合适的亮度。如果光电导信号衰减波形部分偏离指数曲线，调节参考如下：

(1)如波形初始部分衰减较快，则用波形较后部分测量，即去除表面复合引起的高次模部分读数（见示意图 4a）。

(2)如波形头部出现平顶现象，说明信号太强（见示意图 4b），应减弱光强，在小信号下进行测量。

(3)为保证测试正确性，满足小注入条件，即在可读数的前提下，示波器尽量使用大的倍

率，光源电压尽量地调小。

7、移动光标，直接读出时间值。

8、为保护闪光氙灯，测试完成后，应及时关闭光源开关。

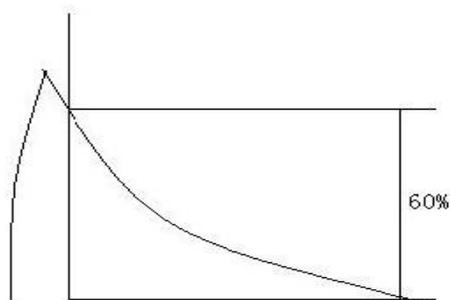


图 4a

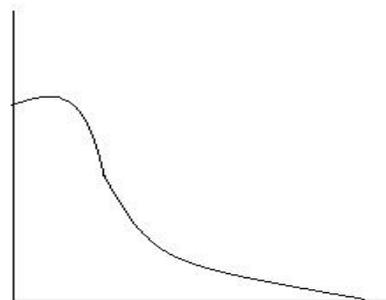


图 4b

寿命 τ 在示波器上的读取方法： 设示波器荧光屏上最大讯号为 n 格（一格为 1cm），在衰减曲线上获得纵坐标为 $\frac{n}{e} = \frac{n}{2.718} = 1.48$ 格对应的 x 值（横坐标 2.4 格）。若水平扫描时间为 t ，则寿命 $\tau = \text{横坐标（格数）} \times t$ 。

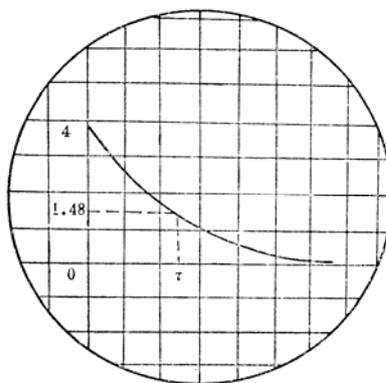


图 5 示波器荧光屏信号

四、实验数据处理和分析

将实验数据填写下表中：

样品编号	电阻率	光源强度	ΔV	$\Delta V / e$	τ
------	-----	------	------------	----------------	--------

五、思考题

1. 简述少子寿命概念。
2. 当样品含有重金属且存在缺陷时，它们对寿命有影响吗？
3. 什么是小注入的条件？

六、注意事项

认真预习本实验讲义，各仪器操作要严格按该仪器的操作步骤，以避免仪器的损坏。

附：使用标准曲线读取时间的操作使用技巧指导：

1. 扫描速度的选择

在示波器出现稳定的信号曲线后，调节 Y 轴增益及 X 轴位移，使信号曲线通过 (5.4, 0) 点，曲线的尾部接近 t 轴，（此时要调节 Y 轴位移）。如果所选扫描速度（波段开关）太低，出现图 6 的情况，太高则出现图 7 的情况。有些示波器，不管波段开关如何改变，一般都不能使信号曲线与屏幕上的标准曲线完全吻合，此时可打开扫描连续调节开关，（注意：此时扫描速度处于非校准状态），只要信号曲线中没有高次模的现象，一般均可将信号曲线调节到与标准曲线完全吻合，在此项证明信号曲线为纯指数的操作完成后，将扫描连续调节开关在返回校准位置，即可读取消寿命值。

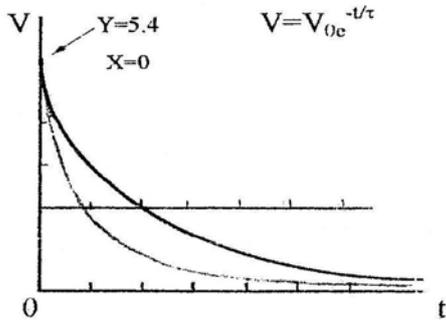


图 6 X 轴扫描速度偏低

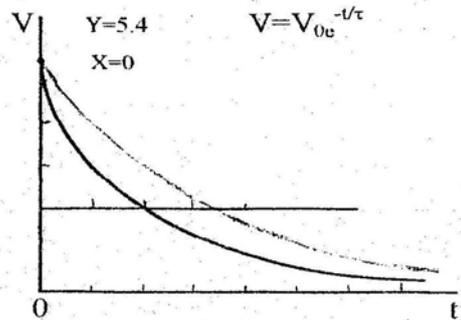


图 7 X 轴扫描速度偏高

2. 剔除高次模部分

由于光电导信号的衰退既取决于体内重金属复合中心的数量，也受表面复合中心的影响，特别对高阻、高寿命的样品，测量时表面复合的影响更为明显，这种影响表现在衰退曲线的初始部分的快衰退，如图 8 所示。出现这种情况后，可连续提升 Y 轴增益及 X 轴扫描速度并调节 X 轴位移，可将高次模剔出到标准曲线之外，而使信号中纯指数部分有与标准曲线相吻合，如图 9。

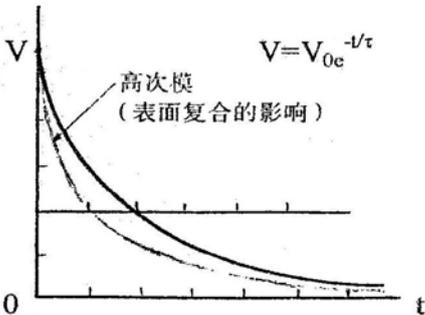


图 8 含高次模的信号曲线

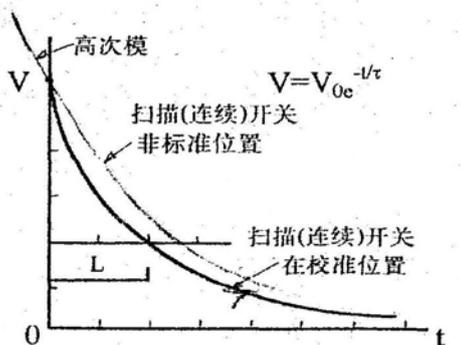


图 9 剔除高次模后的信号曲线吻合情况

此时再使扫描连续调节开关恢复校准位置（如此时信号与标准曲线之间相距甚大，则可调一档扫描速度波段开关），使信号曲线头部穿过（5.4，0）点，即可根据信号曲线与Y=2轴交点 t =0 轴的距离 L 计算出寿命值

$$t_f = LS$$

t f---试样寿命，S---基准时间扫描速度 u s /cm

这时读出的寿命值已排出了高次模（表面复合）的干扰，同时试样也处于较低注入水平，因此较为准确。

实验七 半导体材料层错、位错的显示

通常制造电子器件要求所采用的半导体材料是单晶体，就是说要求材料的原子排列严格按照一定的规律。但是由于种种原因，实际的单晶中往往存在某些缺陷，晶体中的缺陷直接关系到器件制造的质量和成品率，所以检查晶体缺陷也是半导体测量的一项重要内容。

硅单晶属金刚石结构，在实际的硅单晶中不可能整块晶体中原子完全按金刚石结构整齐排列，总有某些局部区域点阵排列的规律性被破坏，则这些区域就称为晶体缺陷。硅单晶中的缺陷主要有点缺陷、线缺陷、面缺陷和体缺陷等四类。

硅单晶中的各种缺陷对器件的性能有很大的影响，它会造成扩散结面不平整，使晶体管中出现管道，引起 p-n 结的反向漏电增大等。各种缺陷的产生和数量的多少与晶体制备工艺和器件工艺有关。晶体缺陷的实验观察方法有许多种，如透射电子显微镜、X 光貌相技术、红外显微镜及金相腐蚀显示等方法。对表面缺陷也可以用扫描电子显微镜来观察。由于金相腐蚀显示技术设备简单，操作易掌握，又较直观，是观察研究晶体缺陷的最常用的方法之一。金相腐蚀显示可以揭示缺陷的数量和分布情况，找出缺陷形成、增殖和晶体制备工艺及器件工艺的关系，为改进工艺，减少缺陷、提高器件合格率和改善器件性能提供线索。

本实验的目的是掌握金相显微镜的使用方法；熟悉半导体材料硅单晶片的位错、外延层错层的显示方法；掌握计算层错、位错密度以及外延层厚度的方法。

一、实验原理

在硅单晶中，有位错的地方其原子的排列失去规则性，结构比较松散，在这里的原子具有较高的能量，并受到较大的张力，因此在位错线和表面相交处很容易被腐蚀形成凹下的坑，即所谓腐蚀坑，我们正是利用这个特性来显示位错和层错的。

1. 层错的腐蚀

硅的晶体结构是金刚石结构，在(111)方向上它的排列次序是：AA'BB'CC'即三个双层密排面一个重复周期。假设外延衬底表面层的原子是按A原子层排列，那么按正常次序外延生长的第一层原子应为A'原子层。但由于表面沾污、伤痕或晶格缺陷、原子在该处沉积等原因，使得表面某一区域出现反常，不是按A'原子面排列，而是按B原子面排列，以此类推，形成了ABB'CC'AA'.....的排列。与区域外按正常原子层排列的原子层比较，缺少了一层A'原子，这就形成了层错排列。或是在正常排列过程中插入一层原子如AAA'BB'CC'AA'.....，都可形成层错排列。

在(111)面的生长过程中，原子是按正四面体的排列方式生长的，每个原子和具有不同原子分布的一层中最邻近的三个原子组成正四面体，于是层错区域就以正四面体的形式逐渐向外展开，如图1。因而层错区域在表面的边界一般呈正三角形，而且该界面属于(111)晶面。因而沿(111)方向，在外延层中形成以衬底表面上一点为顶点的由(111)晶面族围成的层

错区域，它是一个倒立的正四面体，如图2所示。

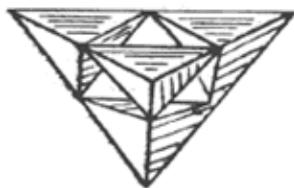


图1 (111)面上硅原子按正四面体排列式生长

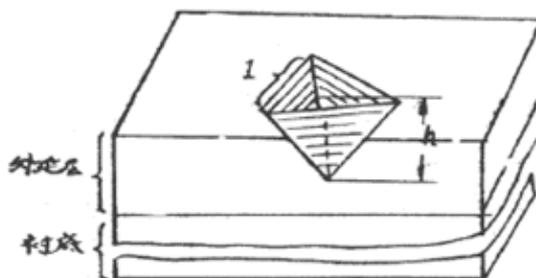


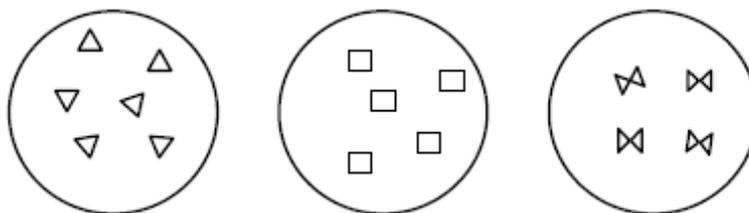
图2 外延层中层错区域示意图

将层错正四面体的内部分开来看，原子的排列都是有规律的，但彼此不一致，在过渡的地方原子的排列是错乱的，三组倾斜的(111)面是过渡界面，那里的原子排列是不正常的，外延层表面正三角形的三条边上，原子的排列当然是混乱的。用铬酸腐蚀液对外延硅片进行择优腐蚀，(111)面就可以出现正三角形的层错，由于大多数层错起源于衬底表面，因而它的大小与外延层厚度直接有关，起源于(111)衬底的外延层层错正四面体的高就是外延层的厚度。因此在显示出层错图形后，测量其中最大的三角形边长L，就可以求出外延层的厚度

$$W = h = \frac{\sqrt{6}}{3} L \quad (1)$$

应当指出：外延过程中也可能出现层错，所以在测量中应测量大的三角形边长才能得出正确结果。

总之，由于层错的错排面均为硅晶体的密排面(111)面，所以与(111)表面的交线组成正三角形，与(100)表面的交线组成正四边形，与(110)表面的交线组成两个对顶等腰三角形。由于层错的错排面与表面交线处晶格结构发生畸变，容易被腐蚀液腐蚀（即择优腐蚀）出现蚀坑。这些蚀坑在这里形成三角



形或正方形的槽沟。其两边均为完整晶格，不被腐蚀液择优腐蚀，因此这些三角形或正方形均为空心的。腐蚀时间的长短决定了三角形或正方形槽的宽窄（线的粗细）而不影响长度。顶角处畸变最严重，因此蚀坑最大。

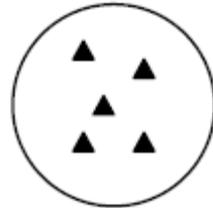
2. 位错的腐蚀

由于位错是一种线缺陷，晶格畸变是沿着一条线延伸下来的，贯穿于整个晶体，终止在表面或形成闭环，因此在表面的交点是一个点状小区域。在腐蚀液作用下择优腐蚀形成蚀坑，坑侧面为(111)面（密排面）。在(111)晶面为表面时，其蚀坑是一倒置正四面体（三角锥体），从表面看呈实心三角形。在(100)晶面为表面时，其蚀坑是一倒置四棱锥体，从表面看呈实心正方形。在(110)晶面为表面时，其蚀坑为两个对顶三角锥体，从表面看

呈两个对顶实心等腰三角形。其蚀坑大小随腐蚀时间增加而增大，蚀坑数量不变。

3. 层错、位错密度的测量

层错密度的测量方法与位错的相同。用金相显微镜选取硅片不同位置读出视场中层错（位错）数目，取平均值除以视场面积即得层错（位错）密度。则计算层错（位错）密度的公式为



$$N_D = n/s \quad (2)$$

单位：个数/cm²。式中 N_D 为层错（位错）密度， n 为被观测面上腐蚀坑的个数， s 为被观测面的面积。

二、实验内容

1. 腐蚀位错、层错；
2. 测量位错、层错的密度；
3. 计算样品外延层厚度，一般测量3次，求出其平均值。

三、实验步骤

1. 层错的腐蚀

用铬酸腐蚀液对外延硅片进行择优腐蚀。把片子放入配好的腐蚀液中约一分钟（指外延片），夹出片子，放入塑料缸内，连镊子一起用水冲洗十次以上，然后夹出放在滤纸上，吸去水滴，即可观测。

2. 观察腐蚀结果并计算层错密度

用金相显微镜选取硅片不同位置读出视场中层错数目，取平均值除以视场面积即得层错密度。视场面积可用标准分划板测出视场直径求出。

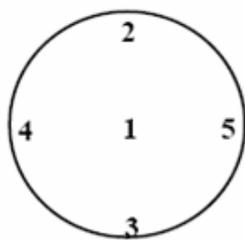


图 3 五点平均

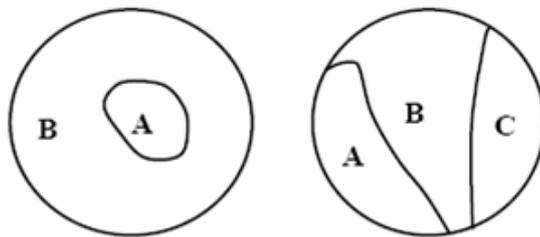


图 4 分区标图法

测定时应离样品边沿2mm以内进行，对于层错分布比较均匀的样品采用五点平均法（如图3所示）。对于层错分布很不均匀的样品，可采用分区标图法（如图4所示），每区各取三点求平均。

视场面积的测定：可用一标准分划板代替样品放在显微镜样品台上测出视场直径，从而可求出视场面积。利用公式（2）求出层错、位错密度。

3. 外延层厚度测量

取下目镜，换上测微目镜，读出层错与表面交界处的边长L，根据几何学原理推算出如下关系：

$$h_{(111)} = \frac{\sqrt{6}}{3}L \approx 0.816L, \quad h_{(100)} = \frac{\sqrt{2}}{2}L \approx 0.707L, \quad h_{(110)} = \frac{\sqrt{3}}{3}L \approx 0.577L$$

根据上述关系计算外延层厚度（层错的实际边长L应为：测微目镜读数除以物镜的放大倍数），应根据具体情况选择合适的物镜放大倍数M。

四、注意问题

1. 经过实际测算，当金相显微镜的物镜放大倍数为45倍，目镜放大倍数为10倍时，其视场面积是 $7.54 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 。

2. 观测视场内腐蚀坑数目时，如果发现（111）晶向的单晶片或外延片上出现三角形的一个边或两个边，这同样说明在该处存在一个与表面相交的位错线，都应该计算一个坑数。

3. 我们使用的MCU-15型测微目镜，其放大倍数是15倍。它的测微目镜的最小读数是 $10 \mu\text{m}$ ，其测量精度为0.01mm。

五、思考题

1. 位错、层错各是怎样形成的？它们对器件都有什么影响？
2. 采用金相腐蚀法显示和观测层错、位错，这种方法的原理是什么？有什么优缺点？
3. 试探讨减少层错、位错的方法和途径？

附录：各种腐蚀液的配方和用法

配制抛光液，腐蚀液，腐蚀单晶片及外延片：

抛光液配方：HF：HNO₃=1：3

腐蚀液配方：它的配方很多，举例如下：

(1) 铬酸腐蚀液：[适用于(111)面]

首先配好CrO₃标准液，即用50克CrO₃溶解于100CC的去离子水中，然后与HF配成下列各腐蚀液：

CrO₃标准液(50%)：HF(40%)=2：1，慢腐蚀速度

CrO₃标准液(50%)：HF(40%)=3：2，中腐蚀速度

CrO₃标准液(50%)：HF(40%)=1：1，快腐蚀速度

CrO₃标准液(50%)：HF(40%)=1：2，快腐蚀速度

常用第三种配比。

腐蚀条件：室温下(18℃-25℃)；显示层错15-30秒；显示位错6-30秒。

(2) HF(40%)：HNO₃(65%)：CH₃COOH(99%以上)=1：3：10{适用于(111)、(110)}，在室温下腐蚀五小时以上。

HF(40%)：HFO₃(65%)：CH₃COOH(99%以上)=1：25：10{适用于(100)}，在35℃左右腐蚀3-4小时。

本实验内容为用铬酸腐蚀液第三种配方对硅(111)面外延片腐蚀显示层错。

实验八 p-n 结的显示与结深的测量

在用平面工艺制造晶体管和集成电路时，一般用扩散法制作p-n结。由于扩散杂质与外延层杂质的类型不同，所以在外延层中某一个位置，其掺入杂质浓度与外延层杂质浓度相等，从而形成了p-n结。将p-n结材料表面到p-n结界面的距离称为p-n结结深，一般用 X_j 表示。由于基区宽度决定着晶体管的放大倍数 β 、特征频率 f_T 等电参数，而集电结结深 X_{jc} 和发射结结深 X_{je} 之差就是基区宽度，因此必须了解并掌握测量结深的原理和方法。

测量结深的方法有磨角法、滚槽法，也可以采用阳极氧化剥层法直接计算得出。本实验采用磨角法。

本实验的目的是学会用磨角器磨角法制作p-n结样片，采用电解水氧化法显示p-n结；并利用金相显微镜观测结深。

一、实验原理

在测量结深时，首先要对p-n结表面进行染色显示，以明确p区和n区的界面位置。本实验采用电解水氧化法显示p-n结。该方法简单方便、容易掌握、实验效果好，最大的优点是对同一样片可反复氧化显示，直至清晰满意。

在此，首先介绍电解水氧化法显示p-n结的原理，然后再介绍用磨角法测量结深的一般过程。

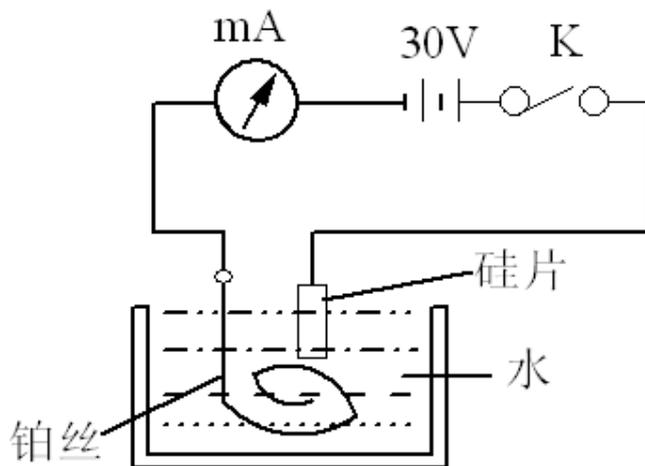


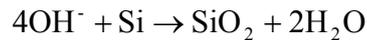
图 1 电解水氧化显示p-n结实验装置

1. 电解水氧化法显示p-n结的原理

电解水氧化法显示p-n结的实验装置如图 1 所示。把经过磨角暴露p-n结的硅片接在电解水电路的阳极上，并将需要显结的那一部分硅片浸于水中，在水溶液中，由于水分子电离生成一定浓度的 H^+ 离子和 OH^- 离子



当电路接通时，在阳极硅片上放电的同时生成了二氧化硅，其反应方程为



这是一个电化学反应过程—阳极氧化，随着电解电压的增高，水分子激烈地被电离，在阳极表面不断有氧气生成。经电解水氧化后，阳极硅片上的n区和p区分别生长了厚度不同的SiO₂薄膜，由于SiO₂薄膜厚度不同，所以呈现出的颜色也不同，因此在显微镜下就能清楚地看到n区、p区及其分界面p-n结的位置。

为什么电解水氧化后各区域生长的SiO₂薄膜厚度不等呢？

以硅npn平面管管芯为例，在阳极硅片上，n型发射区和p型基区尽管小到只有微米的数量级，但是各区域的电导率是不相等的，发射区的平均电导率为 $\sigma_0 = 1/R_0 X_{j0}$ ，基区的平均电导率为 $\sigma_b = 1/R_b X_{jb}$ ，因为 $R_0 \ll R_b$ ， $X_{je} \ll X_{j0}$ ，所以 $\sigma_0 \gg \sigma_b$ ，因此在电解时，流过发射区和基区的电流密度各不相同，其结果在发射区和基区表面氧化生成的SiO₂薄膜厚度就不相同，这样两个区域就染上了不同的颜色。电解水氧化法就是利用这一原理实现了对p-n结的染色显示。

实际上，对同型的硅材料只要掺杂不均匀，电解时流过各处的电流密度也就不相同，生长的SiO₂薄膜厚度也不相同，所以也能区别开来。

本实验使用的电解液是自来水。由于自来水中存在着各种负离子，这些负离子能提供电解电流，对氧化显结反应起着催化作用。在寒冷的冬天，为了加强这种催化作用，可在自来水中加入极少量的NaOH，这时在电解电压下，可得到满意的电解电流。

2. 磨角法测量p-n 结结深

如果p-n 结深度较大（例如大功率器件中的结），可直接掰开硅片，进行显结后在显微镜下测量结深，但是对较浅的p-n结，X_j通常多在微米数量级，直接掰开硅片进行测量是不可能的，因为这时测量面太小，必须加以放大，本实验采用磨角法。

为了使结深测量面比较准确，应把硅片固定在特制的磨角器上，利用磨角器磨出如图 2 所示斜面，使测量面得到了放大。磨角器的斜角 θ 一般在1° ~ 5° 之间，经磨角和显结后，用测微目镜测得b和c，得到(c-b)，根据下面公式即可求得结深X_j

$$x_j = a \cdot \text{tg}\theta = (c - b) \cdot \text{tg}\theta$$

值得注意的是p-n 结显示的清晰度和结深测量的精度与磨角的工艺水平密切相关，因此磨好的斜面应平整光洁，斜面与表面的交线平直清晰。在磨角过程中，只要做到细致认真，上述要求是不难达到的。

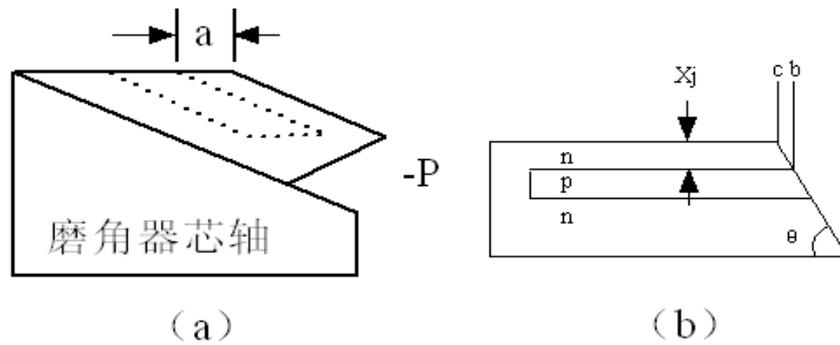


图 2 磨出的斜面示意图

二、实验内容

1. 用磨角器磨角法制作p-n 结样片；
2. 采用电解水氧化法显示p-n 结；
3. 用金相显微镜观测样品的相关数据并计算出结深，重复测量3 次，求出结深的平均值。

三、实验方法和步骤

1. 对单扩散和双扩散的二个试片进行磨角

(1) 用酒精灯把磨角器芯轴烤热，然后用石蜡松香（已配好）作为粘合剂，把试片粘在磨角器芯轴上，试片的位置一定要粘正确才能使磨出的斜面与表面的交线平直。在粘合剂未固化时，用镊子压压试片，把多余的粘合剂压出来，使试片紧粘在磨角器上，以保证 θ 角准确。

(2) 在干净的平板细毛玻璃上放少许自来水及少量的氧化镁粉，把磨角心轴放在磨角器套筒中，手握磨角器套筒，在毛玻璃板上作旋转运动。由于试片受到磨角器芯轴重量的压力，大约经过5—10 分钟，就能磨出一个斜面。再用清水在玻璃板上细磨3—5 分钟，发现有碎落在玻璃板上的硅渣应立即冲洗干净。

2. 电解水氧化显结

实验装置如图 1 所示。阴极用铂丝，电解液用自来水。

- (1) 磨出斜面后，取下硅样品，用酒精棉球将石蜡擦净。然后用鳄鱼夹夹住试片未磨角的一端，接在电源的阳极上。
- (2) 把电源电压调到30V，然后手握鳄鱼夹，让需要显结的部分试片浸于水中，这时电路接通，电解电流在几mA 左右。大约经过20 秒，取下硅片，放在显微镜下观察，如果颜色太浅，可继续再电解几秒钟；如果氧化层太厚，已模糊不清，可把硅片放在HF 缓冲溶液中（已配好）略漂洗一下，去掉氧化层，重新再电解，直至清晰为止。

3. 测量

显结后的硅片可直接放在显微镜下对放大的斜面进行测量，然后利用公式进行计算，求出结深 X_j 和基区宽度 W 。

四、思考题

1. 石蜡在实验中主要起粘合剂的作用，但也有极大的负面效应，请你写出哪些具体过程

发生何种情况时需要清除石蜡，为什么？

2. 氧化是利用有结与无结的区域导电能力不同，请写出你对氧化时间超出20s 的理解？

3. 贴样片时，要求将有光泽的一面向上，为什么？

五、注意事项

1. 磨角前，先用酒精棉球把磨角器外边及固定托的内侧彻底擦干净不能留蜡痕，以便使磨角器能自由转动。

2. 往磨角器上粘硅片时，磨角器要多烧一会使其内部与外部温度相近。蜡要少一些，这样既容易清洁样片也容易粘牢。

3. 从磨角器上取下硅样片后，一定要用酒精棉球擦拭干净，并尽可能多擦几遍。

4. 氧化时用鳄鱼夹夹好硅片未磨的一端，将磨好角的一端插入水中，要保证夹头不碰水。

附录：各磨角器的角度标值

号码	对应角度	tg θ 值	号码	对应角度	tg θ 值
1#	$\theta = 3^{\circ} 31'$	tg $\theta = 0.061$	5#	$\theta = 2^{\circ} 35'$	tg $\theta = 0.0454$
3#	$\theta = 2^{\circ} 46'$	tg $\theta = 0.0483$	6#	$\theta = 2^{\circ} 41'$	tg $\theta = 0.047$
4#	$\theta = 2^{\circ} 24'$	tg $\theta = 0.0419$	10#	$\theta = 2^{\circ} 54'$	tg $\theta = 0.0596$

实验九 用椭偏仪测量薄膜厚度

二氧化硅（SiO₂）介质膜是硅集成电路平面制造工艺中不可缺少的重要材料。根据不同的需要，人们利用各种方法制备二氧化硅，用来作为器件的保护层和钝化层，以及电性能的隔离、绝缘材料和电容器的介质膜等。其更重要的应用之一，就是作为选择性扩散的掩蔽膜。无论SiO₂膜用作哪一种用途，都必须准确的测定和控制它的厚度。另外，折射率是表征SiO₂薄膜光学性质的一个重要参数，因此我们必须掌握SiO₂膜厚及其折射率的测量方法。

通常测定薄膜厚度的方法有比色法、干涉法、椭偏法等。比色法可以方便地估计出氧化硅膜的厚度，但误差较大。干涉法具有设备简单、测量方便的特点，结果也比较准确。椭偏法测量膜厚是非破坏性测量，具有测量精度高，方法较灵敏的独特优点，因此已广泛应用在光学、半导体、生物、医学等方面。

实验目的：

- 了解用椭圆偏振法测量薄膜参数的基本原理和方法；
- 掌握SGC-2型自动椭圆偏振测厚仪的使用方法；
- 用椭偏仪测量Si衬底上的SiO₂薄膜的折射率和厚度。

一、实验原理

使一束自然光经起偏器变成线偏振光。再经 1/4 波片，使它变成椭圆偏振光入射在待测的膜面上。反射时，光的偏振状态将发生变化。通过检测这种变化，便可以推算出待测膜面的某些光学参数。

1、椭偏方程与薄膜折射率和厚度的测量

图 1 所示为一光学均匀和各向同性的单层介质膜。它有两个平行的界面。通常，上部是折射率为 n_1 的空气（或真空）。中间是一层厚度为 d 折射率为 n_2 的介质薄膜，均匀地附在折射率为 n_3 的衬底上。当一束光射到膜面上时，在界面 1 和界面 2 上形成多次反射和折射，并且各反射光和折射光分别产生多光束干涉。其干涉结果反映了膜的光学特性。

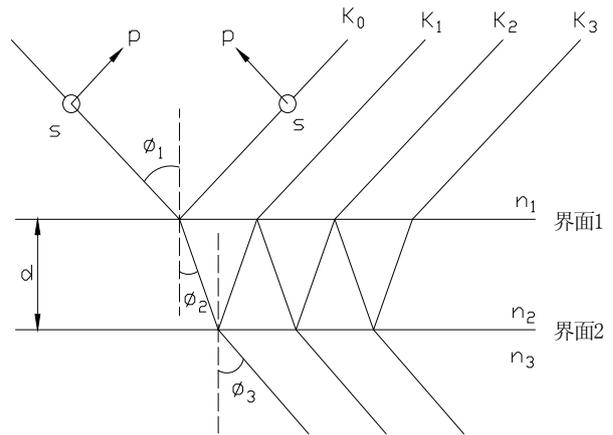


图 1 光学均匀和各向同性的单层介质膜示意图

设 ϕ_1 表示光的入射角， ϕ_2 和 ϕ_3 分别为在界面 1 和 2 上的折射角。根据折射定律有

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 = n_3 \sin \phi_3 \quad (1)$$

光波的电矢量可以分解成在入射面内振动的 p 分量和垂直于入射面振动的 s 分量。若用 E_{ip} 和 E_{is} 分别代表入射光的 p 和 s 分量，用 E_{rp} 及 E_{rs} 分别代表各束反射光 K_0, K_1, K_2, \dots 中

电矢量的 p 分量之和及 s 分量之和，则膜对两个分量的总反射系数 R_p 和 R_s 定义为

$$R_p = E_{rp} / E_{ip} \quad \text{和} \quad R_s = E_{rs} / E_{is} \quad (2)$$

经计算可得

$$E_{rp} = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i2\delta}} E_{ip} \quad \text{和} \quad E_{rs} = \frac{r_{1s} + r_{2s} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i2\delta}} E_{is} \quad (3)$$

式中 r_{1p} 或 r_{1s} 和 r_{2p} 或 r_{2s} 分别为 p 或 s 分量在界面 1 和界面 2 上一次反射的反射系数。 2δ 为任意相邻两束反射光之间的位相差。

根据电磁场的麦克斯韦方程和边界条件可以证明

$$\left. \begin{aligned} r_{1p} &= \tan(\phi_1 - \phi_2) / \tan(\phi_1 + \phi_2), r_{1s} = -\sin(\phi_1 - \phi_2) / \sin(\phi_1 + \phi_2) \\ r_{2p} &= \tan(\phi_2 - \phi_3) / \tan(\phi_2 + \phi_3), r_{2s} = -\sin(\phi_2 - \phi_3) / \sin(\phi_2 + \phi_3) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式 (4) 即有名的菲涅尔反射系数公式。由相邻两反射光束间的程差，不难算出

$$2\delta = \frac{4\pi d}{\lambda} n_2 \cos \phi_2 = \frac{4\pi d}{\lambda} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \phi_1} \quad (5)$$

式中 λ 为真空中的波长， d 和 n_2 为介质膜的厚度和折射率，各 ϕ 角的意义同前。

在椭圆偏振法测量中，为了简便，通常引入另外两个物理量 φ 和 Δ 来描述反射光偏振态的变化。它们与总反射系数的关系定义如下：

$$\tan \varphi \cdot e^{i\Delta} = R_p / R_s \quad (6a)$$

$$= \frac{(r_{1p} + r_{2p} e^{-i2\delta})(1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i2\delta})}{(1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i2\delta})(r_{1s} + r_{2s} e^{-i2\delta})} \quad (6b)$$

式 (6) 简称为椭偏方程。

由 (1), (4), (5) 和 (6) 式已经可以看出，参数 φ 和 Δ 是 $n_1, n_2, n_3, \phi_1, \lambda$ 和 d 的函数。其中 n_1, n_3, λ 和 ϕ_1 可以是已知量，如果能从实验中测出 φ 和 Δ 的值，原则上就可以算出薄膜的折射率 n_2 和厚度 d 。这就是椭圆偏振法测量的基本原理。

实际上，究竟 φ 和 Δ 的具体物理意义是什么，如何测出它们，以及测出后又如何得到 n_2 和 d ，均须作进一步的讨论。

2、 φ 和 Δ 的物理意义

现用复数形式表示入射光的 p 和 s 分量

$$\left. \begin{aligned} E_{ip} &= |E_{ip}| \exp(i\theta_{ip}), E_{is} = |E_{is}| \exp(i\theta_{is}) \\ E_{rp} &= |E_{rp}| \exp(i\theta_{rp}), E_{rs} = |E_{rs}| \exp(i\theta_{rs}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(7) 式中各绝对值为相应电矢量的振幅，各 θ 值为相应界面处的相位。

由 (6a), (2) 和 (7) 式可以得到

$$\tan \varphi \cdot e^{i\Delta} = \frac{|E_{rp}| |E_{is}|}{|E_{rs}| |E_{ip}|} \exp\{i[(\theta_{rp} - \theta_{rs}) - (\theta_{ip} - \theta_{is})]\} \quad (8)$$

比较等式两端即可得

$$\tan \varphi = |E_{rp}| |E_{is}| / |E_{rs}| |E_{ip}| \quad (9)$$

$$\Delta = (\theta_{rp} - \theta_{rs}) - (\theta_{ip} - \theta_{is}) \quad (10)$$

(9) 式表明，参量与反射前后 p 和 s 分量的振幅比有关。而 (10) 式表明，参量 Δ 与反射前后 p 和 s 分量的位相差有关。可见， φ 和 Δ 直接反映了光在反射前后偏振态的变化。

一般规定， φ 和 Δ 的变化范围分别为 $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ 和 $0 \leq \Delta \leq 2\pi$ 。

当入射光为椭圆偏振光时，反射后一般为偏振态（指椭圆的形状和方位）发生了变化的椭圆偏振光（除开 $\varphi = \pi/4$ 且 $\Delta = 0$ 的情况）。为了能直接测得 φ 和 Δ ，须将实验条件作某些限制以使问题简化。也就是要求入射光和反射光满足以下两个条件：

(1) 要求入射在膜面上的光为等幅椭圆偏振光（即 p 和 s 二分量的振幅相等）。这时， $|E_{ip}| / |E_{is}| = 1$ ，公式 (9) 则简化为

$$\tan \varphi = |E_{rp}| / |E_{rs}| \quad (11)$$

(2) 要求反射光为一线偏振光。也就是要求 $(\theta_{rp} - \theta_{rs}) = 0$ （或 π ），公式 (10) 则简化为

$$\Delta = -(\theta_{ip} - \theta_{is}) \quad (12)$$

满足后一条件并不困难。因为对某一特定的膜，总反射系数比 R_p/R_s 是一定值。公式 (6a) 决定了 Δ 也是某一定值。根据 (10) 式可知，只要改变入射二分量的位相差 $(\theta_{ip} - \theta_{is})$ ，直到大小为一适当值（具体方法见后面的叙述），就可以使 $(\theta_{rp} - \theta_{rs}) = 0$ （或 π ），从而使反射光变成一线偏振光。利用一检偏器可以检验此条件是否已满足。

以上两条件都得到满足时，公式 (11) 表明， \tan 恰好是反射光的 p 和 s 分量的幅值比， φ 是反射光线偏振方向与 s 方向间的夹角，如图 2 所示。公式 (12) 则表明， Δ 恰好是在膜面上的入射光中 s 和 p 分量之间的相位差。

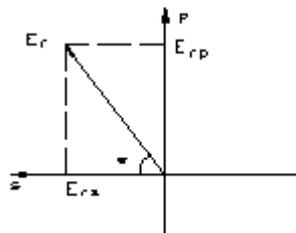


图 2 反射光线偏振方向与 s 方向间的夹角

2、 φ 和 Δ 的测量

实现椭圆偏振法测量的仪器称为椭圆偏振仪（简称椭偏仪）。它的光路原理如图 3 所示。由氦氖激光管发出的波长为 632.8nm 的自然光，先后通过起偏器 Q，1/4 波片 C 入射在待测薄膜 F 上，反射光通过检偏器 R 射入光电接收器 T。如前所述，p 和 s 分别代表平行和垂直于入射面的两个方向。

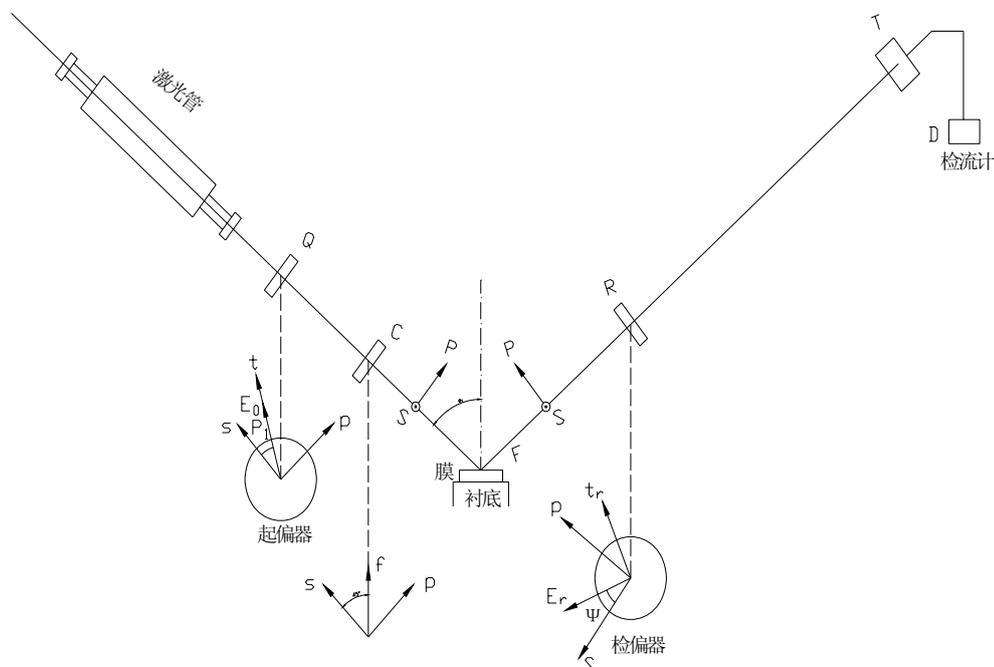


图 3 椭偏仪光路图，从 Q，C 和 R 用虚线引下的三个插图都是迎光线看去的

T 代表 Q 的偏振方向，f 代表 C 的快轴方向， t_r 代表 R 偏振方向。无论起偏器的方位如何，经过它获得的线偏振光再经过 1/4 波片后一般成为椭圆偏振光。为了在膜面上获得 p 和 s 二分量等幅的椭圆偏振光，只须转动 1/4 波片，使其快轴方向 f 与 s 方向的夹角 $\alpha = \pm\pi/4$ 即可（参看后面）。为了进一步使反射光变成为一线偏振光 E_r ，可转动起偏器，使它的偏振方向 t 与 s 方向间的夹角 P_1 为某些特定值。这时，如果转动检偏器 R，使它的偏振方向 t_r 与 E_r 垂直，则仪器处于消光状态，光电接收器 T 接收到的光强最小，检流计的示值也最小。本实验中所使用的椭偏仪，可以直接测出消光状态下的起偏角 P_1 和检偏方位角 ψ 。从公式 (12) 可见，要求出 Δ ，还必须求出 P_1 与 $(\theta_{ip} - \theta_{is})$ 的关系。

下面就上述的等幅椭圆偏振光的获得及 P_1 与 Δ 的关系作进一步的说明。如图所示，设已将 1/4 波片置于其快轴方向 f 与 s 方向间夹角为 $\pi/4$ 的方位。 E_0 为通过起偏器后的电矢量， P_1 为 E_0 与 s 方向间的夹角（以下简称起偏角）。令 γ 表示椭圆的开口角（即两对角线间的夹角）。由晶体光学可知，通过 1/4 波片后， E_0 沿快轴的分量 E_f 与沿慢轴的分量 E_s 比较，位相上超前 $\pi/2$ 。用数学式可以表达成

$$E_f = E_0 \cos\left(\frac{\pi}{4} - P_1\right) e^{i\frac{\pi}{2}} = iE_0 \cos\left(\frac{\pi}{4} - P_1\right) \quad (13)$$

$$E_l = E_0 \sin\left(\frac{\pi}{4} - P_1\right) \quad (14)$$

从它们在 p 和 s 两个方向上的投影可得到沿 p 和 s 的电矢量分别为

$$E_{ip} = E_f \cos \frac{\pi}{4} - E_l \cos \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 e^{i\left(\frac{3}{4}\pi - P_1\right)} \quad (15)$$

$$E_{is} = E_f \sin \frac{\pi}{4} + E_l \sin \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 e^{i\left(\frac{\pi}{4} + P_1\right)} \quad (16)$$

由 (15) 和 (16) 式看出, 当 1/4 波片放置在 $+\pi/4$ 角位置时, 的确在 p 和 s 二方向上得到了幅值均为 $(1/2)^{1/2} E_0$ 的椭圆偏振入射光。p 和 s 的位差为

$$\theta_{ip} - \theta_{is} = \frac{\pi}{2} - 2P_1 \quad (17)$$

另一方面, 从图 27-4 上的几何关系可以得出, 开口角 γ 与起偏角 P_1 的关系为 $\gamma/2 = \pi/4 - P_1$ 。于是

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2P_1 \quad (18)$$

$$\text{则 (17) 式变为 } \theta_{ip} - \theta_{is} = \gamma \quad (19)$$

$$\text{由 (12) 式可得 } \Delta = -(\theta_{ip} - \theta_{is}) = -\gamma \quad (20)$$

至于检偏方位角 ψ , 可以在消光状态下直接读出。

在测量中, 为了提高测量的准确性, 常常不是只测一次消光状态所对应的 P_1 和 ψ_1 值, 而是将四种 (或二种) 消光位置所对应的四组 (P_1, φ_1) , (P_2, φ_2) , (P_3, φ_3) 和 (P_4, φ_4) 值测出, 经处理后再算出 Δ 和 φ 值。其中, (P_1, φ_1) 和 (P_2, φ_2) 所对应的是 1/4 波片快轴相对于 s 方向置 $+\pi/4$ 时的两个消光位置 (反射后 p 和 s 光的位相差为 0 或为 π 时均能合成线偏振光)。而 (P_3, φ_3) 和 (P_4, φ_4) 对应的是 1/4 波片快轴相对于 s 方向置 $-\pi/4$ 时的两个消光位置。另外, 还可以证明下列关系成立: $|P_1 - P_2| = 90^\circ$, $\varphi_2 = -\varphi_1$; $|P_3 - P_4| = 90^\circ$, $\varphi_4 = -\varphi_3$ 求 ψ 和 Δ 的方法如下所述。

(1) 计算 Δ 值: 将 P_1, P_2, P_3 和 P_4 中大于 90° 的减去 90° , 不大于 90° 的保持原值, 并分别记为 $\{P_1\}, \{P_2\}, \{P_3\}$ 和 $\{P_4\}$, 然后分别求平均。计算中, 令

$$P_1' = \frac{\{P_1\} + \{P_2\}}{2} \quad \text{和} \quad P_3' = \frac{\{P_3\} + \{P_4\}}{2} \quad (21)$$

而椭圆开口角 γ 与 P_1' 和 P_3' 的关系为

$$\gamma = |P_1' - P_3'| \quad (22)$$

由公式 (22) 算得 γ 后, 再按 27-1 求得 Δ 值。利用类似于图 27-4 的作图方法, 分别画出起偏角在表 27-1 所指范围内的椭圆光图, 由图上的几何关系求出与公式 (18) 类似的 γ 与 P_1 关系式, 再利用公式 (20) 就可以得出表 27-1 中全部 Δ 与 γ 的对应关系。

(2) 计算 ψ 值：应按公式 (23) 进行计算

$$\varphi = \frac{(|\varphi_1| + |\varphi_2| + |\varphi_3| + |\varphi_4|)}{4} \quad (23)$$

四、折射率 n_2 和膜厚的计算

尽管在原则上由 ψ 和 Δ 能算出 n_2 和 d ，但实际上要直接解出 (n_2, d) 和 (Δ, ψ) 的函数关系式是很困难的。一般在 n_1 和 n_2 均为实数（即为透明介质的），并且已知衬底折射率 n_3 （可以为复数）的情况下，将 (n_2, d) 和 (Δ, ψ) 的关系制成数值表或列线图而求得 n_2 和 d 值。编制数值表的工作通常按下述方法来完成。制作的方法是，先测量（或已知）衬底的折射率 n_3 ，取定一个入射角 φ_1 ，设一个 n_2 的初始值，令 δ 从 0 变到 180° （变化步长可取 $1^\circ, 2^\circ, \dots$ 等），利用公式 (4), (5), (6)，便可分别算出 d, Δ 和 ψ 的值。然后将 n_2 增加一个小量进行类似计算。如此继续下去便可得到 $(n_2, d) \sim (\Delta, \psi)$ 的数值表。为了使用方便，常将数值表绘制成列线图。用这种查表（或查图）求 n_2 和 d 的方法，虽然比较简单方便，但误差较大，故目前日益广泛地采用计算机直接处理数据。

另外，求厚度 d 时还需要说明一点：当 n_1 和 n_2 为实数时，式 (5) 中的 φ_2 为实数，两相邻反射光线间的位相差 2δ 亦为实数，其周期为 2π 。 2δ 可能随着 d 的变化而处于不同的周期中。若令 $2\delta=2\pi$ 时对应的膜层厚度为第一个周期厚度 d_0 ，由 (5) 式可以得到

$$d_0 = \frac{\lambda}{2\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi_1}} \quad (24)$$

由数值表，列线图或算出的 d 值均是第一周期内的数值。若膜厚大于 d_0 ，可用其它方法（如干涉法）确定所在的周期数 j ，则总膜厚是

$$D = (j-1)d_0 + d$$

二、实验内容

1. 用椭偏仪测量 Si 衬底上的 SiO₂ 薄膜的折射率和厚度；（选两个样品进行测试）
2. 重复测量 3 次，求折射率和膜厚的平均值。

三、实验步骤

关于椭偏仪的具体结构和使用方法，请参看附录。另，实验仪器的测量光源为氦氖激光器，其波长为 632.8nm，所有测量均是从空气介质入射到膜面。

- 1、检查仪器用电源、主机与计算机的 USB 线是否连接好。
- 2、打开主机电源开关，pc 机电源，再将光源侧及接收侧的游标零点各对准大刻度盘的 90° 位置，在 pc 机进入自动椭偏仪软件操作窗口后，点击“控制”菜单下的“校正”，打开校正窗口，点击窗口中的“放置 1/4 波片”按键，继续点击“检测 1/4 波片”仪器会自动校正光路中元件的相对角度位置，显示消光点：起偏-135 度；检偏-45 度。校正后退出此窗口，此步骤完成之后对任意样品测量时光路及样品台都无需再调整。（只需校正一次）
- 3、仪器校正做完后，将光源侧和接收侧的游标零点各对准大刻度盘的 70° 位置，在样品台

上放置样品，开始测量。

4、软件初始化完成后，会进入工作界面，自动开始复位。

“光源”框中“名称”下拉菜单中可选“氦氖激光器”和“其它光源”，选中“氦氖激光器”后波长栏中会自动填入 632.8nm，如选中其它光源，则要在“波长”项中填入所用光源的波长；

“衬底”框中“名称”下拉菜单中可选“Si 衬底”和“玻璃衬底”同时下方的“衬底折射率”和“衬底消光系数”会自动填入相应值。

5、该软件有三种不同的测量方式（快速、做图、查表）。对每种样品要求用不同的测量方式进行测试。

（1）当选择“快速”时，在菜单栏中，选“设置”--“快速”--“确定”--“开始”。等几分钟后，结果会自动显示。“快速测量”功能：点击此键仪器即开始测量角度，测量结束后给出如下图窗口。在此窗口中点击“快速”在“结果”区中会给出如图中的三项参数，点击“关闭”可以关闭此窗口，结束此次测量；

（2）当选择“做图”时，在菜单栏中，选“设置”--“做图”--“确定”--“开始绘图”。绘图有两种模式：等折射率模式、等膜厚，用“切换模式”来选择。“绘图”功能：以膜厚的上、下限或折射率的上、下限为边界，以相应的精度为间隔，逐一画出膜厚曲线或折射率曲线，每点击一次画出一条曲线，等膜厚曲线以蓝色线显示，等折射率曲线以黄色线显示；

（3）当选择“查表”时，在菜单栏中，选“设置”--“查表”--“确定”后，直接点击工具栏“建表”，可实现建表。“建表”功能：对应窗口中参数设置好测量结果也会自动输入，点击“建表”在右侧窗口中会给出由此测量值得出的样品厚度及折射率，右侧上方的“上翻”、“下翻”可对在范围内的表格逐一查看，点击关闭可退出此次测量。

6、记录测试数据。重复三遍。

四、实验数据处理及分析

把测得的数值填入相应数据表内，对结果进行误差分析。

五、注意和说明

1. 对于光源采用波长 $\lambda=632.8\text{nm}$ 的氦氖激光光源， SiO_2 膜的一个周期约为 2700 \AA 。如果被测的 SiO_2 膜厚超过一个周期，由数据处理 8 查表得到的厚度 d_0 值只是 SiO_2 膜厚的零头，被测 SiO_2 膜真正的厚度应该是其周期数 N 和周期值(2700\AA)之乘积再加上 d_0 ，即 $d = n \times 2700\text{\AA} + d_0$ ，被测 SiO_2 膜的周期可以用干涉显微镜确定。

2. 测量时， P_1 一般取正值。

六、思考题

1. 试叙述用椭偏法测量薄膜厚度的原理。
2. 简述起偏器、检偏器、 $1/4$ 波片的作用。

实验十 晶体管特征频率的测量

晶体管频率特性表现为其交流电流增益随晶体管工作频率的提高而下降。晶体管特征频率的测量定义为共射极输出交流短路电流增益下降到 $|\beta|=1$ 时的工作频率。它反映了晶体管在共发射运用中具有电流放大作用的极限频率,也是晶体管最重要的频率参数之一。晶体管特征频率与晶体管的结构设计和物理参数有关,还与晶体管工作时的电流大小密切相关。因此,晶体管的特征频率 f_T 是指在一定偏置条件下的测量值。其测试原理通常采用“增益一带宽”积的方法。

本实验的目的是掌握晶体管特征频率 f_T 的测试原理及测量方法,熟悉 f_T 分别随 I_E 和 V_{CE} 变化的规律,加深其与晶体管结构设计和物理参数各工作偏置条件的理解。为晶体管的频率特性设计,制造和应用奠定基础。

一、实验原理

1、晶体管频率特性:

共发射交流工作情况下,晶体管发射结电压周期性变化引起发射结、集电结空间电荷区的电荷和基区、发射区、集电区的少子、多子也随之不断重新分布,这种现象可视为势垒电容和扩散电容的充放电作用。势垒电容和扩散电容的充放电作用使由发射区通过基区传输的载流子减少,传输的电流幅度值下降,同时产生载流子传输的延时,加之载流子渡越集电结空间电荷区时间的影响,使输入、输出信号产生相移,电流放大系数 β 变为复数,并且其幅值随频率的升高而下降,相位移也随频率的升高而增大。因此,晶体管共发射极交流短路放大系数 β 的幅值和相位移是工作频率的函数。

理论上,晶体管共发射交流短路电流放大系数可表示为:

$$\beta = \frac{\beta_0 e^{-j\omega/\omega_b}}{1 + j\omega/\omega_\beta} \quad (1)$$

其幅值和相位角随频率变化的关系分别为:

$$|\beta| = \frac{\beta_0}{[1 + (f/f_\beta)^2]^{1/2}} \quad (2)$$

$$\psi = - \left[\arctg\left(\frac{\omega}{\omega_\beta}\right) + \frac{m\omega}{\omega_b} \right] \quad (3)$$

可见，当工作频率 $f \ll f_\beta$ 时， $\beta \approx \beta_0$ ，几乎与频率无关；

当 $f = f_\beta$ 时， $|\beta| = \frac{1}{\sqrt{2}} \beta_0$ ，即增益 β 下降了 3dB。 f_β 也定义为晶体管的截止频率，亦称

-3dB 频率。它不能完全反映晶体管使用频率的上限。为了表示共发射极运用中晶体管的频率限制，引入特征频率 f_T ， f_T 定义为共发射极电流增益下降为 1 (0dB) 时的工作频率。

当 $f \gg f_\beta$ 时， $|\beta|f = \beta_0 f_\beta$

$$|\beta|=1 \text{ 时, } f_T = \beta_0 f_\beta \quad (4)$$

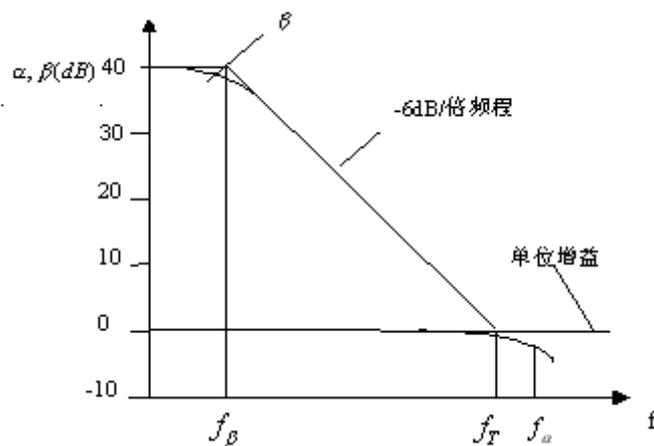


图 1 电流放大系数与频率的关系

从图 1 (表示了随频率变化的关系，对数坐标上就是 $\beta \sim f$ 的(-6dB)/倍频程关系曲线) 可知，在发射极运用中，当工作频率满足 $f \gg f_\beta$ 时，共发射极交流短路电流放大系数 β 随频率的升高以-6dB/倍频程速率下降，近似有以下关系

$$|\beta|f = \beta_0 f_\beta = C$$

显然，由 f_T 的定义可知， $f\beta = f_T$

即：共发射极交流短路电流增益与工作频率乘积是一个常数，该常数即特征频率 f_T ，亦称为电流增益-带宽积。而如果直接在 $|\beta|=1$ 的条件下，测量 f_T 是比较困难的，根据电流增益-带宽积原理，只需在工作频率满足 $f_\beta \ll f \ll f_\alpha$ 之关系时测得，然后再乘以该测试频率，也就是利用图 1 的线段就可以在较低频率下获得特征频率，而不需要在很高的频率下测量 f_T ，便可以换算出 f_T 的数值。例如，在 40MHZ ($> f_\beta$) 下测得 $|\beta|=10$ ，就可得到 $f_T=400$ MHZ。

2、晶体管特征频率与晶体管结构等参数的基本关系。

从电流传输过程考虑，随着工作频率的提高，晶体管电流增益下降的原因是因为电流在从发射区到集电区的传输过程中，要对发射结电容和集电结电容充放电，通过基区和集电结耗尽层都需要一定的时间而引起信号延迟。根据器件物理分析， f_T 与晶体管结构和物理参数的关系为：

$$f_T = \frac{1}{2\pi(\tau_e + \tau_b + \tau_d + \tau_c)} \approx \frac{1}{2\pi(r_e C_{Te} + \frac{W_b^2}{2D_{nb}} + \frac{x_{mc}}{2v_{dc}} + R_c C_{Tc})} \quad (5)$$

式中， τ_e 、 τ_b 、 τ_d 和 τ_c 分别表示发射结电容时间常数、基区渡越时间、集电结渡越时间和集电结电容时常数， $(\tau_e + \tau_b + \tau_d + \tau_c)$ 即为总延时时常数，或称为总渡越时间。很明显是发射结电阻、基区宽度、势垒电容及势垒区宽度等的函数。

3、特征频率与晶体管工作电流的关系：

晶体管的特征频率除了取决于晶体管的结构外，还与晶体管的工作条件有关。 f_T 随晶体管的工作点的变化而变化。因此，通常所说的某晶体管的特征频率是指在一定偏置条件下的测量值。图2表示了 V_{CE} 等于常数时 f_T 随 I_E 的变化。图3表示 I_E 等于常数时， f_T 随 V_{CE} 的变化。这种变化的原因是载流子渡越时间随工作偏置变化所致。将关系式 $r_e = kT/qI_e$ 代入式(5),得到

$$f_T = \frac{1}{2\pi(\frac{kT}{qI_e} C_{Te} + \tau_b + \tau_d + \tau_c)} \quad (6)$$

一般情况下，在集电极工作电压一定， $I_E < I_{CM}$ 时，可近似认为 τ_b 、 τ_d 、 τ_c 与 I_E 无关，因而通过测量 f_T 随 I_E 的变化，并作出 $1/f_T$ 与 $1/I_E$ 的关系曲线，由曲线斜率即可求得 C_{Te} 的近似值，同时由曲线的截距求得 $\tau_b + \tau_d + \tau_c$ 的近似值。

综上所述，提高晶体管特征频率的主要途径是，减少基区宽度 W_b ，缩小结面积 A ，适当降低集电区电阻率和适当减小集电区厚度，尽量减小延伸电极面积。

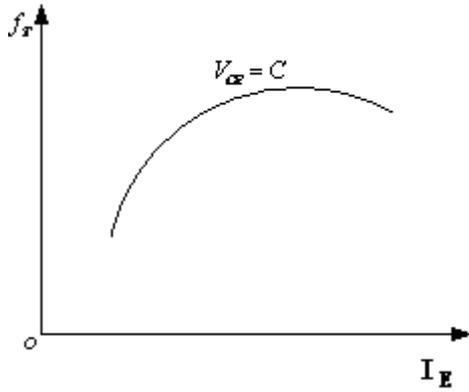


图2 $f_T \sim I_E$ 的关系

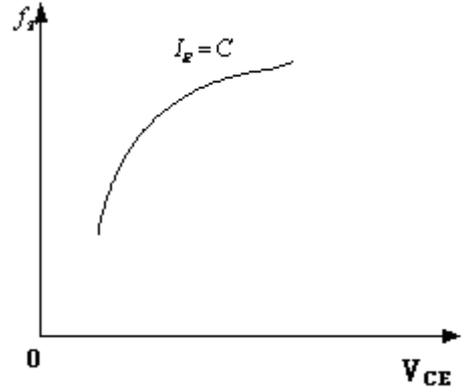


图3 $f_T \sim V_{CE}$ 的关系

f_T 的测试仪原理如图 4 所示。其中信号源提供 $f_\beta \ll f < f_a$ 范围内的所需要的点频信号电流，电流调节器控制输入被测管的基极电流，测试回路和偏置电源向被测管提供规范偏置条件，宽带放大器则对被测管的输出信号进行放大，显示系统指示 f_T 值。显然显示系统表头指示的参数是经被测管放大的信号源电流信号，但经测试前后的“校正”各“衰减”处理可转换成相应的 $|\beta|$ 值。其过程和原理如下，测前“校正”时被测管开路，基极和集电极插孔短接，旋转电流调节旋钮使 f_T 指示表头显示一定值，这样就预置了基极电流。插入被测管测试时 f_T 显示系统表头就指示了经被测管放大的输入信号电流。由于测试过程中被测的基极电流仍保持在“校正”时的值，则取二者的比值就确定了 $|\beta|$ ，然后乘以信号频率即可得到晶体管的特征频率 f_T 。如果测试时取了一定的衰减倍率，那么计算 $|\beta|$ 时将预置的基极电流也缩小同样倍数其结果不会改变。

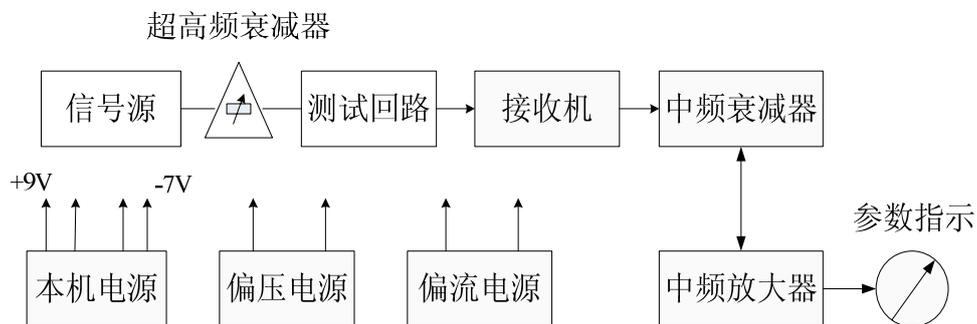


图4 特征频率 f_T 测试系统方框示意图

目前， f_T 的测量多采用晶体管特征频率测试仪，尽管测试仪的型号不同，但都是依据增益—带宽积的原理而设计的，测量方法也基本与上述相同，差别在于测试仪“校正”时要预置

基极电流使显示表头满偏,这实际上是信号源输出一恒定基极电流。因此,测量时必须进行一定倍频的衰减,否则表头会因超满度而无法读出,有的测试仪其衰减倍率设置在仪器面板上,需要预先设定,而有的测试仪则将一定的衰减倍率设定在仪器内部结构中,测试时无须考虑,正是由于测试仪信号源输给被测管的基极电流是定值,所以在 f_T 显示表头上直接刻划出了 $|\beta|f$ 值, f_T 可以直接读出。使用哪种测试仪和选用哪个测试频率则要视 f_T 的范围根据 $f_\beta \ll f < f_a$ 确定。

二、实验内容

1. 在规范 V_{CE} , I_E 偏置条件下测量所选晶体管的特征频率 f_T ;
2. V_{CE} 置规范值,改变 I_E 测量 $f_T \sim I_E$ 变化关系;
3. I_E 置规范值,改变 V_{CE} 测量 $f_T \sim V_{CE}$ 变化关系;
4. 在被测管的发射结并接数 pF 电容,观察变化;
5. 求出被测管的 C_{Te} , $\tau_b + \tau_d + \tau_c$ 的近似值。

三、实验的步骤

1. 了解所用特征频率测试的测试范围,信号源的工作频率,熟悉使用方法,然后开机预热;
2. 选取被测晶体管样品,从器件手册查出其 f_T 的规范测试条件;
3. 做好测量准备工作。

准备:

- (1) 接通电源,预热 10 分钟;
- (2) 将“极性开关”放在 0 上,“参数测量”置于“校准”;
- (3) 将“电压选择”、“电流选择”置于所需档位。(10V, 30mA) 将电压电流调节旋钮反时针调到最小。

校准:

- (1) 将校准用短路器从“校准器”暗盒中取出,插入 b、c 孔内。调节“校准”旋钮,使参数表指针满刻度,拔下短路器;
- (2) 在温度发生很大变化和仪器长期未使用时需要调节检波负载,即校准右边电位器。

测量:

- (1) 依照被测晶体管样品 f_T 的大致范围将“参数量程”置“90MHZ”或“300MHZ”;

- (2) 按测试盒的管脚标记插入被测管；
- (3) 按被测管的极性需要选择“极性转换”开关为“NPN”或“PNP”；
- (4) 顺时针调节电压、电流调节旋钮，使偏置条件达到规定值；
- (5) 在参数表盘上直接读出 f_T 值；
- (6) V_{CE} 在规范值测量 $f_T \sim I_E$ 变化关系；
- (7) I_E 在规范值改变 V_{CE} 测量 $f_T \sim V_{CE}$ 变化关系；
- (8) 在被测管的发射结并接数 pF 电容，重复 5、6、7 项工作；
- (9) 将测试仪恢复到“准备”状态。

四、数据处理和分析

1. 将实验步骤的测试及结果数据列表，并计算相应的值；
2. 依实验数据分别给出 $f_T \sim V_{CE}$ 、 $f_T \sim I_E$ 和 $1/f_T \sim 1/I_E$ 关系曲线；
3. 由 $1/f_T \sim 1/I_E$ 曲线计算出 C_{Te} ， $\tau_b + \tau_d + \tau_c$ 的近似值；
4. 对实验相应曲线和测量数据进行简要理论分析。

五、思考题

1. 特征频率测试原理是什么？在什么条件下成立？
2. 影响特征频率的因素有哪些？试从晶体管设计，制造和使用方面分析讨论。
3. 如果测试频率分别取 $f = 3f_\beta$ 和 $f = 5f_\beta$ ，理论上 f_T 的相对误差是多少？
4. 若晶体管的 f_T 在两个测试频率的测量范围之内，应取哪一个测试频率？为什么？

实验十一 晶体管瞬态热阻的测量

晶体管热阻是表征晶体管工作时所产生的热量向外散发的能力，是晶体管散热能力的一个基本参数。该参数对半导体器件的设计、制造和可靠性应用有着至关重要的影响。目前，瞬态热阻测试最常用的方法有红外扫描热像法和电学法。红外扫描热像法可以精确地测量器件的结温、结温分布和热阻参数，有助于在设计研制阶段提高器件使用寿命和高可靠性的筛选。但是红外扫描设备结构复杂、成本高、测试效率低、而且只能对芯片表面直接测量。电学法利用晶体管温敏参数与瞬态热阻在一定条件下满足某种数学关系式，通过测量晶体管温敏参数间接地测试瞬态热阻参数。电学测量法具有测量效率高、成本低、对器件无损伤等优点。本实验采用电学法进行热阻测试。

本实验的目的是了解晶体管瞬态热阻测量的基本原理，掌握用 BJ2984A 瞬态热阻测试仪测量晶体管瞬态热阻的方法及误差分析。

一、实验原理

1. 热阻定义：晶体管的热阻是指晶体管在单位功耗下集电结温度 T_j 对参考点温度 T_R 的温升， $\theta_{JR} = \frac{T_j - T_R}{P_C}$ 即：单位耗散功率所引起的结温升高值。单位： $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

对于大功率管， T_R 一般取壳温 T_C ，即其芯片下面的管座底部中心点的温度，这时可测得晶体管的集电结到管壳的热阻 θ_{JC} 。

稳态热阻：对器件加恒定功耗，待器件达到热稳定时，测出晶体管的耗散功率，在测得其相应的 T_j 、 T_C ，这时测得的热阻为稳态热阻。

2. 瞬态热阻测试原理

晶体管的瞬态热阻 Z_{th} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)，指脉冲宽度为 τ 的单次脉冲功率加至被测管之后，其等效结温和外部基准点温度的温差与脉冲功率之商。

这里假设温度在被测管的发射结和集电结中分布是均匀相等的。 T_j 表示等效结温； T_a 表示环境温度；当外部基准点选择为环境温度应以环境温度代入；当外部基准点选择为被测管壳时， T_a 应以壳温 T_c 代入。

P_p 为加至被测管上的脉冲功率，被测管集电极耗散功率为 P_C

$$\text{则：} \quad P_p = I_C V_{CB} + I_E V_{BE} \approx I_C V_{CB} = P_C \quad (1)$$

$$Z_{th} = \frac{T_j - T_a}{P_p} \approx \frac{T_j - T_c}{P_C} \quad (2)$$

当被测管的电流放大系数 h_{FE} 不是很小时，其 $I_C \approx I_E$ ，可用 $P_c \approx I_E V_{CB}$ 来进行计算。

由于被测管的结温（系指等效结温，下同） T_j 是随着单次功率脉冲的脉宽 τ 的增加而上升的，故 Z_{th} 亦应随 τ 的增加而增大（如图 1）所示。

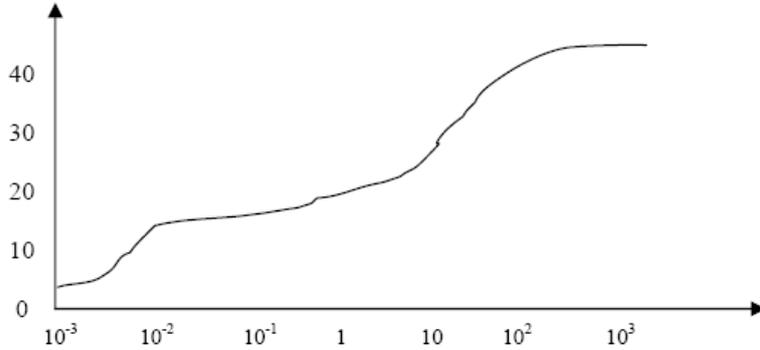


图 1 晶体三极管瞬态热阻曲线

众所周知，对小功率管而言，基准点温度选定为环境温度 T_a ，由（2）式可知

$$Z_{th} = \frac{T_j - T_a}{P_p} \approx \frac{T_j - T_c}{P_c}$$

其中 $T_a \cdot I_E$ 和 V_{CB} 都可通过温度计和仪器很方便的测出，而 T_j 的测量则比较困难的。

所以对瞬态热阻 Z_{th} 的测量也可以主要归结为对结温 T_j 的测量。

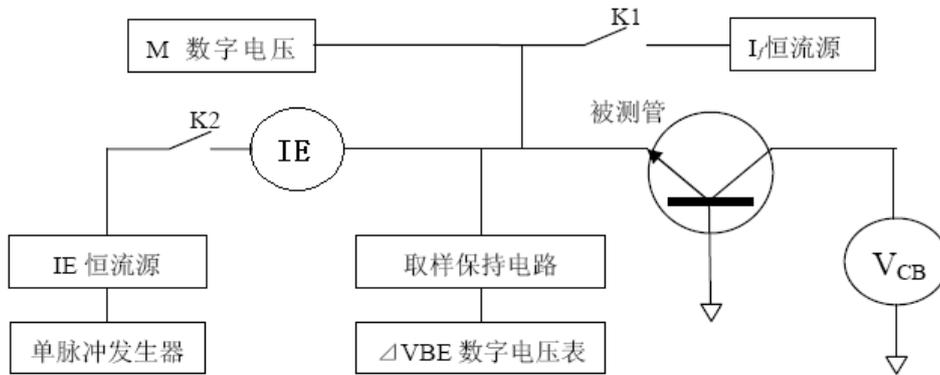


图 2 瞬态热阻测试方框图

本实验选用 BJ2984A 型晶体管瞬态热阻测试仪。它采用基极 — 发射极正向电压法进行瞬态热阻的测试，原理如图 2 所示。

仪器可对各种类型 0~3000W 锗、硅 PNP 及 NPN 晶体三极管的瞬态热阻参数进行快速测试。

选取通过小的测试电流 I_f ($I_f=10mA$) 的发射结正向压降 V_{be} 作为被测管的热敏参数，利

用特定条件下 V_{be} 的温度系数 M (约为 $-1.5\text{mV}/^\circ\text{C} \sim 2.5\text{mV}/^\circ\text{C}$) 曲线的聚交特性, 实现了不用恒温槽系统的 M 参数快速测试。

实验和理论计算表明, 在 $0^\circ\text{C} \sim +200^\circ\text{C}$ 的温度范围内, PN 结正向压降 V_{BE} 与结温 T_j 和测试电流 I_f 的关系如图 3 所示。即, 对同一种器件在一定的测试电流 I_f 下, 正向压降 V_{BE} 是随着结温 T_j 的升高线性下降的。

对于不同的被测管, V_{BE} 的温度系数 M 约在 $-1.5\text{mV}/^\circ\text{C} \sim 2.5\text{mV}/^\circ\text{C}$ 范围内变化, 即温度每升高 1°C , V_{BE} 大约下降 $1.5\text{mV} \sim 2.5\text{mV}$ 。 $M = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T} \Big|_{I_f=C}$

实验表明, 各种硅管 $V_{BE}=f(T_j)$ 曲线的线性部分外推至绝对零度 (0°K) 时, 将聚交于 $V_{BE}=1267\text{mV}$ 处 (误差一般不大于 $\pm 2\%$); 用同样的方法可知各种锗管的聚交点为 $V_{BE}=800\text{mV}$ (如 3 所示)。

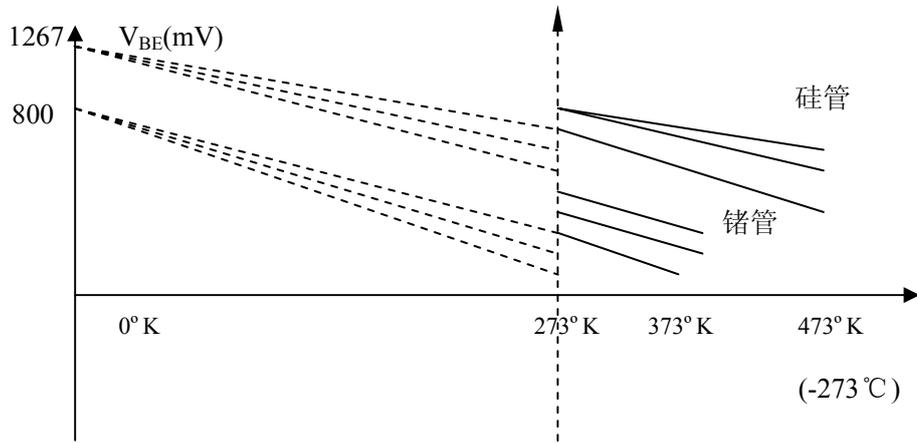


图 3 硅管和锗管 $V_{BE} = f(T_j)$ 曲线的聚交特性

利用图 3 所示曲线的聚交特性, 只需在任意室温 T_a 下测出此时的基极 — 发射极的正向压降 $V_{BE}(T_a)$, 即可不使用恒温槽系统而快速的测定 V_{BE} 的温度系数 M 。

$$\text{硅管: } M \approx \frac{-1267\text{mV} + V_{be}(T_a)}{273 + T_a} \quad (3)$$

$$\text{锗管: } M \approx \frac{-800\text{mV} + V_{be}(T_a)}{273 + T_a} \quad (4)$$

测量对被测管施加脉宽为 $1\text{mS} \sim 1\text{S}$ 的单次功率脉冲前后 V_{be} 的变化 ΔV_{be} , 即可测定被测管在不同脉宽工作条件下的各种瞬态热阻参数, 从而可以确定被测管的最大允许脉冲功耗功率和绘制其安全工作区的最大允许脉冲功耗线, 亦可对批量生产的晶体三极管进行中间测试及成品进行快速筛选和测试。

二、实验内容:

- 1、测量功率晶体管的瞬态热阻 Z_{th} ;
- 2、根据被测器件的型号, 查出最高结温, 计算其 P_{cm} 、 I_{cm} 、 BV_{CBO} 。

三、实验步骤:

实验用仪器: BJ2984 型晶体三极管瞬态热阻测试仪、配套 WD9 晶体管直流稳压电源
具体测试过程如下:

1、测试前仪器校准

测试前检查仪器各开关位置。

“校 IE-测试” 选择开关置于校;

“校正-测试” 选择开关置于“校正”;

T_a 选红字

2、测试:

将“校 IE-测试” 选择开关置于“测试”;

“校正-测试” 选择开关置于“测试”;

3、开关 K1, 断开开关 K2, 使被测管瞬时通过 $I_f=10mA$ 的测试电流, 测出此时被测管的 V_{BE1} [即上述的 $V_{BE}(T_a)$], 由于这时没有注入功率脉冲, 可以认为此时的结温 $T_{j1} \approx T_a$ 。根据温度计测出的 T_a 数值, 由 M 数字电压表按 (4) 式或 (5) 式测出 M (-mV/°C) 值; 并通过取样保持电路记下 V_{BE1} (mV) 值。

4、断开开关 K1, 接通开关 K2, 在预置好的 V_{CB} 电压和 I_E 电流下, 由单脉冲发生器控制 I_E 恒流源, 使被测管通过给定脉宽为 τ 的单次 I_E 脉冲电流, 使被测管的 T_j 上升。

5、在单次脉冲电流 I_E 结束的瞬间, 断开开关 K2 和接通开关 K1 使被测管再次瞬时通过 $I_f=10mA$, 测定此时的 V_{BE2} (对应结温 T_{j2}), 经过取样保持电路, 在 ΔV_{BE} 数字电压表上测出 $\Delta V_{BE}=V_{BE1}-V_{BE2}$ 。

需要测量的是使被测管加热的功率脉冲结束时的结温 T_j , 由于取样延时 Δt 很短, 故测量 V_{BE2} 时所对应的的结温 T_{j2} 和所需的 T_j 可以认为是相等的。

$$\text{则: } -\frac{\Delta V_{be}}{M} = \frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{M} \approx T_{j2} - T_{j1} \approx T_j - T_a \quad (5)$$

由于 $\Delta V_{BE}=V_{BE1}-V_{BE2}$ 为正值, 而 M 为负值, 故 $-\Delta V_{BE}/M$ 为正值。

代入 (2) 式可得:

$$Z_{th} = \frac{T_j - T_a}{P_c} \approx \frac{-\Delta V_{BE}}{M \cdot P_C} \approx \frac{-\Delta V_{BE}}{M \cdot I_E \cdot V_{CB}} \quad (6)$$

当确定了集电极最高允许结温 T_{jmax} ，环境温度 T_a （对小功率管） T_C （对大功率管）后，即可计算出集电极最大允许直流耗散功率 P_{cm} 和各种脉宽 τ 条件下的集电极最大允许脉冲耗散功率 P_{cmp} 。

$$\text{对小功率管: } P_{cm} = \frac{T_{jm} - T_a}{R_{th}} \quad P_{cmp} = \frac{T_{jm} - T_a}{Z_{th}}$$

$$\text{对大功率管: } P_{cm} = T_{jm} - T_C \quad P_{cmp} = \frac{T_{jm} - T_C}{Z_{th}}$$

四、数据处理

1. 根据 $T_A(^{\circ}C)$ 、 $\tau(ms)$ 、 $M(-mV/^{\circ}C)$ 和 $\Delta V_{BE}(mV)$ ，求出相应的 $\Delta T_J(^{\circ}C)$ 。在半对数坐标上作 $\Delta V_{BE} \sim \tau$ 和 $\Delta T_J \sim \tau$ 曲线，选择适合于用来检测芯片焊层质量的 $\tau(ms)$ 值。
2. 画出固定 I_E 和 τ 时的 $\theta_{JC-t} \sim P_C$ 曲线。
3. 画出固定 V_{CB} 和 τ 时的 $\theta_{JC-t} \sim I_E$ 曲线。
4. 画出固定 P_C 和 τ 时的 $\theta_{JC-t} \sim I_E$ 曲线。
5. 根据以上曲线，讨论对被测器件作芯片焊接质量筛选时的 ΔV_{BE} 优化测试条件。

五、思考题

1. 为什么每次测试后必须等器件冷却才能进行第二次测试？
2. 简单叙述测试晶体管热阻的原理，以及 BJ2984A 热阻测试仪是如何实现 R_{τ} 测试？
3. 你认为影响 θ_{JC-t} 测试精度的主要因素有哪些？为什么延迟时间 t_d 和 $T_C \neq T_A$ 对测试精度影响很大？如何保证 $T_{J0} = T_C = T_A$ ？这种单次脉冲测得的瞬态热阻于连续脉冲测得的是否相同？

实验十二 双极性运算放大器参数的测试

集成运算放大器是一种高性能直接耦合放大电路。在外接不同反馈网络后，具有不同的运算功能。运算放大器除了可对输入信号进行加、减、乘、除、微分、积分等数学运算外，还在自动控制，测量技术、仪器仪表等各个领域得到广泛应用。

在电路设计和器件选型时，必须对运算放大器的各种参数有一个较为全面的了解。

本实验的目的是熟悉运算放大器主要参数的测试原理，掌握这些参数的测试方法。

一、实验原理：

集成运放由输入极、中间极、输出极和偏置电路四部分组成，其内部采用直接耦合方式。本实验选用 BJ3190A 型集成运放器测试仪进行测量。BJ3190A 型集成运放器测试仪采用“辅助放大器”的测量方法，是目前国际普遍采用的一种测试方法。具有稳定性好，精度高，范围大等特点，可对各种集成运算放大器的常用参数进行测量，全部参数经内部运算后线性化刻度，可电表直读。仪器设有好坏判别。其主要测试参数指标的工作原理如下：

1、输入失调电压 U_{IO} 的定义及测试原理：

由于集成运放的输入级电路参数不可能绝对对称，所以当输入电压为零时，输出电压并不为零。输入失调电压 U_{IO} 是为使输出保持零电平，而须在两个输入端所加补偿电压。

本实验用 BJ3190A 型集成运放器测试仪进行测量。其测量输入失调电压的原理图如图 1 所示，利用辅助运算放大器（简称运放）N2 产生足够的电压经 R2 电阻反馈到被测运放 N1 的反向输入端。使它输出保持在零电平。这时便根据公式（3）得到输入失调电压 U_{IO} 。

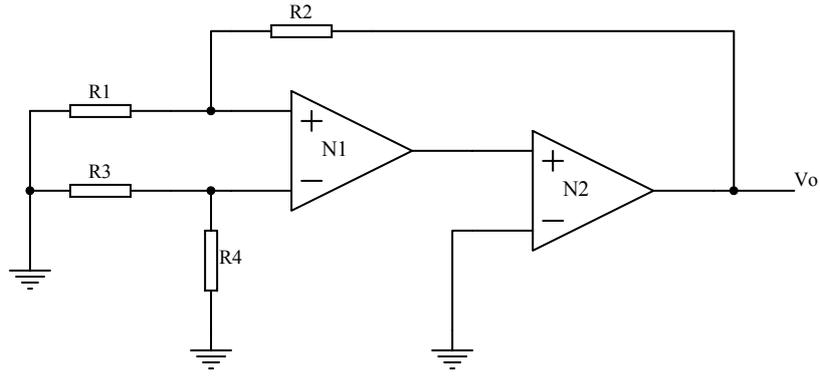


图 1 输入失调电压 U_{IO} 测试原理图

根据等效电路数学推导的方法得到公式 (1):

$$R1 = R3 \quad R2 = R4$$

$$V_o = (1 + R2 / R1) V_{IO1} + I_{IO1} \times R2 \quad (1)$$

$$I_{IO1} \times R2 \ll (1 + R2 / R1) V_{IO1}$$

$$\therefore V_o \approx (1 + R2 / R1) V_{IO1} \quad (2)$$

整理公式 (2) 得:

$$V_{IO1} = V_o / (1 + R2 / R1) \quad (3)$$

V_{IO1} 就是被测运放 N1 的输入失调电压。

2、输入失调电流 I_{IO} 的定义及测试原理:

输入失调电流反映运放输入级差放管输入电流的不对称程度, 即: $I_{IO} = |I_{B1} - I_{B2}|$ 测试电原理图如图 2 所示。为求差, 仪器利用辅助运放 N3 将被测运放 N1 的正输入端的注入电流 I_{B2} 换算成 V_{o2} 输出。而负输入端的注入电流 I_{B1} 由自身换算成 V_{o1} 输出由辅助运放 N2 将这两个电压差放大, 经换算便得到输入失调电流的公式 (4)。

$$V_{o1} = I_{B1} \times R_1 \quad V_{o2} = I_{B2} \times R_2$$

$$R_6 = R_5 \quad R_4 = R_3 \quad R_2 = R_1$$

$$V_o = (V_{o1} - V_{o2}) (R_3 / R_5)$$

$$= (I_{B1} - I_{B2})R_1(R_3/R_5)$$

$$= I_{I_0} \times R_1(R_3/R_5)$$

$$\therefore I_{I_0} = V_o / (R_1 \times R_3 / R_5) \dots \dots \dots (4)$$

仪器用琴键变换 R1 和 R2 和 R2 的阻值的方法,来变换测试量程。

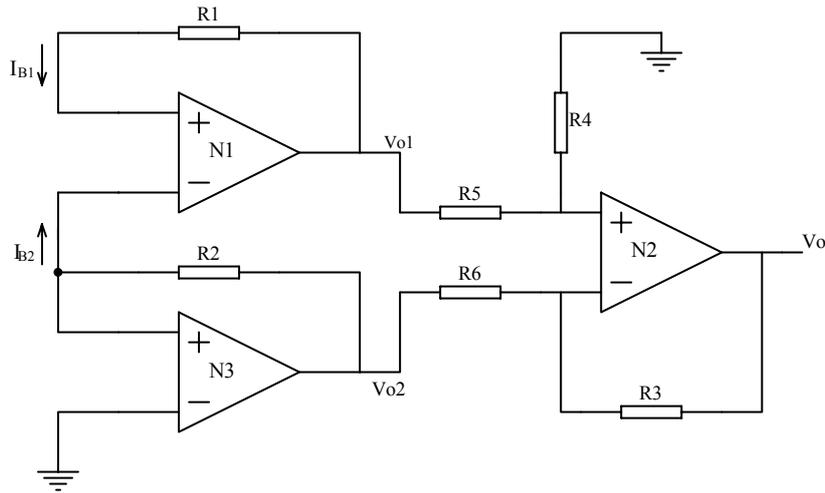


图 2 输入失调电流测试电路原理图

3、输入偏置电流 I_{IB} 的定义与测试原理：

输入偏置电流 I_{IB} ：是运放两个输入端基极偏置电流的平均值：

$$I_{IB} = (I_{B1} + I_{B2}) / 2$$

与输入失调电流 I_{I_0} 的测法基本相同，不同点是辅助运放 N2 接成加法器。同时进行除 2 的放大运算，测试原理图见图 3 所示：

$$R_5 = R_6 \quad R_4 = R_5 // R_6 // R_3$$

与公式 (4) 的推导方法相同得到：

$$V_o = (V_{o1} + V_{o2})(R_3/R_5) = (I_{B1} + I_{B2})R_1 \times R_3/R_6$$

$$I_{IB} = (I_{B1} + I_{B2}) / 2$$

所以整理上式得：

$$I_{IB} = V_o / (2R_1 \times R_3 / R_5) \dots \dots \dots (5)$$

同 I_{IO} 基极注入电流 I_{IB} 也用琴键改变 R1 和 R2 的阻值来变换测试量程。

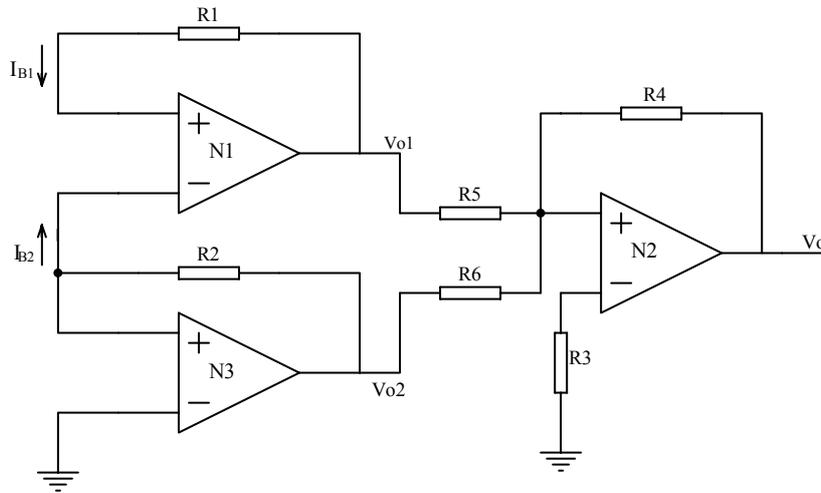


图 3 输入偏置电流 I_{IB} 的测试电路原理图

4、开环电压增益 A_{VD} 的定义及测试原理：

在集成运放不加反馈时的差模放大倍数称为开环电压增益 A_{VD} 。即输出电压增量与输入差值电压增量之比： $A_{VD} = \Delta V_o / \Delta V_i$

开环电压增益常用分贝表示， $A_{VD} (dB) = 20 \lg (\Delta V_o / \Delta V_i)$ 通用集成运放的 A_{VD} 通常在 105 左右，即 100Bb 左右。 A_{VD} 越大，稳定性越高。理想运放的 A_{VD} 为 ∞ 大。

如图 4、图 5 所示测试方框图与测试原理图：

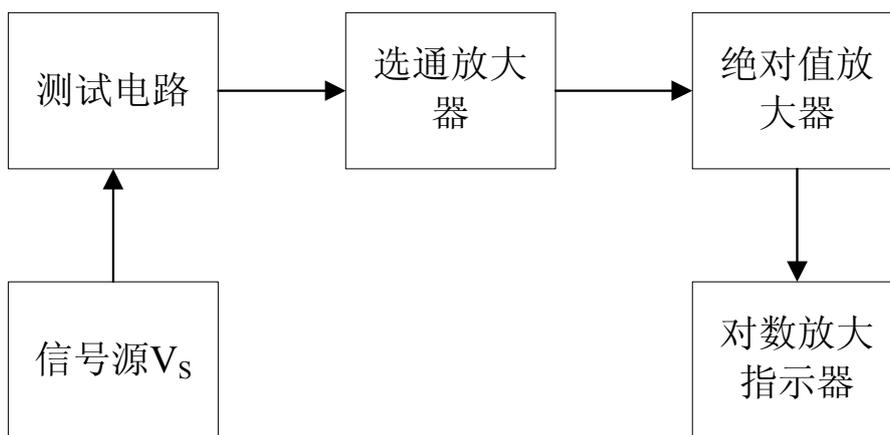


图 4 开环电压增益 A_{VD} 测试方框图

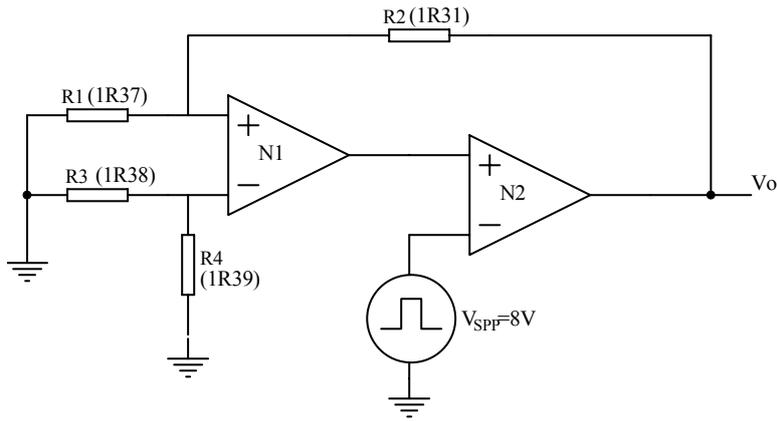


图 5 开环电压增益 AVD 测试电路原理图

根据等效电路数学推导，可得到公式（1）。而当辅助运放 N2 负输入端加入信号 V_s 时。

环路的输出电压： V_o 就为两部分电压的迭加：

$$V_{o1} = (1 + R_2 / R_1) V_{io} + I_{io} \times R_2$$

$$V_{o2} = V_s (-A_2) + V_{o2} \times (R_1 / (R_1 + R_2)) (-A_1) (A_2)$$

$$(R_1 / (R_1 + R_2)) A_1 \times A_2 \gg 1$$

$$\therefore V_{o2} = -(V_s / A_1) (1 + R_2 / R_1)$$

$$\text{这时： } V_o = -(V_s / A_1) (1 + R_2 / R_1) + (1 + R_2 / R_1) V_{io} + I_{io} \times R_2$$

当 V_s 为一变化量时测得输出信号的变量使得得到被测放大器 N1 的开环电压增益。

$$A_{VD} = A_1 = (-\Delta V_s / \Delta V_o) (1 + R_2 / R_1) \dots \dots \dots (6)$$

用分贝表示：

$$A_{VD} (dB) = 20 \lg \{ [\Delta V_s (1 + R_2 / R_1)] / \Delta V_o \} \dots \dots \dots (7)$$

见方框图，由于信号 V_{spp} 为一定值，只要测出 ΔV_o 的大小，选出基波，经整流滤波后，送对数放大器就可以算出分贝值。

5、共模抑制比 K_{CMR} 的定义及测试原理：

K_{CMR} 反映了集成运放对共模输入信号的抑制能力，它是评价运放性能的综合指标。定

义为：差模电压增益 A_{VD} 与共模电压增益 A_{VC} 之比得绝对值，即：

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{VD}}{A_{VC}} \right|$$

也常用分贝表示： $K_{CMR} = 20 \lg K_{CMR} (dB)$

其测试方法与开环电压增益 A_{VD} 的测试大至相同，这样只要把测试电路稍加变化一下

即可，如图 6 所示；

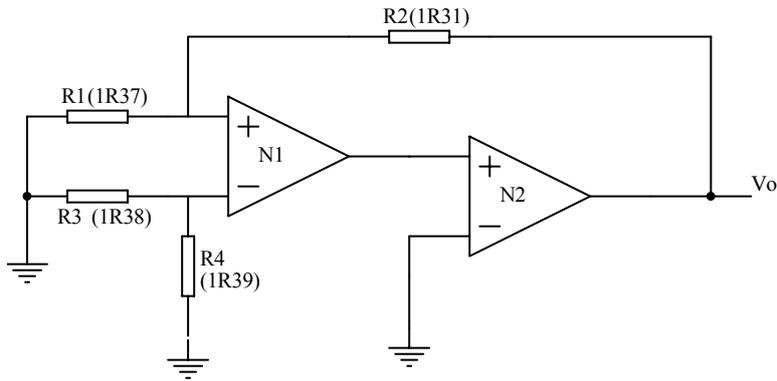


图 6 共模抑制比 K_{CMR} 测试电路原理图

根据等效电路的数学推导，便得到共模抑制比的公式：

$$K_{CMR} = [\Delta V_S (1 + R_2 / R_1)] / \Delta V_0$$

用分贝表示：

$$K_{CMR} (dB) = 20 \lg [\Delta V_S (1 + R_2 / R_1)] / \Delta V_0 \dots \dots \dots (8)$$

6、静态功耗的测量

静态功耗指输入信号为零，输出无负载时，放大器的总耗电量。

$$P_W = I_{CC} (V_{CC} + V_{EE})$$

本仪器测试量为静态功耗电流 I_{pc} 。测试原理电路见图 1 所示。根据克希荷夫电流定律。

流入运放的电流之和为零。如图 7 所示。

$$I_{CC} - I_{EE} - I_0 + I_{B1} + I_{B2} = 0$$

$$I_{B1} = I_{B2} = 0$$

$$\therefore I_{CC} = I_{EE} = I_{PC}$$

只要测出 I_{CC} 或 I_{EE} 其中一个便定出静态功耗:

$$P_W = I_{PC}(V_{CC} + V_{EE}) \quad (9)$$

仪器测出的 I_{PC} 就是 I_{CC} , 所以标注为 I_{PC} 。

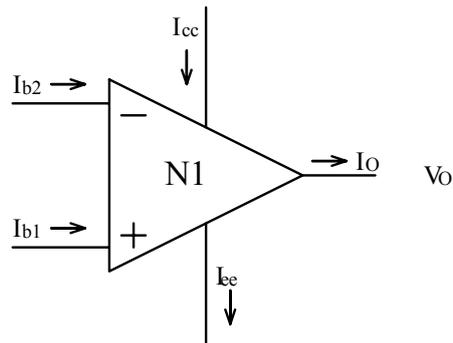


图 7 电流示意图

7、最大输出电压幅度 $\pm V_{OP}$ 的测量

因为运放在额定电源电压下所能输出的最大正负峰值叫做最大输出电压幅度 $\pm V_{OP}$, 所以可将运放接成一闭环电路如图 8 所示:

$$V_o = -(R_2 / R_1)V_i$$

只要 $\pm V_i$ 足够大, 就可在放大器的输出得到 $\pm V_{OP}$

$$\pm V_{OP} \leq \pm (R_2 / R_1)V_i \quad (10)$$

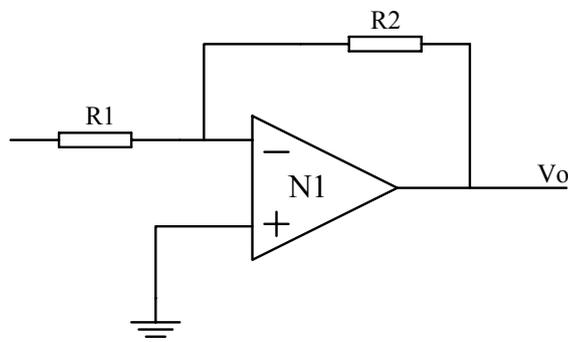


图 8 最大输出电压幅度 $\pm V_{OP}$ 测试电路原理图

实际测试电路如图 9 所示：

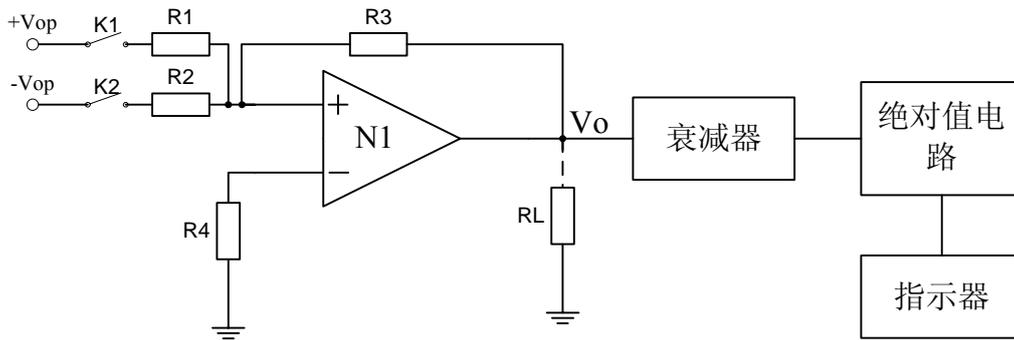


图 9 最大输出电压幅度 $\pm V_{op}$ 实际测试电路图

当测 $+V_{op}$ 时，继电器 K1 接通，被测运放 N1 输出为 $+V_{op}$ ，通过电阻分压送到运算电路，取绝对值后通过电表显示其值。测 $-V_{op}$ 时，继电器 K2 接通，被测运放 N1 输出为 $-V_{op}$ 。

8、传输特性的测量

借助于示波器对运放的传输特性（差模特性和共模特性）进行观测，可判断器件质量优劣。测试原理如图 10 所示：

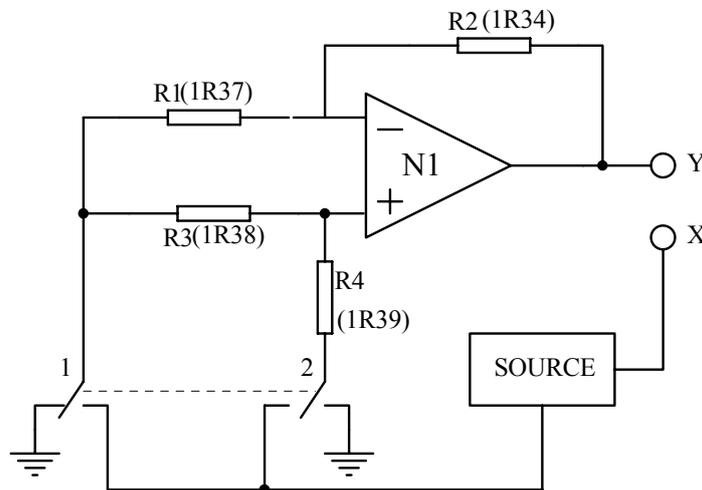


图 10 传输特性测试电路原理图

当“1”接地，“2”接信号源波形输出为差模特性，见图 11-1。

当“2”接地，“1”接信号源波形输出为共模特性。见图 11-2。

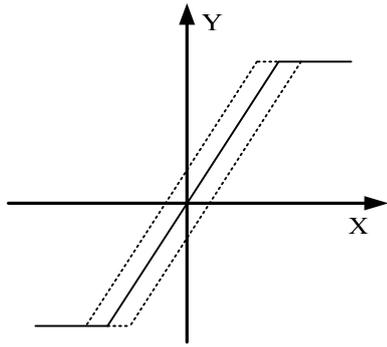


图 11-1 差模特性波形

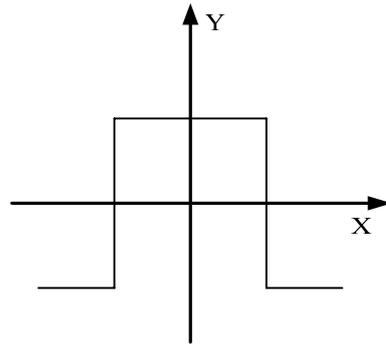


图 11-2 共模特性波形

9、转换速率 SR 的测量

转换速率是指运放在大信号条件下输出电压的最大变化速率。 $SR = |du_0 / dt|_{\max}$ ，是衡量运放在大幅值信号作用时工作速度的参数，常用每微秒输出电压变化多少伏来表示。如图 12 所示：

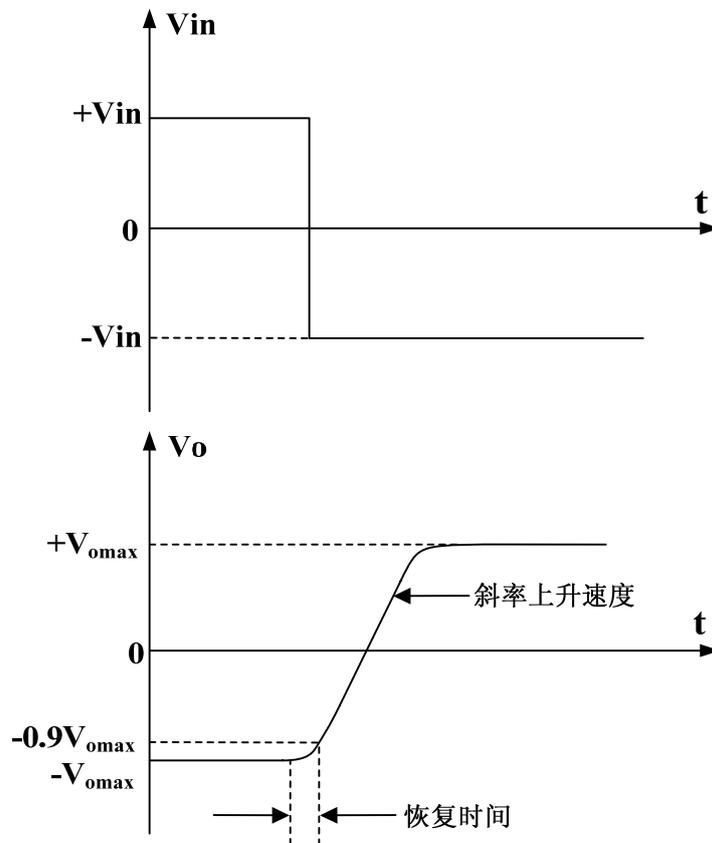


图 12 输入波形与输出波形

可见转换速率与运放的频率响应，瞬态特性有很大关系，不但与运放的内部电路、分布参数、相补电容有关，而且与反馈深度的不同有密切关系，这里的测试电路原理如图 13 所示：

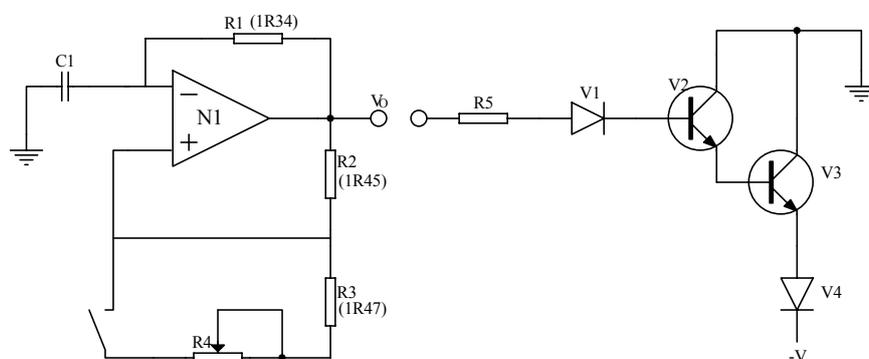


图 13 转换速率 SR 测试电路原理图和好坏判别电路原理图

被测运放 N1 接成电压比较器形式，通过电压正反馈，使其振荡输出方波，这时放大器工作处于大信号工作状态，在被测运放 N1 的输出端至 Y 输出点就得到输出变化最大电压的方波。而方波的上升速度，除决定于运放输出电压的转换速率外，还受运放输出最大电流的影响，只要将输出电流限制在足够小，便可测出运放的转换速率 SR。为使在示波器上看得清楚，调节电位器 R4 改变方波的频率高低。

二、实验内容：

分别在 $\pm 6V$ 、 $\pm 8V$ 、 $\pm 15V$ 三种电源电压下测试运算放大器 741 各个交、直流参数并比较分析；

对比分析测试数据及结果；

画出其传输特性和转换速率的曲线。

三、实验步骤：

开机前准备：首先详细阅读 BJ3190A 的使用说明书，检查电源开关是否处在关闭位置。

测量开关 (S2) 应处非测量位置，单项琴键 (S10：“1~8”琴键) 均应弹起。仪器面板上

的所有开关按键抬起。

打开仪器后部的电源开关，电源指示灯亮。先不插入被测器件，按动复位琴键，电表 1 有被测器件电源电压指示。 V_{cc} 、 V_{ee} 的电位器旋钮可调节电压。变化其中间位置的开关 (S3)，按键释放时电表指示 V_{cc} ，按下时电表指示 V_{ee} ，调好被测器件的电源电压。这时需要将仪器预热 15 分钟。

首先对仪器进行“校准”：测量方式选“手动”；按下“校准”键。

将 A_{VD} 下 I_{IB} 下方的“5”号琴键按下，对 I_{IB} 进行零点校准；选 I_{IB} 为 $0.1 \mu A$ 量程，微调面板“ I_{IB} 调零”旋钮，使电表 2 指示为零。(0.1 μA 档校好后,其它几档也随即为零)。再按一下“ I_{IB} 校准”琴键,使其弹起复原。

将“8”号琴键按下，对 A_{VD} 进行校准。选 S8 的 A_{VD} 量程为最大 120dB，(读表 2 下方刻度)调节“ A_{VD} 满度”旋钮使电表指示满度。再按一下“ A_{VD} 校准”琴键,使其弹起复原。

校准完成后，弹起校准键复原，对器件进行测量。

将被测器件按管脚插入测试盒（可根据所测器件,选择测试盒,单运放测试盒、多运放测试盒）。

将“测量”键按下，“0”对应的 LED 红灯闪亮。说明被测器件正常，开始测试。

本实验要求在三种电源电压 (V_{cc} 、 V_{ee} 分别为 $\pm 15V$ 、 $\pm 8V$ 、 $\pm 6V$) 下，对运放 8 个主要参数进行测试。

注：对运放 741, $\pm 15V$ 为正常额定电压情况下工作； $\pm 8V$ 、 $\pm 6V$ 为欠电压工作。

以 $\pm 8V$ 电源电压为例：调 $V_{cc}=8V, V_{ee}=-8V$ (V_{cc} 、 V_{ee} 读数按表 1 下方刻度 0~30V 档进行读数) 下面分别对 A 系列 8 个参数进行测量，其中：1、2、3 号键为直流参数；4、5、6、7、8 号键为交流参数。

步骤：

①按下 1 号下方键，测+V_{op},读表 1;

②按下 2 号下方键，测-V_{op},读表 1;

③按下 3 号下方键，测 I_{pc}，静态功耗电流，测量值读表 1，可根据实测数据选取合适的档位;

④按下 4 号下方键，测 V_{IO}输入失调电压，读表 2，可根据实测数据选取合适的档位;

⑤按下 5 号下方键，测 I_{IB}，读表 2，可根据实测数据选取合适的档位;

⑥按下 6 号下方键，测 I_{IO}，读表 2，可根据实测数据选取合适的档位;

⑥按下 7 号下方键，测 K_{CMR}，读表 2，可根据实测数据选取合适的档位;

⑦按下 8 号下方键，测 A_{VD}，读表 2，可根据实测数据选取合适的档位;

注：测量时，若指针摆动，读平均值。

自动测量时，①准备：按下“自动”键，S10 各琴键全部弹起复原（即 1、2、— 8 号下方键全部弹起）；S1 各琴键全部或选择部分按下（即 1、2、— 8 号下方键全部或部分按下，根据选择要测试的参数决定）②步骤：先将“测量”键按下（灯闪烁）时，准备测量。然后依次按下“复位”—“启动”键，等待几十秒即可开始测量。S1 各琴键上方的灯依次按照所选测试参数，闪亮。选择自动‘调节旋钮’可控制测量时间间隔。（说明：正在测试时，测量键上方的灯灭，测量完成时，灯亮，测量准备时，灯闪烁。）

按下“反转”琴键，琴键（S10）的“1、2、3”项，将由 A 转换成 B 项依次为差模特性，共模特性和转换速率 SR 的测试。

（1）差模、共模特性是在 X、Y 外接通用示波器的 X、Y 来观测波形，示波器可对 X、Y 输出进行比例衰减。“扫描旋钮”是调节信号电压（0~20V、50Hz）不要过大。调到了可观测出结果为止。

（2）转换速率“SR”。Y 为被测器件辅助的摆动输出电压。“扫描 SR”旋钮为调节

频率高低。示波器置好 t/Cm 后，调节看清为止，频率不必太高。

测试完备后，将测量键弹起。

多运放测试：需更换多运放测试盒，这时只能选用“自动”测试项。

步骤：①将琴键 S21 “多”（选多运放）按入，琴键 S15 “1、2、3、4”全部按下。

②单项测试按键 S10 各琴键全部弹起复原，选择好测试项目（S1 各琴键全部或选择部分按下）；

③按下“自动”琴键；按下“测量”键，这时“Vo”灯开始闪烁；按下“复位”；最后按“启动”键启动测试盒上微动开关（“Vo”灯灭的同时，说明仪器正在进行测试）。仪器将“自动”进行换项测试，时间长短由电位器 R7 决定。依次显示 1、2、3、4 运放的结果。这时未选项将被自跳过。

四、实验数据处理：

根据实验内容要求，详细纪录各个测试数据，并对各个参数进行分析比较，画出传输特性和转换速率曲线。

五、注意事项：

单项测试琴键 S10 均应弹起。

测试前，设好被测器件的电源电压，即 V_{cc} 、 V_{ee} 及各参数档位。

接好测试盒，选择测试方法，“自动”或“手动”。“自动”测试模式下，如设置测试项时，指示灯亮，请按一下复位键。

测试盒：单运放测试盒按 LM741 的出脚连接；本仪器所配的多运放测试盒按 LM324、LM347 所对应的出脚连接。如用户测试的组件与本测试盒连接不同时，可用备件，自行连接。也可将所给测试盒打开，接成所需要的形式。

六、思考题：

- 1、 V_{cc} 和 V_{ee} 的大小对最大输出峰-峰电压有何影响？
- 2、运放工作在小信号和大信号下时，状态有何不同？
- 3、采用辅助放大器测试有什么优点？试分析测试线路原理。

实验十三 版图电路分析

一、实验目的

- 1、培养从版图提取电路的能力
- 2、学习版图设计的方法和技巧
- 3、复习和巩固基本的数字单元电路设计

二、实验原理

1、CMOS 集成电路中的元件及其版图结构

对于 CMOS 集成电路中的基本元件主要包括：

(1) MOS 晶体管。MOS 晶体管是最基本的有源元件，在 CMOS 工艺中，有 PMOS 和 NMOS 两种类型，可用作跨导元件，开关，有源电阻及 MOS 电容等。在物理版图中，只要一条多晶硅跨过一个有源区就形成了一个 MOS 晶体管，将其 S, G, D, B 四端用连线引出即可与电路中其它元件连接，如图 1 所示：

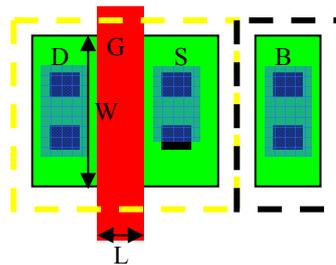


图 1 MOS 晶体管版图结构

(2) 集成电阻。电阻是最基本的无源元件之一，是输入输出静电保护电路，模拟电路中必不可少的元件。主要有以下几种类型的电阻：

- 多晶硅电阻。多晶硅电阻做在场区上，其方块电阻较大，因此可以作为电阻。如在作电阻的多晶硅处注入杂质，使其方块电阻变大，可制作阻值很大的电阻。其阻值大小可用 $R=R_{\square} \cdot L/W$ 进行计算。 R_{\square} 为单位面积的方块电阻值。

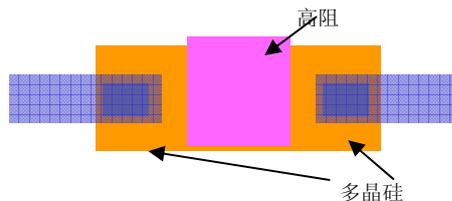


图 2 多晶硅电阻

- N 阱电阻。因为阱是低掺杂的，方块电阻较大，因此大阻值电阻可以用阱来做。

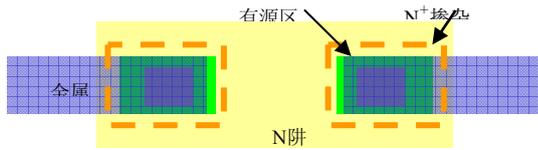


图3 N阱电阻

• MOS管电阻。可以通过使MOS管工作在线性区来充当电阻，它是一个可变电阻，其变化取决于各极电压的变化：

$$R = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})}$$

(3) 集成电容。两端元件，电荷的容器—— $Q=CV$ ，最基本的无源元件之一，是电源滤波电路，信号滤波电路，开关电容电路中必不可少的元件。主要有以下几种类型的电容：

• 多晶硅-扩散区电容。电容作用在扩散区上，它的上极板是第一层多晶硅，下极板是扩散区，中间的介质是氧化层。

• 多晶硅-多晶硅电容。电容作用在场区上，它的两个电极分别是两层多晶硅，中间的介质是氧化层。

• MOS电容。结构和MOS晶体管一样，是一个感应沟道电容，当栅上加电压形成沟道时电容存在，一极是栅，另一极是沟道，沟道这一极由S和D连在一起引出。

• “夹心”电容。结构如图4所示。

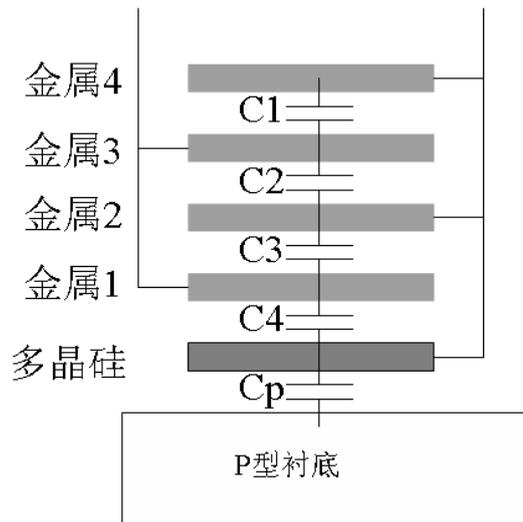


图4 “夹心”电容

(4) 寄生二极管和三级管

二极管：有源元件之一，对于N阱CMOS工艺，有PSD/NWELL和NSD/P-epi两种二极管，主要用于ESD保护电路。

衬底BJT：有源元件之一，对于N阱CMOS工艺，可实现PNPBJT，可用于电压基准

电路。

2、版图电路分析的流程

版图电路分析的基本流程如图 5 所示,在开启器件封装以前,需要对器件进行性能检测。根据产品说明书及参考资料,可作一些试探性的预测,确定所需要拍照的区域,以节省时间和开支。打开管壳,芯片拍照并放大。用照片和显微镜,识别集成元器件、布局布线,提取线路图,然后测量集成电路上元器件参数,进行分析与仿真,如果仿真结果符合预期的功能要求,则开始进行正向的版图设计。当前,打开管壳和拍照工作一般交由专业的设计服务公司完成,设计公司完成拍照后,用专用软件将所有图象拼凑起来,包括不同层次间的对齐及图片边缘的衔接等。然后版图设计服务公司将软件及数据交给版图电路分析者,进行版图电路的反向分析。通过版图分析和基本尺寸的测量可获得实际的线路图和逻辑功能图,可了解到版图布局,还可取得各种元件尺寸的数据以了解其它单位或国外制版和光刻水平。但应注意“侵权”问题。

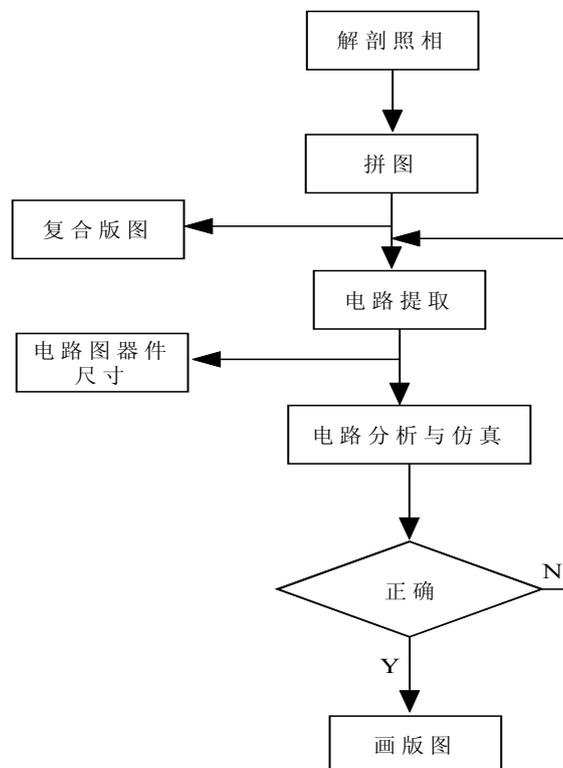


图 5 反向分析流程

三、实验步骤

- 1、首先从大的方面观察芯片布局，找出哪些是晶体管、电阻、电容和导电带等；
- 2、将较大的版图划分成几个模块，然后分别进行提取；
- 3、画出电路版图的初步草图，测量有关器件的尺寸；
- 4、整理电路，分析其逻辑功能，并进行仿真验证。

四、实验内容

反向提取给定电路模块（做实验时由老师提供），要求画出电路原理图，分析出其所完成的逻辑功能，并进行仿真验证。

五、实验数据处理及分析

- 1、完成电路图的整理；
- 2、给出逻辑功能真值表；
- 3、给出仿真验证的结果。

实验十四 几种数字门电路的计算机模拟与仿真

集成电路的计算机辅助设计大致可分为以下几步：电路图绘制和电连接关系描述、电路（模、数）特性分析与模拟。根据分析和模拟结果修改并确定电路结构，结合具体的集成电路工艺编辑集成电路版图。

本实验的目的是用 ORCAD 软件完成数字电路逻辑电路图的绘制及模拟。

一、实验原理

1、半加器电路

半加器是指没有进位输入端的一位加法器。

半加器逻辑表达式为

$$\text{SUM} = A \oplus B = \overline{A}B + A\overline{B}$$

$$\text{C_OUT} = AB$$

图 1 为半加器电路的一种实现结构：

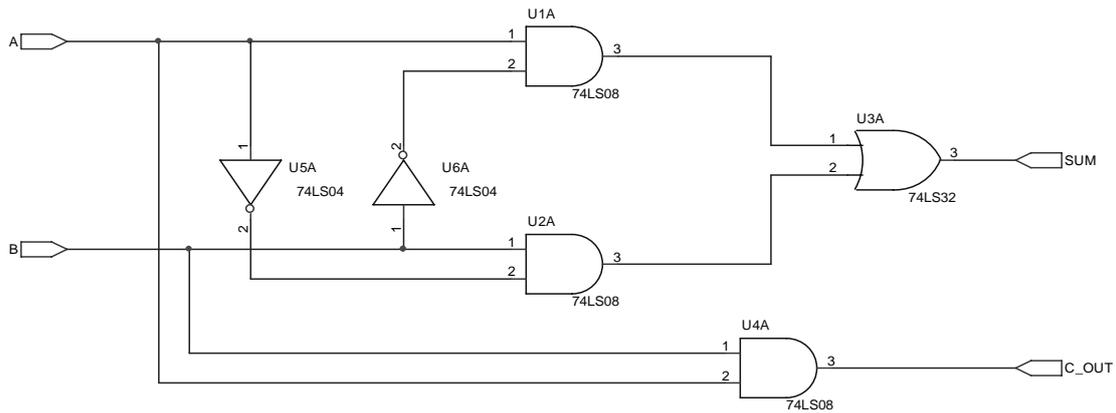


图 1 半加器电路逻辑图

2、一位全加器

全加器是数字系统中非常重要的一个基本功能电路，它是构成运算器的核心电路，也是乘法器中的必要组成部分。这里用两个半加器电路来实现一个一位全加器，如图 2 所示。

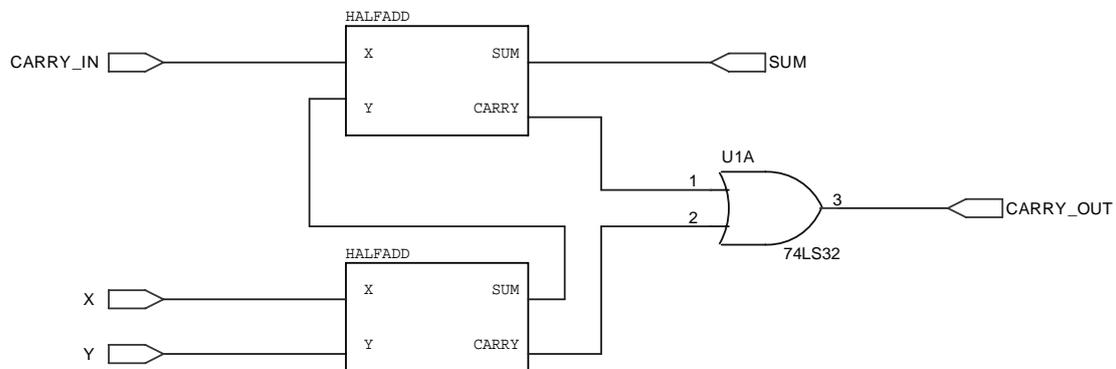


图 2 一位全加器电路图

3、单端输入 MOS 反相器与 TTL 反相器电路构成及性能比较

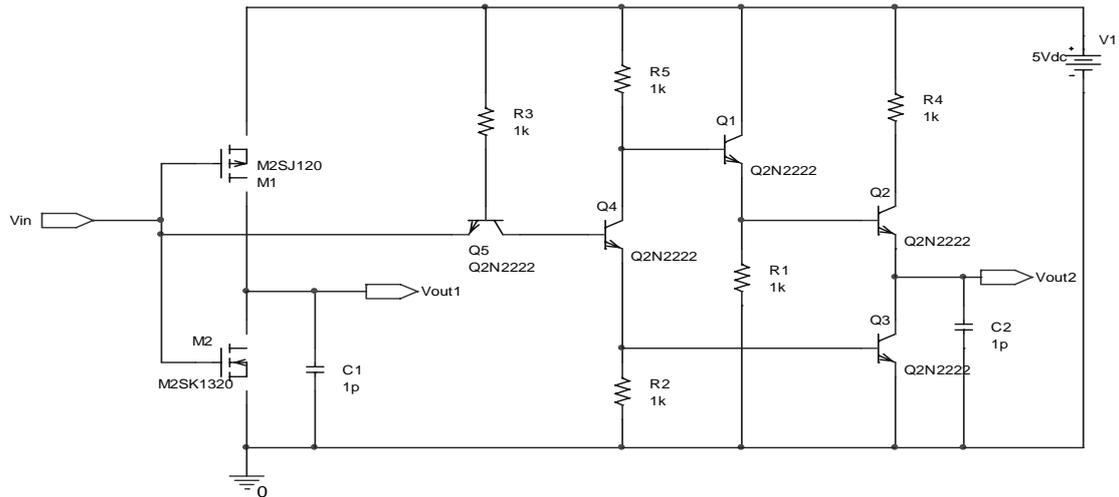


图 3 MOS 反相器及 TTL 反相器

4、用 3 个 74LS14 非门电路构成的信号产生电路

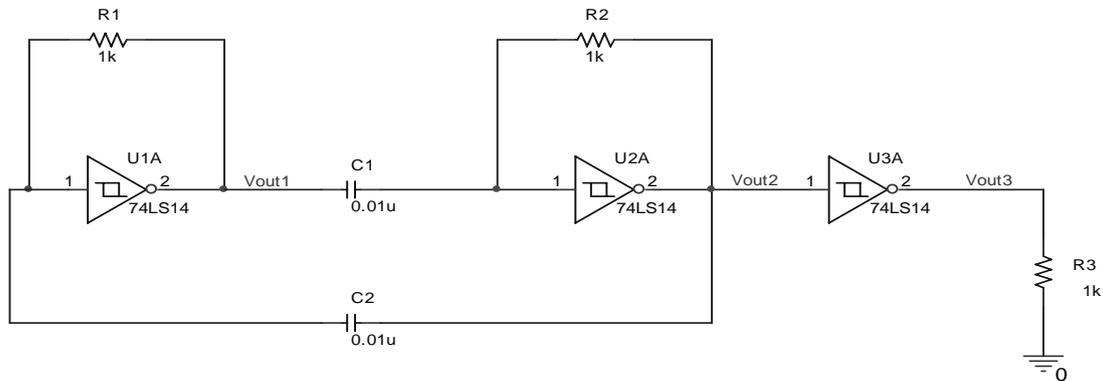


图 4 信号产生电路

PSPICE 电路分析元器件简介：

电路描述：

包括元件及其互连关系。将元件名，端接节点，元件参数等输入。

按以下格式

a、电阻、电容和电感

Rname N1 N2 数值<温度 TC=TC1<,TC2>>

Cname N1 N2 数值<IC=Initial Condition>

Lname N1 N2 数值<IC=Initial Condition >

电阻、电容和电感名称分别以关键字 R、C 和 L 开头。N1 和 N2 为元器件的两个端点，元件单位分别为欧姆、法拉和亨利。可选项 TC1 和 TC2 是温度系数，缺省值为零，修正公式是：

$$VALUE(T)=VALUE(T0)(1+TC1(T-T0)+TC2(T-T0)^2)$$

<IC=>项为初始条件项，若瞬态分析句中有<UIC>项，则瞬态分析以 IC 项所给值作初始条件，否则，IC 项值仅作为直流第一次迭代的初始值，迭代开始后 IC 项自动消失。

b、独立源

直流源

Vname N+ N- <DC> DCValue

Iname N+ N- <DC> DCValue

交流源

Vname N+ N- AC ACValue Phase

Iname N+ N- AC ACValue Phase

其中 V 和 I 分别为独立电压源和电流源的关键字, N+、N-是正、负节点, 电流源方向是从正节点经电源内部流向负节点。一个独立源可同时给出直流、交流和瞬态数据。作不同分析时, 取其中相应数据。若作直流分析, 取直流常数; 若作交流分析, 则取振幅和相位所描述的正弦信号(交流分析频率); 作瞬态分析时, 则用随时间变化的瞬时数据(可以为常数); 直流和瞬态分析可再用同一值描写, 若值变化, 取 t=0 时的值作直流分析。直流关键字 DC 可以不写, 直流值的缺省值为零。可以用零值电压源表示电流表, 因为每个电压源的电流值将被打印, 而零值电压源又不影响电路功能。交流关键字为 AC, 交流振幅和相位的缺省值分别为“1”和“0”。瞬态值描述了随时间变化的电源, SPICE 有脉冲源、正弦源、分段线性源、指数源和单频频率调制源等五种。前三种格式如下:

脉冲源: PULSE(V1 V2 TD TR TF PW PERIOD)

括号内分别为初值、脉动值、延时时间、上升时间、下降时间、脉冲宽度和周期。其波形如图 5 所示。TD 缺省值为零, TR 和 TF 缺省值为瞬态分析的打印时间步长, 而 PW 和 PER 缺省为打印机时间终值, 后四个不能为零。若误取为零, 则程序自动以缺省值代替。

正弦源: SIN(VO VA Freq <TD> <a> <Phase>)

括号内分别为偏置值、幅值、频率、延迟时间、阻尼因子和相位。其中频率的缺省值为打印终值的倒数, 后二项缺省值为零。正弦源(图 6)取值表达式如下:

$$Vname = VO + VA \exp[-a \cdot (t - TD)] \sin[2\pi \cdot Freq \cdot (t - TD) + (PHASE/360)]$$

分段线性源: PWL(T1 V1 T2 V2 ... Tn Vn)

括号中 T1, T2, ... 为时间点, V1, V2 ... 为相应时间点的电源值, T_i 和 T_{i+1} 之间的值由 V_i 和 V_{i+1} 间用线性插值法得到。如图 7 所示。

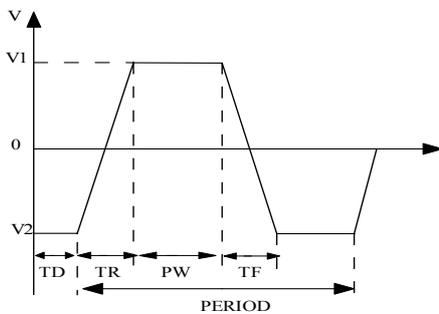


图 5 脉冲电源波形

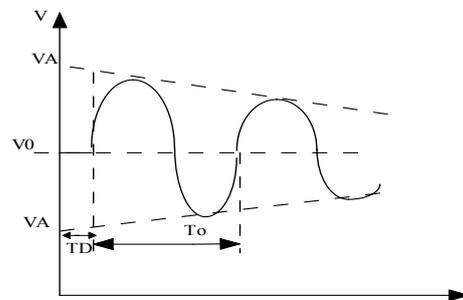


图 6 正弦电源波形

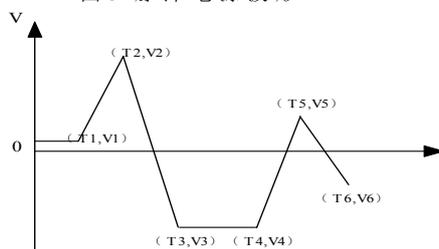


图 7 分段线性源波形

以上所列都是独立瞬态电压源, 将 V 改 I 即为独立瞬态电流源。

c、半导体器件

二极管

Dname N+ N- 模型名 <面积因子><OFF><IC=VD>

双极型晶体管

Qname N_C N_B N_E $\langle N_S \rangle$ 模型名 \langle 面积因子 $\rangle \langle$ OFF $\rangle \langle$ IC= V_{BE} , V_{CE} \rangle

结型场效应晶体管

Jname N_D N_G N_S 模型名 \langle 面积因子 $\rangle \langle$ OFF $\rangle \langle$ IC= V_{DS} , V_{GS} \rangle

MOS 场效应晶体管

Mname N_D N_G N_S N_B 模型名 \langle L=VAL, W=VAL \rangle

二极管、三极管、结型和 MOS 型场效应管分别以关键字 D、Q、J 和 M 开头。

d、子电路“伪元件”

一个子电路由 .SUBCKT 控制语句定义，格式如下所示：

```
.SUBCKT SUBNAME N1 N2 N3 ...  
Element statements  
.  
.  
.  
.ENDS SUBNAME
```

SUBNAME 是子电路的名字，N1, N2, N3 为子电路的外部节点，外部节点不能定义为 0。

子电路调用格式如下：

Xname N_1 $\langle N_2 \dots \rangle$ 子电路名

X 为关键字， N_1 、 $N_2 \dots$ 为伪元件节点，必须与调用子电路的外部端点一一对应。子电路名与器件模型名类似，指明所调用的子电路单元。

e、模型语句

MODEL 模型名 类型 \langle 参数 1=值 1 参数 2=值 2 $\dots \rangle$

模型名应与对应元件描述语句中所指相同。类型含七种：D；NPN、PNP；NJF、PJF；NMOS、PMOS，分别为二极管，双极型晶体管，结型场效应管和 MOS 场效应管。

二、实验内容

- 1、模拟半加器及一位全加器的瞬态特性。
- 2、模拟单端输入 MOS 反相器与五管 TTL 反相器电路的直流、交流和瞬态特性。
- 3、模拟由 3 非门单元构成的信号产生电路。

三、实验要求

- 1、掌握 ORCAD 软件的安装及软件使用方法；
- 2、检查逻辑功能是否正确，特别应检查是否存在冒险竞争等异常情况；
- 3、记录模拟中的数据，把有关特性曲线处理并打印输出。

四、思考题

- 1、在对单端输入 MOS 及五管 TTL 反相器电路进行瞬态分析时，求得的上升延时和下降延时是否相同？
- 2、由三个相同分立器件组成的非门电路能否构成一个信号产生电路？

五、参考资料

- 1、朱力恒、李乃夫等，电子技术仿真试验教程，电子工业出版社，2003。
- 2、贾新章等，ORCAD9.2 技术与应用软件，西安电子科大出版社，2002。

实验十五 运算放大电路应用电路的仿真与测试

集成运算放大器是广泛应用的集成放大器件。如果在其输入、输出端连接适当的元器件即可完成加、减、积分、微分、对数和反对数等运算，这些运算电路的搭配组合还可以完成乘、除法功能。利用其反馈特性还可用作正弦波、方波等信号的发生装置。

实验目的旨在学习和理解集成运算放大器的主要参数及应用，为设计、制造和应用集成运算放大器奠定基础。

一、集成运算放大器工作原理

1、电路参数

集成运算放大器主要性能参数有：输入失调电压 V_{OS} 、输入失调电流 I_{OS} 、开环差模放大倍数 A_V 、共模抑制比 $CMRR$ 、最大共模输入电压 V_{cimax} 和转换速率 SR 等。741、F007 管外引线排列如图 1 所示。使用的电源电压为 $V_+=15V$ ， $V_-=-15V$ 。

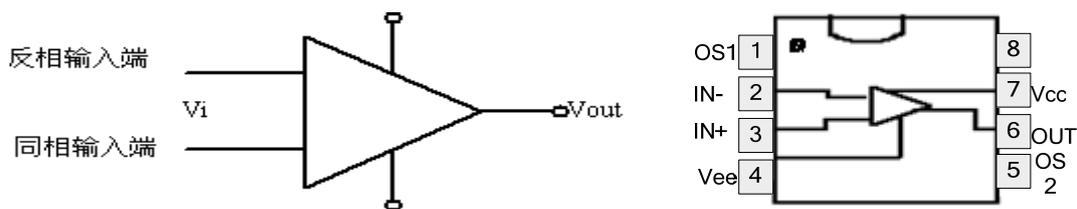


图 1 741、F007 管外引线排列图

2、电路应用

1) 加法运算电路

a、反相求和运算电路

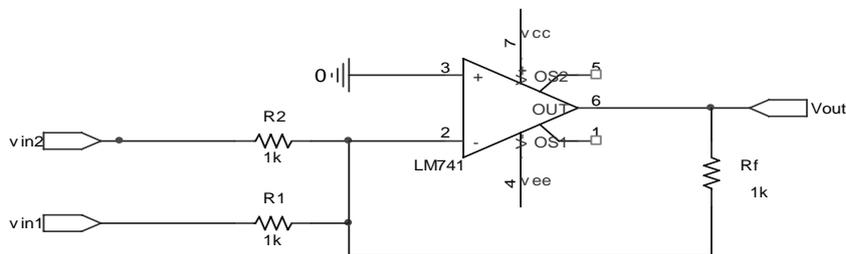


图 2 反相求和运算电路

反相求和运算电路的多个输入信号均作用于集成运放的反相输入端，如图 2 所示。 V_{out} 的表达式为：

$$V_{out} = -R_f \left(\frac{V_{in1}}{R_1} + \frac{V_{in2}}{R_2} \right)$$

若只有一个输入，则此电路完成的是反相比例运算电路，

V_{out} 与 V_{in} 成比例关系，即：

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R} V_{in}$$

b、同相求和运算电路

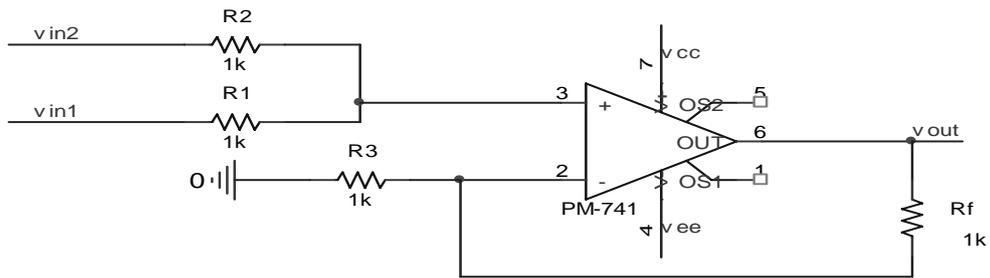


图3 同相求和运算电路

当多个输入信号同时作用于集成运放的同相输入端时，就构成同相求和运算电路，如图

3所示。 V_{out} 的表达式为：

$$V_{out} = R_f \left(\frac{V_{in1}}{R_1} + \frac{V_{in2}}{R_2} \right)$$

若只有一个输入，则此电路完成的是同相比例运算电路，

V_{out} 与 V_{in} 成比例关系，即：

$$V_{out} = \frac{R_f}{R} V_{in}$$

应当指出，虽然同相比例运算电路具有高输入电阻、低输出电阻的优点，但因为集成运放有共模输入，所以为了提高运算精度，应当选用高共模抑制比的集成运放。

2) 电压跟随器

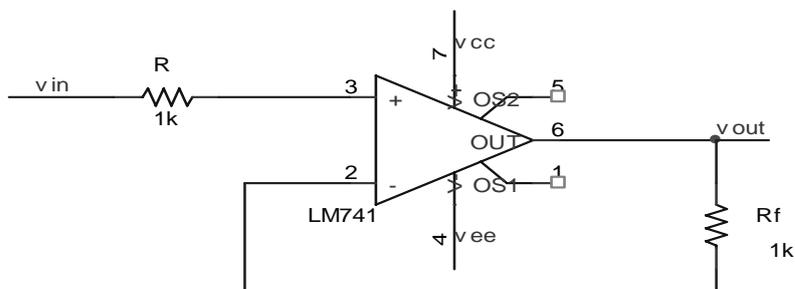


图4 电压跟随器

在同相比例运算电路中，若将输出电压的全部反馈到反相输入端，就构成图 4 所示的电压跟随器。

电路引入了电压串联负反馈，反馈系数为 1，故输出电压与输入电压的关系为 $V_{out} = V_{in}$ 。理想运放的开环差模增益为无穷大，电压跟随器具有比射极跟随器好的多的跟随特性。

3) 减法运算电路

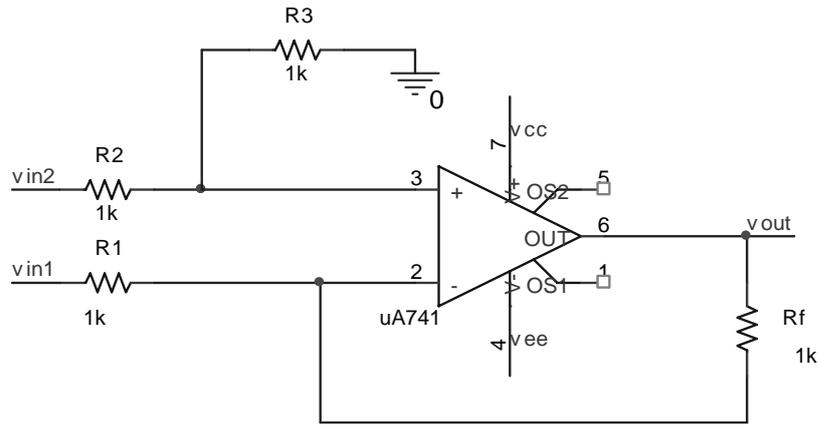


图 5 减法运算电路

图 5 所示是用来实现两个电压 V_{in1} 、 V_{in2} 相减的电路，从电路结构来看，它是反相输入和同相输入相结合的放大电路。如果选取电阻值满足 $R_f/R_1 = R_3/R_2$ 的关系，输出电压可表示为：

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_1} (V_{in2} - V_{in1})$$

即电路实现了对输入差模信号的比例运算，所以图 5 所示的电路实际上就是一个差分式放大电路。

4) 积分运算电路

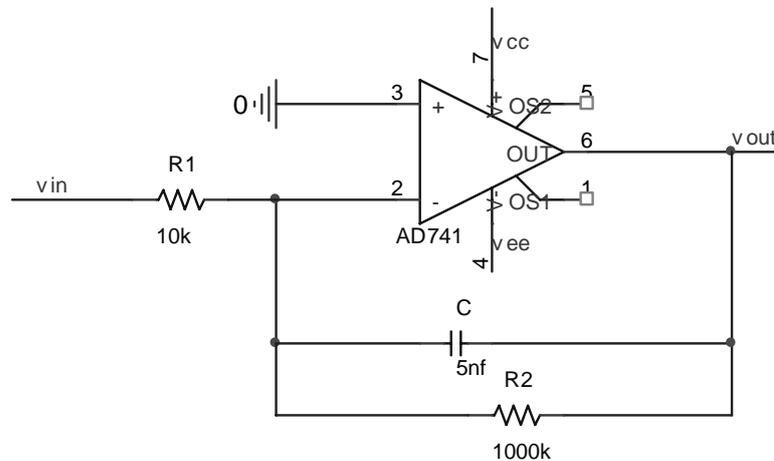


图 6 积分运算电路

积分电路如同 6 所示。利用虚地的概念： $V(2)=V(3)=0$ ，由于 R_2 的阻值较大，在分析时可将其忽略，电容 C 就以电流 $i=V_{in}/R_1$ 进行充电，假设电容器 C 初始电压为零，则 V_{out} 的表达式为：

$$V_{out} = -\frac{1}{R_1 C} \int V_{in} dt$$

5) 微分运算电路

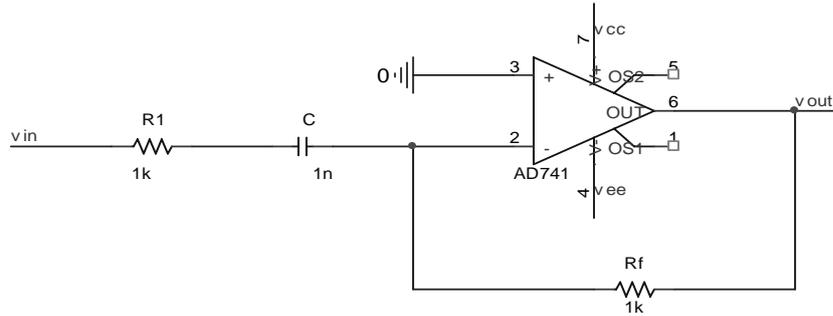


图 7 微分运算电路

若将图 6 所示电路中的电阻 R 和电容 C 互换，则得到基本微分运算电路，如图 7 所示。

输出电压为：

$$V_{out} = -R_f C \frac{dV_{in}}{dt}$$

6) 对数运算电路

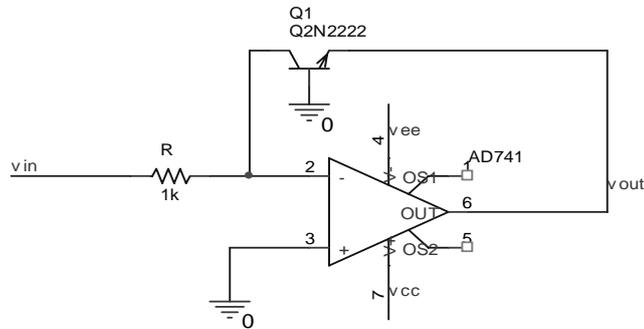


图 8 对数运算电路

如图 8 所示为采用三极管的对数运算电路，为使三极管导通，输入电压 V_{in} 应大于零。

输出电压为：

$$V_{out} = -V_T \ln \frac{V_{in}}{I_S R}$$

上式表明，运算关系与 V_T 和 I_S 有关，因而运算精度受温度的影响；而且，二极管在电流较小时内部载流子的复合运动不可忽略，在电流较大时内阻不可忽略；所以，仅在一定的电流范围才满足指数特性。

7) 指数运算电路

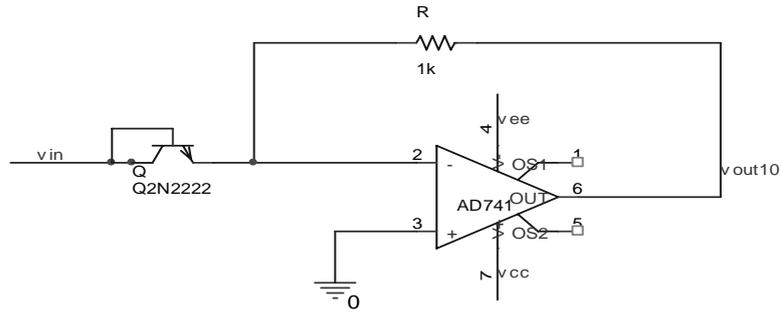


图 9 指数运算电路

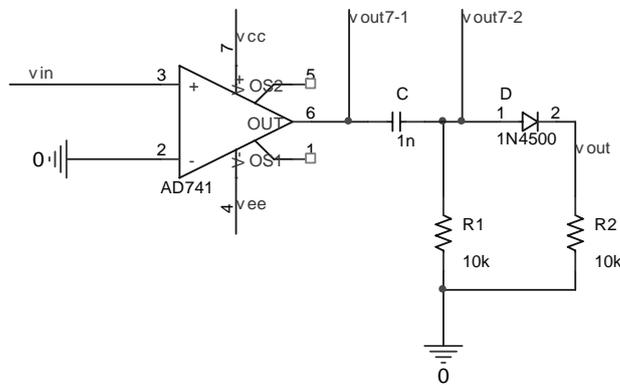
将图 8 对数运算电路中的电阻和三极管互换，便可得到指数运算电路，如图 9 所示。

输出电压为：

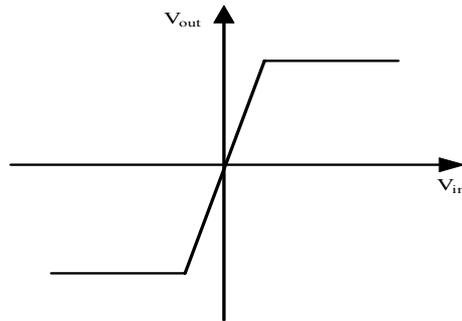
$$V_{out} = -I_S e^{\frac{V_{in}}{V_T}} R$$

8) 过零比较器

比较器是一种用来比较输入信号 V_{in} 和参考电压 V_{ref} 的电路，如果参考电压 $V_{ref}=0$ ，则输入信号电压 V_{in} 每次经过零时，输出就要产生突然的变化。这种比较器称为过零比较器，电路如图 10a 所示，其传输特性如图 10b 所示。



(a)



(b)

图 10 过零比较器 (a) 电路图 (b) 传输特性

9) 信号产生电路

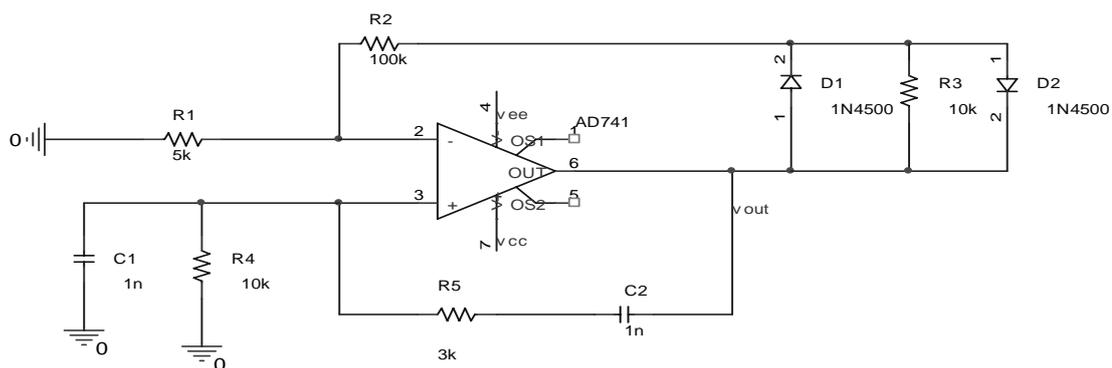


图 11 信号产生电路

如图 11 所示为一信号产生电路,可通过调整电容和电阻的值去改变所产生信号的周期。

二、实验内容

- 1、从以上所讲内容中选取 4~5 个应用电路进行模拟,实现逻辑功能并测试;(电源电压为±6V 下)
- 2、对比分析测试的数据及结果。

三、实验步骤和数据处理

- 1、测试各参数时按相应电路图接好元器件和所需仪器、电源,测试中避免电源短路;
- 2、按相应公式求出参数值并对应用电路进行分析。

四、注意事项

- 1、电路中的元件应尽量对称一致,以减少失调对测量结果的影响;
- 2、开环增益的测试频率应足够低,取 $20\text{Hz} \leq f \leq 40\text{Hz}$ 为宜;
- 3、CMRR 的测试频率不宜超过 5KHz,输入电压不能超过最大共模输入电压 V_{cimax} ;
- 4、SR 的测试频率应不大于 10KHz, V_s 的幅值应大于 1V;
- 5、测试中避免电源短路。

五、思考题

试说明测量 CMRR 时,为什么接在运算放大器正负端的电阻要求严格对称?

六、参考资料

- 1、康华光:电子技术基础(模拟部分)、高等教育出版社,1999.6。
- 2、朱力恒、李乃夫:电子技术仿真试验教程,电子工业出版社,2003。
- 3、童诗白、华成英:模拟电子技术基础,高等教育出版社,2001.6。
- 4、林吉申:三极管手册,福建科学技术出版社,2002。
- 5、林吉申:二极管手册,福建科学技术出版社,2002。

实验十六 数字电路版图设计

集成电路设计通常需要经历三个阶段：系统设计、电路设计和版图设计。版图设计是 IC 设计的重要一环，这也是 IC 设计的最后一个环节。

集成电路版图设计需要设计者具有电路系统与工艺制造方面的基础知识。它还需要设计者的创造性、空间想象力和耐性，需要设计者长期工作的经验和知识的积累，需要设计者对日新月异的集成电路发展密切关注和探索，总之，集成电路版图设计不仅仅是一门技术，也是一门艺术。

一、实验原理

1、版图及版图设计

版图表现了电路的物理形态，版图必须包含工厂制造掩膜所需的全部信息。实际的掩膜图形来自于对版图进行的逻辑及图形操作（比如逻辑或、与及尺寸的放大和缩小等）。版图还包含了电路元器件的内部连接。版图是一组相互套合的图形，各层版图对应于不同的工艺步骤，每一层版图用不同的图案来表示。另外，版图与所采用的制备工艺紧密相关。

版图设计就是按照线路的要求和一定的工艺参数，设计出元件的图形并进行排列互连，以设计出一套供 IC 制造工艺中使用的光刻掩膜版的图形，称为版图或工艺复合图。

版图设计是制造 IC 的基本条件，版图设计是否合理对成品率、电路性能、可靠性影响很大，版图设计错了，就一个电路也做不出来。若设计不合理，则电路性能和成品率将受到很大影响。版图设计必须与线路设计、工艺设计、工艺水平适应。作为一位版图设计者，首先，要熟悉工艺条件和器件物理特性，这样才能确定晶体管的具体尺寸，铝连线的宽度、间距、掩膜套刻精度等。其次，要对电路的工作原理有一定的了解，这样才能在版图设计中注意避免某些分布参量和寄生效应对电路产生的影响。同时还要熟悉调试方法，通过对样品性能的测试和显微镜观察，可分析出工艺中的问题。也可通过工艺中的问题发现电路设计和版图设计不合理之处，帮助改版工作的进行。特别是测试中发现某一参数的不合格，这往往与版图设计有关。

2、版图设计过程

大多数的版图设计是基于单元库实现的，目前的版图设计方法主要有三种：

(1) 自动化设计。在版图自动设计系统的数据库中，预先设计好各种结构单元的电路图、电路性能参数及版图，并有相应的设计软件。在版图设计时，只要将设计的电路图 (Netlist)

输入到自动设计系统中，再输入版图的设计规则和电路的性能要求，自动设计软件就可以进行自动布局设计、自动布线设计并根据设计要求进行设计优化，最终输出版图。

(2) 计算机辅助设计 (CAD)。在计算机辅助设计系统数据库中，预先存入版图的基本图形，形成图形库。设计者通过一定的操作命令可以调用、修改、变换和装配库中的图形，从而形成设计者所需要的版图。在整个设计过程中，设计者可以通过 CRT 显示，观察任意层次版图的局部和全貌；可以通过键盘、数字化仪器或光笔进行设计操作；可以通过画图机得到所要绘制的版图图形。利用计算机辅助设计，可以降低设计费用和缩短设计周期。

(3) 全人工版图设计：人工布图规划，提取单元，人工布局布线（由底向上：小功能块到大功能块），如图 1 所示。人工设计和绘制版图，有利于充分利用芯片面积，并能满足多种电路性能要求。但是效率低、周期长、容易出错，特别是不能设计规模很大的电路版图。因此，该方法多用于随机格式的、产量较大的 MSI 和 LSI 或单元库的建立。

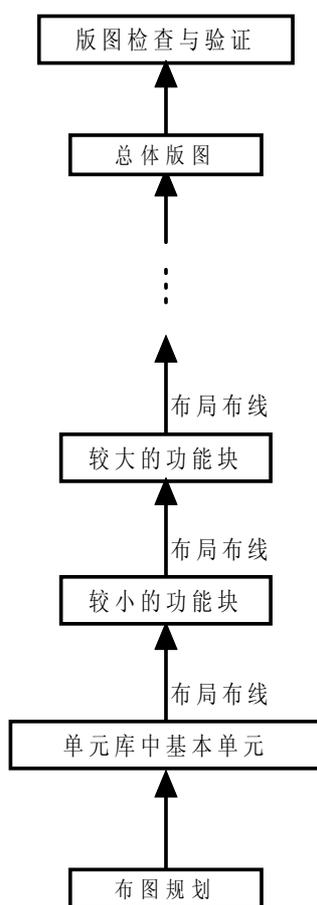


图 1 人工版图设计典型过程

3、版图设计的准备工作

在进行版图设计以前，必须进行充分的准备工作。一般包括以下几方面。

(1) 了解工艺现状，确定工艺路线，确定选用标准 pn 结隔离或对通隔离工艺或等平面

隔离工艺。由此确定工艺路线及光刻掩膜版的块数。由制版和光刻工艺水平确定最小接触孔的尺寸和光刻套刻精度。光刻工艺的分辨率，即能刻蚀图形的最小宽度，受到掩膜分辨率、光刻胶分辨率、胶膜厚度、横向腐蚀等多因素的限制。套刻精度与光刻机的精度和操作人员的熟练程度关系密切。要了解采用的管壳和压焊工艺。封装形式可分为金属圆筒塑(TO-5 型)、扁平封装型和双列直插型(DIP)等多种，管芯压点分布必须和管壳外引脚排列相吻合。当采用热压焊时，压焊点的面积只需 $70\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m}$ ，超声压焊需 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \sim 125\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ ，金丝球焊需 $125\ \mu\text{m} \times 125\ \mu\text{m}$ ，金丝球焊牢固程度高，金丝在靠近硅片压点处是垂直的，可压到芯片纵深处(但必须使用温度 SiO_2 纯化层)，使用起来很灵活。

(2) 解剖同类型的 IC 的产品，可作为自己设计和生产的借鉴。解剖工作包括版图分析和基本尺寸的测量，元件性能测试和工艺解剖和分析三个方面。通过版图分析和基本尺寸的测量可获得实际的线路图和逻辑功能图，可了解到版图布局，还可取得各种元件尺寸的数据以了解其它单位或国外制版和光刻水平。但应注意“侵权”问题。

4、IC 版图的设计规则

版图设计规则是指考虑器件在正常工作的条件下，根据实际工艺水平(包括光刻特性、刻蚀能力、对准容差等)和成品率要求，给出的一组同一工艺层及不同工艺层之间几何尺寸的限制，主要包括线宽、间距、覆盖、露头、凹口、面积等规则，分别给出它们的最小值，以防止掩膜图形的断裂、连接和一些不良物理效应的出现。

当前主要有两种设计规则：

(1) 微米设计规则。每个尺寸之间没有必然的比例关系，提高每一尺寸的合理度；简化度不高。目前一般双极集成电路的研制和生产，通常采用这类设计规则。在这类规则中，每个被规定的尺寸之间，没有必然的比例关系。这种方法的好处是各尺寸可相对独立地选择，可以把每个尺寸定得更合理，所以电路性能好，芯片尺寸小。缺点是对于一个设计级别，就要有一整套数字，而不能按比例放大、缩小。

(2) λ 设计规则。把大多数尺寸(覆盖，出头等等)约定为 λ 的倍数， λ 与工艺线所具有的工艺分辨率有关，线宽偏离理想特征尺寸的上限以及掩膜版之间的最大套准偏差，一般等于栅长度的一半。其优点是版图设计独立于工艺和实际尺寸。图 2 为设计规则定义中的几个常见设计规则类型的图解。

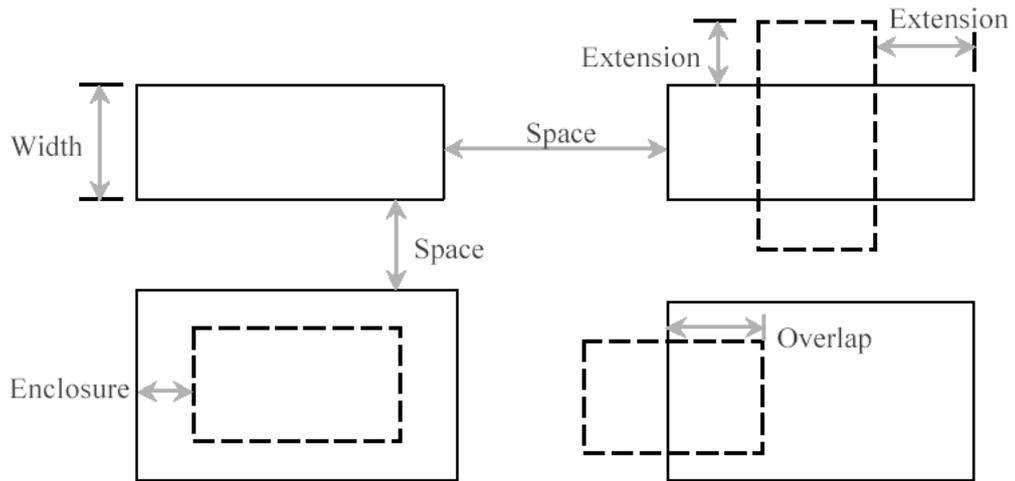


图 2 设计规则类型图解

二、实验内容

1、采用 $1\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺编辑一个 CMOS 反相器的版图，如图 3 所示。其中 NMOS 和 PMOS 晶体管的栅长 L 约为 $1\ \mu\text{m}$ (2λ)，栅宽 W 均为 $6\ \mu\text{m}$ 。（采用 λ 设计规则）

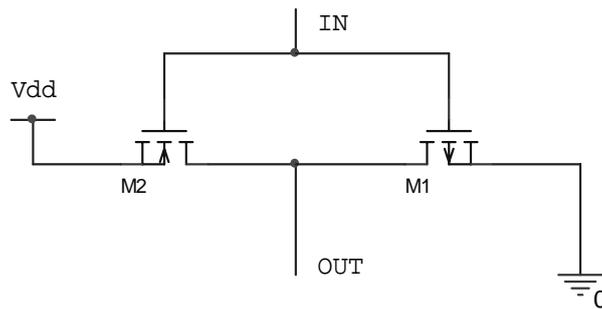


图 3 CMOS 反相器电路图

这里我们以 P 型衬底 N 阱 MOSIS/HP 1.0U SCN3M CMOS 工艺介绍。

实验步骤：

(1) 首先确定该工艺下的设计规则如表 1~表 5 所示（主要）：

表 1: 采用的阱 (Well) 规则

规则	描述	规则类型	λ
1.1	Well Minimum Width	Min width	10
1.2	Well to Well (Different Potential) Spacing	No check	
1.3	Well to Well (Same Potential) Spacing	Spacing	6

表 2: 采用的有源区 (Active) 规则

规则	描述	规则类型	λ
2.1	Active Minimum Width	Min width	3
2.2	Active to Active Spacing	Spacing	3
2.3a	Source/Drain Active to Well Edge	Surround	5
2.3b	Source/Drain Active to Well Space	Spacing	5
2.4a	WellContact(Active) to Well Edge	Surround	3
2.4b	SubsContact(Active) to Well Spacing	Spacing	3

表 3: 采用的多晶硅 (Poly) 规则

规则	描述	规则类型	λ
3.1	Poly Minimum Width	Min width	2
3.2	Poly to Poly Spacing	Spacing	2
3.3	Gate Extension out of Active	Extension	2
3.4/4.1	Source/Drain Width	Extension	3
3.5	Poly to Active Spacing	Spacing	1

表 4: 采用的金属 1 (Metal1) 规则

规则	描述	规则类型	λ
7.1a	Metal1 Minimum Width	Min width	3
7.1b	Tight Metal1 Max Width	Not exist	
7.2a	Metal1 to Metal1 Spacing	Spacing	3
7.2b	Tight Metal1 spacing	Spacing	2
7.2c	Tight Metal1 space to Metal1	Spacing	2
7.3	Metal1 Overlap of PolyContact	Surround	1
7.4	Metal1 Overlap of ActiveContact	Surround	1

表 5: 采用的接触孔 (包括 poly Contact、active Contact、Vial) 规则

规则	描述	规则类型	λ
5.1	Poly Contact Exact Size	Exact width	2
5.2a	FieldPoly Overlap of PolyCnt	Surround	1.5
5.2b	Not-Exists: PolyCnt_not_on_Poly	Not exist	
5.3	PolyContact to PolyContact Spacing	Spacing	2
6.1	Active Contact Exact Size	Exact width	2
6.2	FieldActive Overlap of ActCnt	Surround	1.5
6.3	ActCnt to ActCnt Spacing	Spacing	2
6.4	Active Contact to Gate Spacing	Spacing	2
8.1	Via1 Exact Size	Exact width	2
8.2	Via1 to Via1 Spacing	Spacing	3
8.3	Metal1 Overlap of Via1	Surround	1
8.4a	Via1 to PolyContact Spacing	Spacing	2
8.4b	Via1 to ActiveContact Spacing	Spacing	2
8.5a	Via1 to Poly Spacing	Spacing	2
8.5b	Via1(On Poly) to Poly Edge	Spacing	2
8.5c	Via1 to Active Spacing	Spacing	2
8.5d	Via1 (On Active) to Active Edge	Spacing	2

(2) 利用工具画版图，这里我们用 L-Edit，过程如下：

- <1> 首先画出 N 阱
- <2> 画有源区
- <3> 画多晶硅
- <4> 画 P⁺ 掺杂和 N⁺ 掺杂
- <5> 画接触孔
- <6> 画铝引线

若需要用两层金属，还需增加画通孔和二次铝引线两步。画完之后作 DRC 检查，DRC 检查无错误后，还需人工确定电路有无逻辑错误。所完成的版图如图 4 所示，器件截面图如图 5 所示。

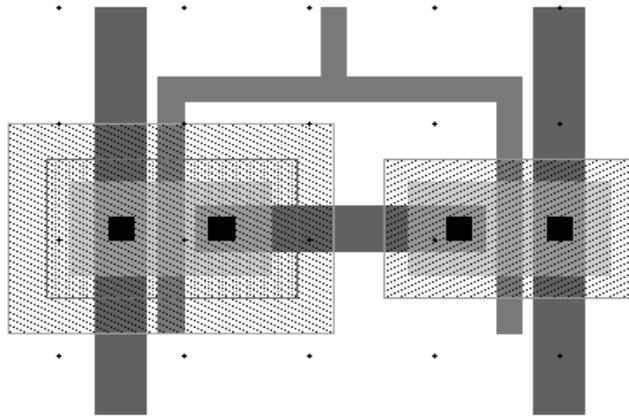


图 4 CMOS 反相器示例版图

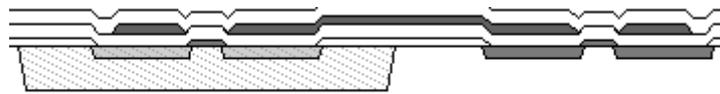


图 5 CMOS 反相器器件截面图

2、设计一个 CMOS 结构的或非门的版图，并作 DRC 验证：

- (1) 根据其逻辑关系，构建 CMOS 结构的电路图；
- (2) 利用 EDA 工具 L-Edit 画出其相应版图；
- (3) 利用几何设计规则文件进行在线 DRC 验证并修改版图。

三、实验要求

- 1、按照设计规则进行设计，注意版图布局要合理；
- 2、元件的尺寸按照上述条件和设计规则来确定。

四、注意事项

- 1、多晶硅只能用于信号线的连接；
- 2、布线最小化，特别是高阻抗节点之间的连接；
- 3、采用对称结构，如果有必须应采用中心对称方式；
- 4、注意匀称，比如等高，均匀摆放，特别注意有源器件；
- 5、晶体管必须是直的，禁止拐弯；
- 6、分开输入，输出线，避免出现回路；
- 7、使用规则的图形；
- 8、保持版图方向的一致。

实验十七 MOS 结构高频 C-V 特性测试

MOS 结构电容-电压特性（简称 C-V 特性）测量是检测 MOS 器件制造工艺的重要手段。它可以方便地确定二氧化硅层厚度 d_{ox} 、衬底掺杂浓度 N、氧化层中可动电荷面密度 Q_I 和固定电荷面密度 Q_{fc} 等参数。

本实验目的是通过测量 MOS 结构高频 C-V 特性及偏压温度处理（简称 BT 处理），确定 d_{ox} 、N、 Q_I 和 Q_{fc} 等参数。

一、实验原理

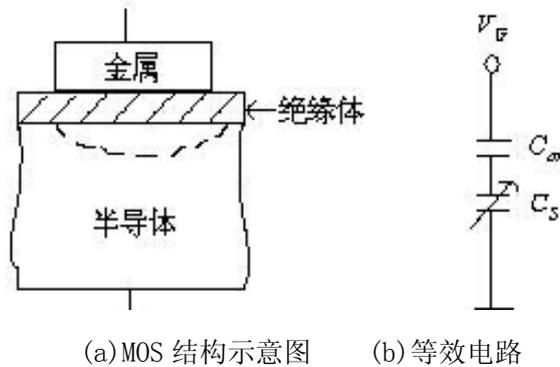


图 1 MOS 结构

MOS 结构如图 1 (a) 所示，它类似于金属和介质形成的平板电容器。但是，由于半导体中的电荷密度比金属中的小得多，所以充电电荷在半导体表面形成的空间电荷区有一定的厚度（一微米量级），而不像金属中那样，只集中在—薄层（—0.1nm）内。半导体表面空间电荷区的厚度随偏压 V_G 而改变，所以 MOS 电容是微分电容

$$C = A \frac{dQ_G}{dV_G} \quad (1)$$

式中 Q_G 是金属电极上的电荷面密度，A 是电极面积。现在考虑理想 MOS 结构。所谓理想情形，是假设 MOS 结构满足以下条件：（1）金属与半导体间功函数差为零；（2） S_iO_2 绝缘层内没有电荷；（3） S_iO_2 与半导体界面处不存在界面态。偏压 V_G 一部分降在 S_iO_2 上，记作 V_{ox} ；一部分降在半导体表面空间电荷区，记作 V_s ，

$$V_G = V_{ox} + V_S \quad (2)$$

V_S 又叫表面势。考虑到半导体表面空间电荷区电荷和金属电极上的电荷数量相等、符号相反, 有

$$|Q_{SC}| = |Q_G| \quad (3)$$

式中 Q_{SC} 是半导体表面空间电荷区电荷面密度。将式 (2)、(3) 代入式 (1),

$$C = A \frac{dQ_G}{dV_G} = A \frac{dQ_G}{dV_{ox} + dV_S} = \frac{1}{\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_S}} = \frac{C_{ox} C_S}{C_{ox} + C_S} \quad (4)$$

式(4)表明 MOS 电容由 C_{ox} 和 C_S 串联构成, 其等效电路如图 1(b) 所示。其中 C_{ox} 是以 S_iO_2 为介质的氧化层电容, 它的数值不随 V_G 改变; C_S 是半导体表面空间区电容, 其数值随 V_G 改变, 因此

$$C_{ox} = A \left| \frac{dQ_G}{dV_{ox}} \right| = A \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ro}}{d_{ox}} \quad (5)$$

$$C_S = A \left| \frac{dQ_{SC}}{dV_S} \right| \quad (6)$$

式中 ϵ_{ro} 是 S_iO_2 相对介电常数。

p 型衬底理想 MOS 结构高频 C-V 特性曲线如图 (2) 所示。

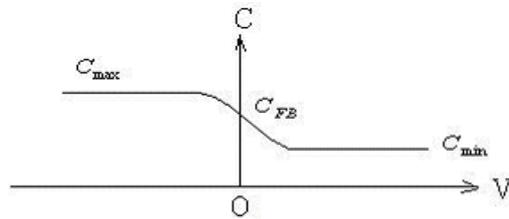


图 2 p 型衬底理想 MOS 结构高频 C-V 特性

图 2 中 V 代表偏压 V_G 。最大电容 $C_{max} \approx C_{ox}$, 最小电容 C_{min} 和最大电容 C_{max}

之间有如下关系[1]:

$$\frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ro}}{\epsilon_{rs} d_{ox}} \left(\frac{4\epsilon_0 \epsilon_{rs} kT}{q^2 N} \ln \frac{N}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

式中 ϵ_{rs} 是半导体的相对介电常数。

$V_S = 0$ 时，半导体表面能带平直，称为平带。平带时的 MOS 电容称为平带电容，记作 C_{FB} 。对于给定的 MOS 结构，归一化平带电容由下式给出^[1]：

$$\frac{C_{FB}}{C_{ox}} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ro}}{\epsilon_{rs} d_{ox}} \left(\frac{kT \epsilon_0 \epsilon_{rs}}{q^2 N} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

平带时所对应的偏压称为平带电压，记作 V_{FB} 。显然，对于理想 MOS 结构， $V_{FB} = 0$ 。

现在考虑实际的 MOS 结构。由于 S_iO_2 中总是存在电荷（通常是正电荷），且金属的功函数 W_m 和半导体的功函数 W_S 通常并不相等，所以 V_{FB} 一般不为零。若不考虑界面态的影响，有

$$V_{FB} = -\frac{AqQ_{ox}}{C_{ox}} - V_{mS} \quad (9)$$

式中 Q_{ox} 是 S_iO_2 中电荷的等效面密度，它包括可动电荷 Q_I 和固定电荷 Q_{fc} 两部分。“等效”是指把 S_iO_2 中随机分布的电荷对 V_{FB} 的影响看成是集中在 $S_i-S_iO_2$ 界面处的电荷对 V_{FB} 的影响。 V_{mS} 是金属-半导体接触电势差，

$$V_{mS} = \frac{W_S - W_m}{q} \quad (10)$$

对于铝栅 p 型硅 MOS 结构， V_{mS} 大于零， Q_{ox} 通常也大于零（正电荷），所以 $V_{FB} < 0$ ，如图 3 中的曲线 1 所示。作为对比，图中还画出了相应的理想曲线（曲线 0）。

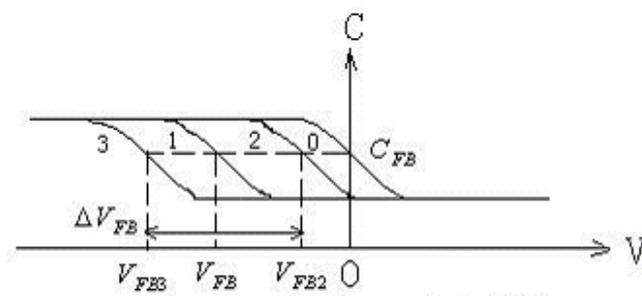


图 3 铝栅 p 型结构高频 C-V 特性

利用正、负偏压温度处理的方法（简称±BT处理）可将可动电荷 Q_I 和固定电荷 Q_{fc} 区分开来，负BT处理是给样品加一定的负偏压（即 $V_G < 0$ ），同时将样品加热到一定的温度。由于可动电荷（主要是带正电的 Na^+ 离子）在高温下有较大的迁移率，它们将在高温负偏压条件下向金属- S_iO_2 界面运动。经过一定的时间，可以认为 S_iO_2 中的可动电荷基本上全部运动到金属- S_iO_2 界面处。保持偏压不变，将样品冷却至室温，然后去掉偏压，测量高频C-V特性，得到图3中的曲线2。由于这时可动电荷已经全部集中到金属- S_iO_2 界面处，对平带电压没有影响了，根据（9）式可得

$$Q_{ox} = Q_{fc}$$

$$V_{FB2} = -\frac{AqQ_{fc}}{C_{ox}} - V_{mS} \quad (11)$$

若 V_{mS} 已知，由式（11）可以确定 S_iO_2 中的固定电荷面密度

$$Q_{fc} = -\frac{C_{ox}(V_{mS} + V_{FB2})}{Aq} \quad (cm^{-2}) \quad (12)$$

改变偏压极性，作正BT处理，加热的温度和时间与负BT相同。正BT处理后，测量高频C-V特性，得到图3中的曲线3。由于这时可动电荷已基本上全部集中到 $S_i - S_iO_2$ 界面处，所以 V_{FB3} 中包含了 Q_I 和 Q_{fc} 的影响。根据式（9）和式（11）

$$Q_{ox} = Q_I + Q_{fc}$$

$$V_{FB3} = -\frac{AqQ_I}{C_{ox}} - \frac{AqQ_{fc}}{C_{ox}} - V_{mS} = -\frac{AqQ_I}{C_{ox}} + V_{FB2} \quad (13)$$

令 $\Delta V_{FB} = |V_{FB2} - V_{FB3}|$ ，由式（13）可确定可动电荷面密度

$$Q_I = \frac{C_{ox}\Delta V_{FB}}{Aq} \quad (cm^{-2}) \quad (14)$$

本实验所用仪器设备主要包括三部分：测试台（包括样品台、探针、升温 and 控温装置等）、高频（1MHz或更高）C-V测试仪和X-Y函数记录仪。实验装置如图4所示。

样品制备中衬底材料、电极面积、氧化层厚度以及电极材料等，均可根据现有的材料

和具体工艺条件而定。例如，p 型或 n 型硅单晶抛光片，电阻率 $6\text{--}10\ \Omega\cdot\text{cm}$ 。干氧化，氧化层厚度约为 100nm 。铝电极或多晶硅电极，面积为 $2\times 10^{-8}\ \text{cm}^2$ 。为了保证样品和测试台之间有良好的欧姆接触，最好在样品背面蒸上铝。最后，在 $400\text{--}450^\circ\text{C}$ forming gas (10% H_2 、30% N_2 的混合气体) 中退火 30 分钟，起合金和减少界面态的作用。

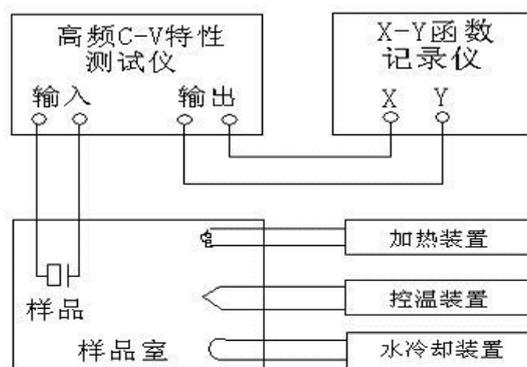


图 4 高频 C-V 特性测量装置示意图

在上面的讨论中，我们忽略了界面态的作用。事实上，界面态可以从两个方面影响 MOS C-V 特性：界面态电荷对偏压的屏蔽作用和界面态的电容效应。当偏压 V_G 改变时，表面势 V_S 改变，因而费米能级在禁带中的位置发生改变，界面态的填充几率就要发生变化，界面态电荷 Q_{SS} 随之发生变化。这就是说， Q_{SS} 是偏压 V_G 的函数。这和 Q_I 、 Q_{fc} 不同，它们不随 V_G 而改变。 Q_I 、 Q_{fc} 的作用只是影响平带电压，使实际 C-V 曲线相对于理想曲线在形状上发生改变。比如常见到的曲线拖长、平台等现象。另一方面，在 C-V 测量中，我们是在偏压 V_c 上迭加交流小信号 dV_c 。 dV_c 引起 dV_s ，从而引起 dQ_{SS} 。所以界面态的作用又可以

$$\text{表现为电容 } C_{SS} = A \left| \frac{dQ_{SS}}{dV_s} \right|$$

由于界面态是通过和体内交换电子来实现充放电的，它的时间常数较长，通常大于 $10^{-6}\ \text{s}$ ，所以界面态电容只在低频或准静态情形下对 MOS 电容有贡献。对于 1MHz 的高频 C-V 测量，通常不考虑界面态电容的影响。

界面态对 C-V 曲线的影响取决于界面态的具体性质，比如态密度 $N_{SS}\ (\text{cm}^{-2}\cdot\text{eV}^{-1})$ 、时间常数 τ_{SS} 等。这些性质因样品而异，所以界面态的影响比较复杂。前面提到的 forming gas 退火是减少界面态的有效方法。经过这种退火处理，禁带中部的界面态密度可降低到

$10^{10} (cm^{-2} \cdot eV^{-1})$ 量级以下，对高频 C-V 测量的影响可以忽略。

最后还要特别指出，对于掺杂浓度不是很高 ($10^{15} / cm^3$ 或更低) 的 p 型 MOS 样品，高频 C-V 特性会出现 C_{mn} 不稳定现象，如图 5 所示。其原因是场区 (电极以外的区域) 存在反型层和正偏压时的正电荷侧向铺伸效应^[2]。在这种情况下，为了正确测量 C_{mn} ，从而正确求出衬底掺杂浓度等参数，必须采取措施防止场区反型层的形成。常用的办法是在电极周围再制作一个环型电极 (隔离环)。测试时，环上加一定的负电压，使之屏蔽其下氧化层中的正电荷，达到抑制场区反型的目的。对于硅栅 MOS 结构，可以用场区离子注入浓硼的办法防止场区反型。

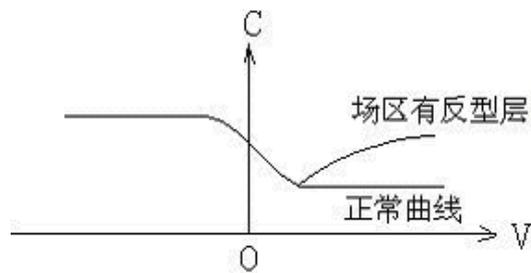


图 5 场区反型层对高频 C-V 特性的影响

最近的研究结果表明，禁带中靠近导带底或价带顶附近的界面态，其时间常数可以是微秒量级，因此，即使在 1MHz 的高频 C-V 测量中，也不能忽略界面态电容的作用。

二、实验内容

1. 测量初始高频 C-V 特性曲线；
2. 作正、负 BT 处理；
3. 分别测出正、负 BT 处理后的高频 C-V 特性曲线。

三、实验步骤

1. 打开各仪器的电源，预热 10 分钟；
2. 确定 X-Y 记录仪的零点和量程；
3. 根据被测量样品的最大电容数值 (用已知的电极面积和氧化层厚度进行估算) 选择 C-V 测试仪相应的电容量程，并按照仪器说明书的规定对所选择的电容量程进行校正；
4. 根据样品的少数产生寿命确定偏压 C-V 曲线，如图 6 所示。通常可选用每秒 100mV 的速率，如果仍得到深耗尽的曲线，则应将速率再放慢，直至得到稳态 C-V 曲线；

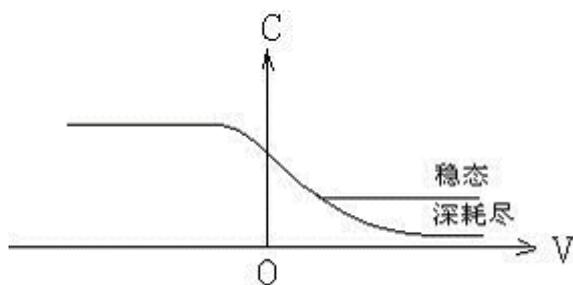


图 6 深耗尽 C-V 曲线

5. 作 BT 处理, 条件是: $150\text{--}200^\circ\text{C}$, 恒温 10 分钟。偏压 V_G 的数值根据氧化层厚度来计算, 一般认为氧化层中的电场达到 10^6V/cm 可以实现可动离子有效的迁移。若 $d_{ox} = 100\text{nm}$, 取 $V_G = +10\text{V}$ (正 BT 处理) 或 $V_G = -10\text{V}$ (负 BT 处理)。至于先作正 BT 还是先作负 BT, 并无特别的规定, 通常是先作负 BT。正、负 BT 处理之后, 分别测量高频 C-V 特性曲线。

四、数据处理和分析

1. 由初始 C-V 曲线, 可获得 C_{\max} 和 C_{\min} 。利用式 (5) 和 (7) 可求出氧化层厚度 d_{ox} 和衬底掺杂浓度 N ;
2. 利用式 (8) 求出 C_{FB} ;
3. 由实验曲线确定 V_{FB2} 、 V_{FB3} 和 ΔV_{FB} ;
4. 查表或计算求出 V_{mS} ;
5. 利用式 (12) 和 (14) 分别求出 Q_{fc} 和 Q_I ;
6. 如果 Q_{fc} 或 Q_I 较大 ($10^{11}/\text{cm}^2$ 量级或更大), 分析一下原因 (比如硅片清洗不干净, 氧化系统有玷污等等), 进而提出改进措施;
7. 如果 C-V 曲线形状异常, 可以配合界面态的测量来分析原因。

五、思考题

下列情况对高频 C-V 特性有什么影响? 为什么?

1. 偏压 V_G 的扫描速率太快。
2. $S_i - S_iO_2$ 界面处有较多的界面态。
3. MOS 样品的背面 (衬底) 和测试台接触不好。

4. p 型样品，场区有反型层。
5. 金属- S_iO_2 界面处有可动离子陷阱，对正、负 BT 处理后得到的 ΔV_{FB} 有什么影响？

对同一样产品，反复作 BT 处理， ΔV_{FB} 有什么变化？

6. 光照对高频 C-V 有什么影响？解释其原因。
7. BT 处理过程中，为什么偏压要始终加在被测样品上？

六、参考文献

- [1] 刘恩科、朱秉升，半导体物理学，国防工业出版社，1979.
- [2] 马鑫荣、田立林、李志坚，半导体学报，第 2 卷，第 4 期，288. 1981.

实验十八 模拟集成电路设计与仿真

在当前的集成电路设计领域，模拟集成电路设计是公认的难点。SPICE 是目前模拟和数模混合集成电路设计中最为重要和通用的设计工具。而 CMOS 工艺也已经成为目前模拟和数模混合集成电路制造的主流工艺。因此，为了更好的提高同学们的设计能力和对知识的掌握，本实验并没有选择数字集成电路设计和双极型模拟集成电路设计作为任务，而是选择了 CMOS 工艺和模拟集成电路基本单元作为任务。

实验目的是熟练掌握 SPICE 电路模拟与仿真技术。

一、实验原理

本实验利用 SPICE 进行电路设计与仿真。首先大家要熟悉 SPICE 的用法。下面以 CMOS 反相器为例，介绍一下 SPICE 模拟电路的过程。

图 1 给出了一个 CMOS 反相器的电路图。图中有两个 MOS 管，要模拟该反相器电路，首先要在电路上标识节点（如图中的 0、VDD、In、Out），其中 0 为默认的接地节点。

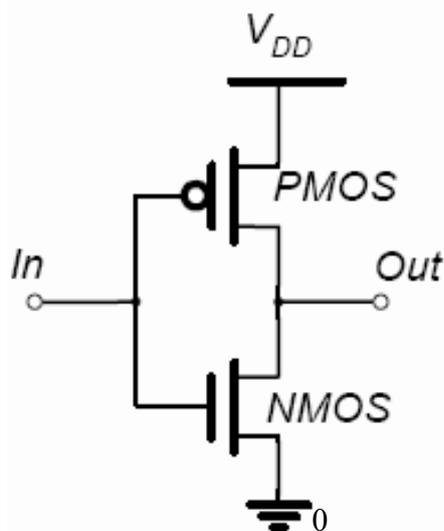


图 1 CMOS 反相器电路图

所编辑的 SPICE 输入文件，如下：

```
CMOS  INVERTER
```

```
VDD  VDD  0  6V
```

```
VIN  In  0  0V
```

```
M1  Out  In  VDD  VDD  PCH  W=40U  L=20U
```

```
M2  Out  In  0  0  NCH  W=20U  L=20U
```

```

* model defination
.MODEL NCH NMOS LEVEL=2 LD=0.15U TOX=200.0E-10 NSUB=5.37E+15
+ VTO=0.74 KP=8.0E-05 GAMMA=0.54 PHI=0.6 U0=656 UEXP=0.157 UCRIT=31444
+DELTA=2.34 VMAX=55261 Xj=0.2U LAMBDA=0.037 NFS=1E+12 NEFF=1.001
+NSS=1E+11 TPG=1.0 RSH=70.00 CGDO=4.3E-10 CGSO=4.3E-10 Cj=0.0003 Mj=0.66
+ CJSW=8.0E-10 MJSW=0.24 PB=0.58
.MODEL PCH PMOS LEVEL=2 LD=0.15U TOX=200.0E-10 NSUB=4.33E+15
+ VTO=-0.74 KP=2.70E-05 GAMMA=0.58 PHI=0.6 U0=262 UEXP=0.324 UCRIT=65720
+DELTA=1.79 VMAX=25694 Xj=0.25U LAMBDA=0.061 NFS=1E+12 NEFF=1.001
+NSS=1E+11 TPG=1.0 RSH=121.00 CGDO=4.3E-10 CGSO=4.3E-10 Cj=0.0005 Mj=0.51
+ CJSW=1.35E-10 MJSW=0.24 PB=0.64

.OPTIONS POST NUMDGT=8
.DC VIN 0 6 0.5 VDD 6 10 1
.TRAN .1U 10U
.PRINT DC V(VIN) V(VOUT) I(VDD)
.END

```

从上述 SPICE 输入文件可以看出，第一行为标题行，是一段注释文字，通常用来描述电路功能；从第二行开始进入电路的描述部分，首先描述电路的连接关系，然后描述晶体管模型，接着是电路分析语句，结束行必须是“.END”。

由于该反相器电路和本实验要仿真的误差放大器都是只涉及 MOSFET 晶体管，因此，下面对 MOSFET 的 SPICE 描述语句作一详细介绍。

表 1 MOS 模型的重要的 SPICE 参数

SPICE 参数	模型常数	简要描述
VTO	V _{tn} :V _{tp}	晶体管阈值电压
UO	μ_n : μ_p	载流子的迁移率
TOX	t _{ox}	栅极氧化物的厚度
LD	L _D	栅极下结的横向扩散长度
GAMMA	γ	体效应系数
NSUB	N _A :N _D	衬底杂质
PHI	2 Φ_F	表面反转电势
PB	Φ_0	体 p-n 结势垒
CJ	C _{j0}	0V 偏置下的结—耗尽电容
CJSW	C _{j-sw0}	0V 偏置下的侧壁电容
MJ	m _j	主体—结指数（缓变系数）
MJSW	m _{j-sw}	侧壁—结指数（缓变系数）
LAMBDA	λ	沟道长度调制因子

MOSFET 描述语句：

M<name> <drain node> <gate node> <source node> <bulk/substrate node>

+ <model name> L=<value> W=<value>

其中，L 为栅长，W 为栅宽。

例如：M1 Out In VDD VDD PCH W=40U L=20U

MOS 模型中的一些重要的模型参数归纳在表 1 中。

从表 1 可以看出，用于表征 MOSFET 的模型参数很多。当然，在实际的电路描述过程中，我们没有必要把所有模型参数一一确定，只要给出几个关键模型参数的值，系统将自动调用缺省值。

二、实验内容

本实验的目标是设计误差放大器，如图 2 所示。误差放大器电路主要作用是将输入电压与基准电压源提供的基准电压进行比较，将两者的差值进行放大输出。它主要由一个带有源电流镜的差动对和一个电流漏组成。

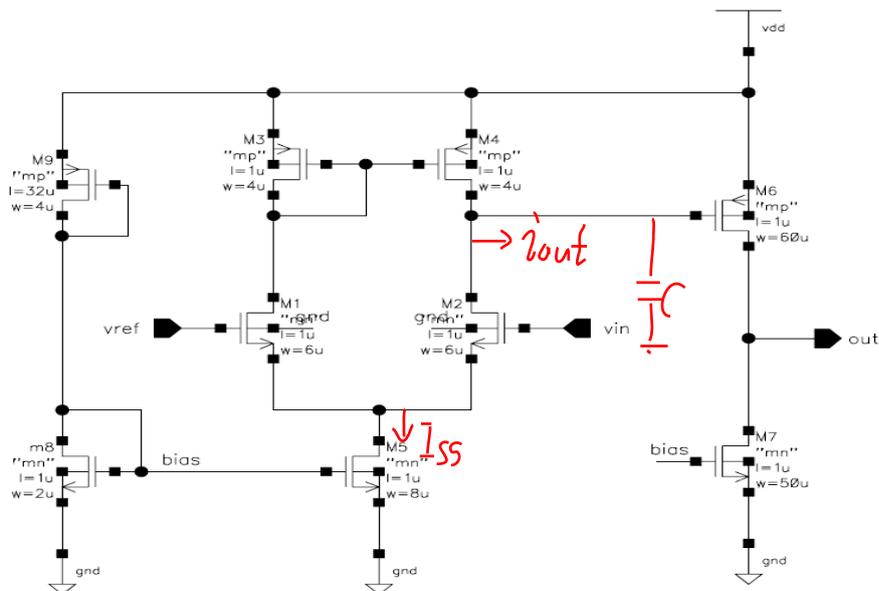


图 2 误差放大器电路图

在图 2 中，放大器的两个输入端为 V_{in} 和 V_{ref} ，输出端为 V_{out} 。图中已经给出每个 CMOS 晶体管的宽长比 W/L 。电源电压 V_{DD} 为 3.3V。

三、实验要求

电路模拟的具体要求：

1) DC 特性分析；

使用 HSPICE 对该电路进行仿真，在输入端施加一系列的输入信号，模拟该电路的 DC 特性，绘制出输入信号和输出信号的曲线；找出该电路能正常工作的最低工作电压。

- 2) 交流特性分析, 要求该误差放大器的开环直流增益达到 60dB 以上;
- 3) 瞬态特性分析。

四、 实验数据处理

实验数据应该包含实验的整个过程描述, 包括电路描述(网表)、仿真结果及结果分析。

五、 参考资料

- [1] David A. Johns、Ken Martin 著.模拟集成电路设计.北京:机械工业出版社,2005 年 7 月
- [2] 毕查德·拉扎维. 模拟 CMOS 集成电路设计.西安:西安交通大学出版社,2003 年 2 月
- [3] Star-Hspice Manual, Release 2001.2, June 2001

实验十九 微电子芯片、分立器件解剖及图形观察

一般的集成电路由二极管、MOS 场效应管、双极性三极管、功率管、电容器、电阻器和互连线组成。一个例子是计算机处理器，如 INTEL 公司的 P4 CPU 模块，封装了 8700 万只晶体管，这是复杂的集成电路模块。随着集成电路的快速发展，大规模、超大规模集成电路应用极为广泛。作为微电子相关专业学生有必要对芯片的解剖有所了解，为分析产品提出一个较为完整的线路图、版图及工艺剖析报告。

本实验目的是通过金相显微镜，测微目镜等设备对解剖器件进行观察、测绘，了解电路结构和元器件在电路中的图形，尺寸，并提供器件解剖报告。

一、实验原理

1. 管芯解剖的一般过程

在开启器件封装以前，需要对器件进行性能检测。如果没有产品说明书及参考资料，可作一些试探性的预测。打开管壳，对芯片拍照并放大。用照片和显微镜识别集成元器件、布局布线，提取线路图。测读芯片表面尺寸——横向工艺解剖。测量集成电路上元器件参数。纵向工艺解剖——磨角测量芯片纵向结构。分析、总结并绘制出包括被分析产品的线路图、逻辑图、版图，并作出工艺解剖报告。

2. 开壳和拍照

打开管壳不能损伤芯片。通常有机械和化学两种方法：如是金属封装的，应先挫开管壳边缘后方可打开；陶瓷或非金属材料封装的，可以先在沸腾的醋酸中浸 5~10 分钟，待粘接胶软化后，用手术刀撬开盖板，对于金属烧结在底座上的芯片经加热后再用刀撬下。

化学法是以热硫酸溶去塑料封装外壳，取得芯片。但由于温度不当会损伤破坏铝布线图形，影响版图清晰度，所以应尽量采用机械开壳方法。

开壳后，拍摄一张层次清楚的芯片显影相，以便版图分析，照片要有较大反差。用彩照有利于层次分辨。待拍照芯片表面应先蒸铝或先去除表面钝化层及铝层后再蒸铝，然后拍显微照，该方法可以提高反差，改善清晰度。对于一些集成度高，工艺结构比较复杂的集成电路芯片，除了要求芯片照片有足够的放大倍数外，更重要的是希望能从照片中清楚地辨识出工艺过程各次光刻区域。再按传统办法对芯片拍显微照。由硼、磷等杂质扩散后的氧化层台阶所形成的线条在黑白照片中是不清晰的，尤其是在各区氧化层颜色较深时，更难区分。由于这些台阶线条是氧化层和硅，反射光较弱，显微镜调焦很难改善反差而用高反差底片，但

会有一些图形不显影。“芯片蒸铝”预理解决了这一困难。对于IC芯片表面钝化层，无钝化层和表面铝层损伤等情形均可进行。实验发现，当除去钝化膜和铝布线后再蒸铝拍照，其下面图形更加清晰。这是由于金相显微镜下光刻台阶斜面上的反射不能被物镜收集。经过垂直入射到芯片上的光线在台阶斜面被反射出物镜视场，故看到的台阶是黑线。扩散区表面SiO₂层反射率较低，而且产生透明薄膜干涉，当膜厚d和入射光波长满足干涉条件：

$$d = (2K+1) \lambda / 4n \quad (K=0, 1, 2, \dots)$$

时，反射光中这种波长的光强度变为最弱。加上硅材料对可见光成分有一定吸收，显微观察扩散区或岛区表面反差较小，背景暗，清晰度难以提高，而经蒸铝预处理之后的芯片表面，由于均匀光亮的铝表面，在可见光范围内反射率可达90%，提高了除台阶外之区域的亮度，因此图象反差变大，线条清晰且不易受氧化层颜色和片表面亮度的影响。

3. 版面分析

版面分析包括：从芯片总图（放大照片拼成）上识别集成元器件和布局布线，从而得到电路图和逻辑图；测量版面各元器件横向尺寸；掌握版面设计思想和制版，光刻等工艺。

在器件已经识别，线条能够分辨的前提下，用精度为1微米的读数显微镜很容易取得各种元器件尺寸；对于不同类型的LSI应注意相应的基本图形尺寸及设计规则。

随着技术的进步，芯片上最小图形尺寸在不断缩小，国际先进水平最小线宽已达亚微米级。国内双极型IC的一般生产水平如表1所示：

表1 国内双极型IC生产水平(单位 μ m)

埋层到隔离墙	18	发射极接触至发射区	5	短金属条之间最小间距	8
集电极接触到隔离槽	17	基区接触至发射区	7	最小图形尺寸	8*8
基区扩散到隔离槽	17	基区至发射区	6	发射区至发射区间距	6
集电极接触至基区	10	最小金属条宽	10	基区至基区间距	8
基区接触至基区	5	金属条之间最小间距	10	压焊点最小面积	100*100

一般线性IC芯片集成密度较低，元件较大，相机分析相对容易，但要注意一些特殊元件，例如超β输入管，横向，纵向PNP管，多射级，多集电极管，J-FET，齐纳管等。由于设计形式繁多，识别它们需要一定的分析判别能力和不断的经验积累。

(1) 磨角

磨角器是纵向层深浅，以1~5度为宜。磨角要求剖面光洁。500倍镜下无明显划痕。芯片表面与斜剖面相交线—磨角线必须平直清楚。采用M5或M&金刚砂打毛的制版玻璃。芯片

贴在磨角器斜面上，边冲水边贴合在毛玻璃上均匀用力来回磨片，1~2 分钟后即可。钝化层和氧化层磨角后，即可直接用干涉法测量，而扩散层和外延层深度必须着色显示后才能观测。

(2) 着色

1) 化学染色法：磨好样品后用丙酮冲洗三次，洗净后浸入染色液，用 100W 白炽灯贴近液面照 20~30s，P 区变黑。若磷扩区呈深黑色，表示 HNO_3 过多或温度过高，必须返工。

2) 化学法：磨角芯片先用缓冲液 ($\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=1:9$) 泡几分钟，装入阳极夹具即可通电进行电解氧化。

3) 干涉显微镜测量各层深度，包括发射区、基区、埋层、外延层以及氧化膜、钝化层等。铝层或其它金属薄膜用对比法或台阶仪测读。

二、实验内容

1. 观察、测绘三极管，如 3DG6、3AX81 玻璃封装管的内部结构，画出外形图。

2. 观察 7805、741 电路中一个芯片的内部结构、元器件、连线并画出草图。

三、实验步骤

1. 首先从大的方面观察芯片布局，找出哪些是晶体管、电阻、电容、导电带等。

2. 画出电路版图的初步草图，测量有关器件的尺寸。

3. 若表面有钝化层，可用不同腐蚀剂仔细试蚀，待铝条导通后方可测量。

四、实验数据处理及分析

1. 记录测绘的器件数据，最好是列表。

2. 解释测量的数据

五、思考题

1. 为何发射区的面积比基区小？集电区与底座用什么材料？如何粘接？

2. 版图中的晶体管与分立晶体管在性能方面有何差别？

3. 从照片中测读元器件尺寸有何误差？

六、参考文献

1. 黄汉尧、孙青等著：半导体器件工艺原理，国防工业出版社，1980。

2. 九院编写组，微电子实验教程，P290-297，东南大学出版社，1991。

3. 贾松良，双极集成电路分析与设计基础，电子工业出版社，3-4 章，1987。

附录:

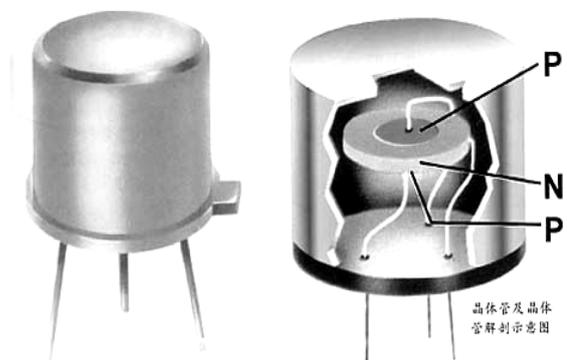


图1 晶体管的外形及解剖图

实验二十 稳压电源及应用电路的设计与测试

在集成电路的设计中，电源稳压器是电子产品的核心部分，它保证了电子产品中整个电路的工作可靠性。随着电子工程、通信工程、集成电路设计工程地迅速发展，电子电路模块应用已经极为广泛。作为微电子技术相关专业的学生有必要对稳压电源设计及应用电路有一定的了解，以便适应未来设计工作的需要。

本实验的目的是对稳压电源电路模块进行设计与测试，给出最佳电路形式，电路参数及优化结果；了解电路结构，元器件在电路中的作用和工作原理；加深对模电等课程的理解。

一、实验原理

1、电源组成：小功率直流电源（功率在 1000W 以下）是将 220V、50Hz 的交流电压转换为幅值稳定的直流电压，同时能提供一定的直流电流。单向小功率直流电源一般由电源变压器、整流电路、滤波电路和稳压电路四部分组成，如图 1、2 所示。

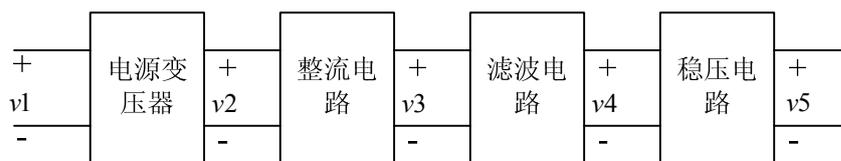


图 1 稳压电源的组成

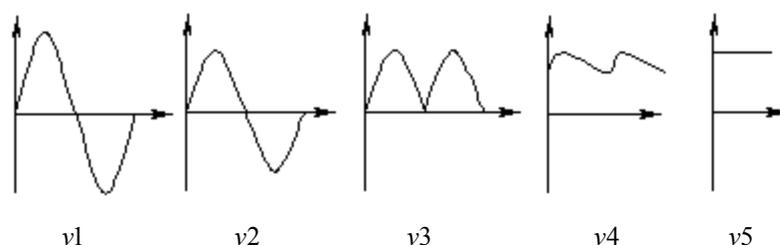


图 2 经过各个电路后的波形图

首先由电源变压器将 220V 的交流电压降低为需要的交流电压值（图 1 中的 v_2 ），然后利用桥式整流块将交流电压整流为单向脉动的直流电压（图 1 中的 v_3 ），再通过电容或电感等储能元件组成的滤波电路减小其脉动成分，从而得到比较平滑的直流电压（图 1 中的 v_4 ）， v_4 受电网波动及负载变化的影响（一般有 $\pm 10\%$ 左右的波动），必须加上稳压模块电路稳定输出电压。

2、各部分组成及原理

(1)、整流电路

常见的几种整流电路有单相半波、全波、桥式和倍压整流电路。

1) 半波整流:

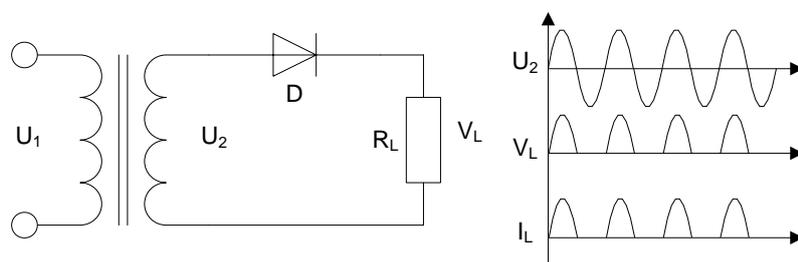


图3 半波整流电路及各级波形图

优点: 电路简单, 变压器无抽头。

缺点: 电源利用率低, 输出电压脉动大。

2) 全波整流:

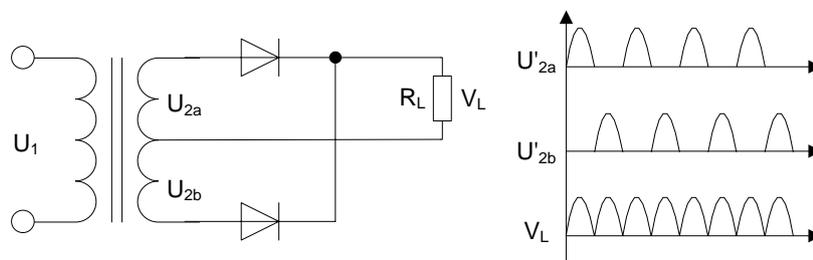


图4 全波整流电路及各级波形图

U'_{2a} 和 U'_{2b} 是 U_{2a} 和 U_{2b} 经过两个二极管后加在负载 R_L 两端的电压, V_L 是 U'_{2a} 和 U'_{2b} 叠加后的电压。

优点: 整流效率高, 输出电压波动小。

缺点: 变压器必须有中心抽头, 二极管承受的反向电压高。

3) 桥式整流:

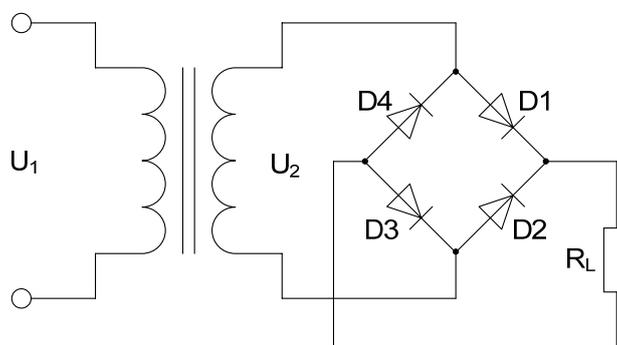


图5 桥式整流电路

桥式整流电路的工作原理:

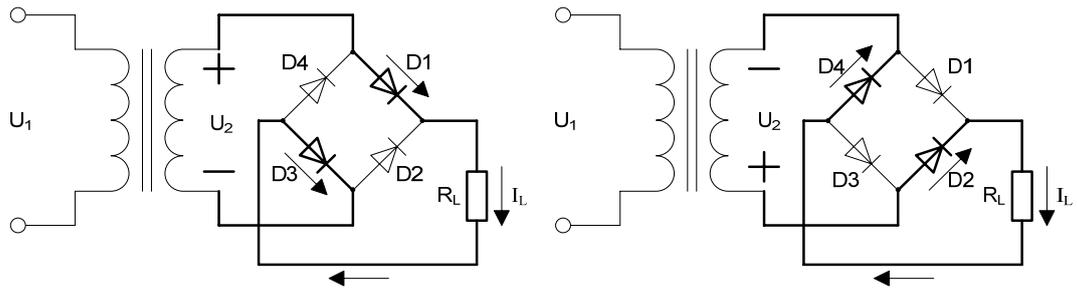


图 6 桥式整流电路的工作原理

当 U_2 大于 $0V$ 时，二极管 $D1$ 和 $D3$ 导通， $D2$ 和 $D4$ 截止。电流经过 $D1$ 、 R_L (负载)、 $D3$ 后流向电源负极， R_L 上获得正向电压。

当 U_2 小于 $0V$ 时，二极管 $D2$ 和 $D4$ 导通， $D1$ 和 $D3$ 截止。电流经过 $D2$ 、 R_L (负载)、 $D4$ 后流向电源负极， R_L 上获得正向电压。

由此看出，不论什么时刻，在 R_L 上得到的都是正向压降。

优点：输出电压高，纹波小，二极管反向电压较低，应用广泛。

4) 倍压整流：

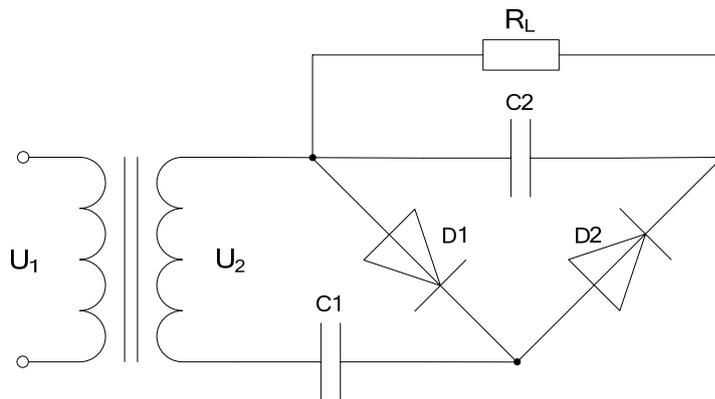


图 7 两倍压整流电路

倍压整流电路工作原理：

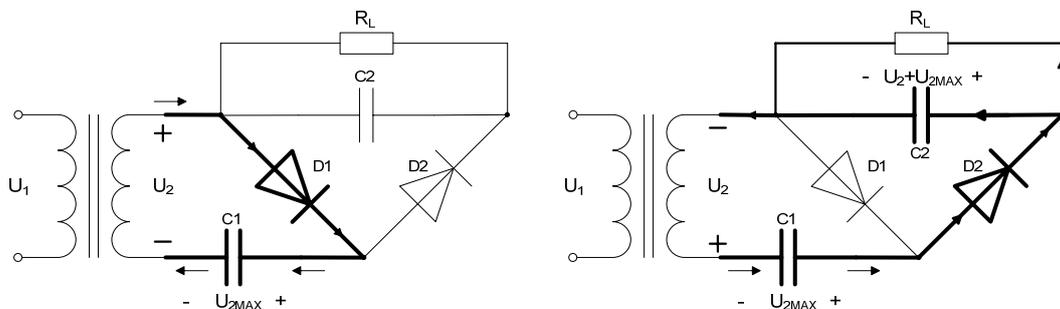


图 8 两倍压整流电路工作原理

当 U_2 大于 $0V$ 时，二极管 $D1$ 导通， $D2$ 截止。电源经过二极管 $D1$ 给电容 $C1$ 充电至

U_2 的最大值 U_{2MAX} 。

当 U_2 小于 $0V$ 时，二极管 D_2 导通， D_1 截止。在电源、 C_2 、 D_2 和 C_1 组成的回路中，由 KVL（基尔霍夫电压定律）可得电容 C_2 两端的电压可充电至 $2U_{2MAX}$ 。

则当在电容 C_2 两端并联上负载 R_L (R_L 一般比较大) 时， R_L 上也可获得 $2U_{2MAX}$ 的电压。

如图 9 为多倍压整流电路，整流原理与两倍压整流电路相同。可见，只要增加整流二极管和电容的数目，便可得到所需要的 n 倍压 (n 个二极管和 n 个电容) 电路。

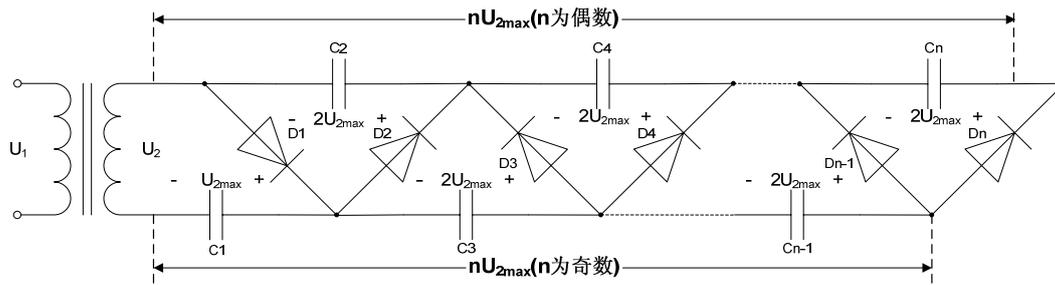


图 9 多倍压整流电路

优点：可以获得高电压。

缺点：电路比较复杂，输出负载电流小。

(2)、三端固定集成稳压器

1) 三端固定集成稳压器的特点

三端固定集成稳压器包含 7800 和 7900 两大系列，7800 系列是三端固定正电压输出稳压器，7900 系列是三端固定负电压输出稳压器。它们的最大特点是稳压性能良好，外围元件简单，安装调试方便，价格低廉，现已成为集成稳压器的主流产品。7800 系列按输出电压分有 5V、6V、9V、12V、15V、18V、24V 等品种；按输出电流大小分有 0.1A、0.5A、1.5A、3A、5A、10A 等产品。例如型号为 7805 的三端集成稳压器，表示输出电压为 5V，输出电流可达 1.5A。同理 7900 系列的三端稳压器也有 $-5V \sim -24V$ 七种输出电压，输出电流有 0.1A、0.5A、1.5A 三种规格。

7800 系列属于正电压输出，即输出端对公共端的电压为正。根据集成稳压器本身功耗的大小，其封装形式分为 T0-220 塑料封装和 T0-3 金属壳封装，二者的最大功耗分别为 10W 和 20W (加散热器)。管脚排列如图 10 所示。1 号管脚为输入端 (U_1)，2 号管脚是公共端 (地) GND，3 号管脚为输出端 (U_0)。三者的电位分布如下： $U_1 > U_0 > U_{GND} (0V)$ 。最小输入—输出电压差为 2V，为可靠起见，一般应选 4~6V。最高输入电压为 35V。

7900 系列属于负电压输出，输出端对公共端呈负电压。7900 与 7800 的外形相同，但管脚排列顺序不同，如图 10 所示。7900 的电位分布为： $U_{GND} (0V) > -U_0 > -U_1$ 。另外在使用 7800

与 7900 时要注意，采用 TO-3 封装的 7800 系列集成电路，其金属外壳为地端；而同样封装的 7900 系列的稳压器，金属外壳是负电压输入端。因此，在由二者构成多路稳压电源时，若将 7800 的外壳接印刷电路板的公共地，7900 的外壳及散热器就必须与印刷电路板的公共地绝缘，否则会造成电源短路。

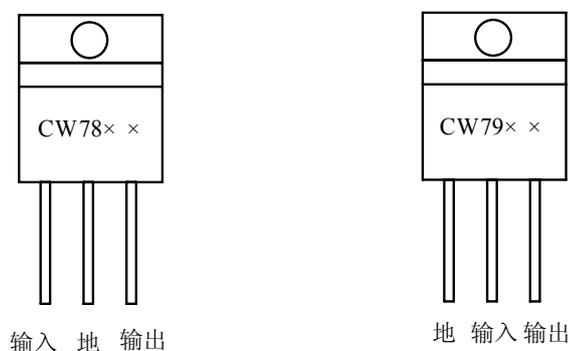


图 10 三端固定输出集成稳压器管脚排列图

2) 三端固定集成稳压器的原理

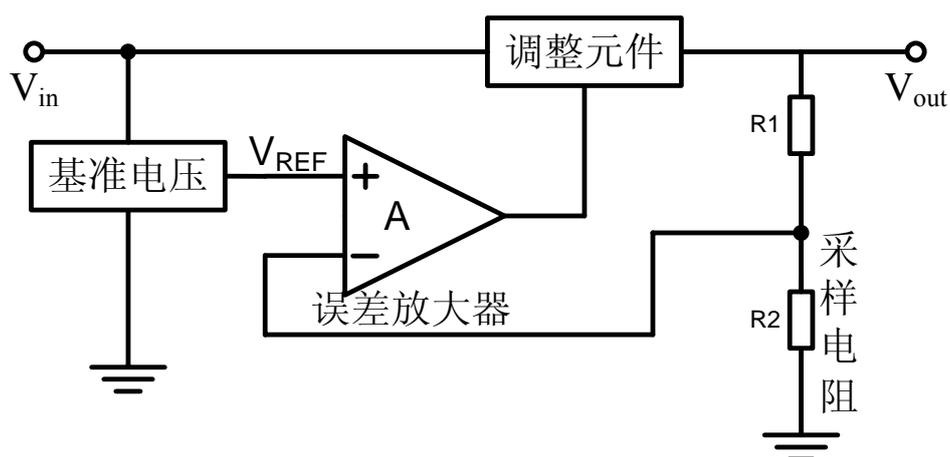


图 11 三端固定集成稳压器的原理图

三端固定集成稳压器由四部分组成，基准电压、调整元件、误差放大器、采样电路。输入电压 V_{in} 经过调整元件后，电压降为输出电压 V_{out} 。但是由于很多条件影响，输出电压并不能直接稳定在所需要的输出电压值。因此引入误差放大器，将采样电路得到的输出电压的采样值反馈到误差放大器的反向输入端。并将这个电压值与三端稳压器里集成的基准电压相比较，用比较后的结果来控制调整元件的工作状态，具体工作流程如图 12 所示。

三端固定集成稳压器具有输出电压稳定，低输出纹波，低噪声、外接元件少的特点。

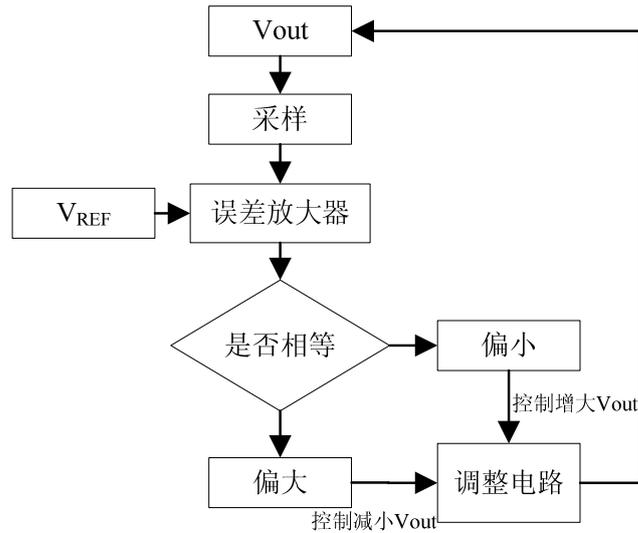


图 12 三端固定集成稳压器的的工作原理

3、应用电路

如图 13 所示，是稳压电源的一种应用电路。这是一个由交流电源经全波整流、滤波、三端稳压器稳压后输出的稳压电源及同相、反相运算放大器组成的电路。为了观察输入输出波形，放大倍数控制到 3—5 倍以内。电路的搭建需要“边搭边测”，电路要一部分一部分搭建，搭建完一部分后测量一部分，确保每一部分电路的正确。例如搭建完桥式整流电路后，则测量桥式电路的输出波形，观察是否正常，确定正常后再搭建滤波电路。滤波电路需要注意电容的正负极别接反，电解电容接反可能会发生爆炸，上电测试时应注意安全。当正负电源都完成后，再分别搭建同相放大和反相放大电路，一直到完成各个参数的测量和分析。需要说明的是，千万不要将整个电路搭建完后再上电测试，这样容易出现错误而很难找出问题。

电路原理图

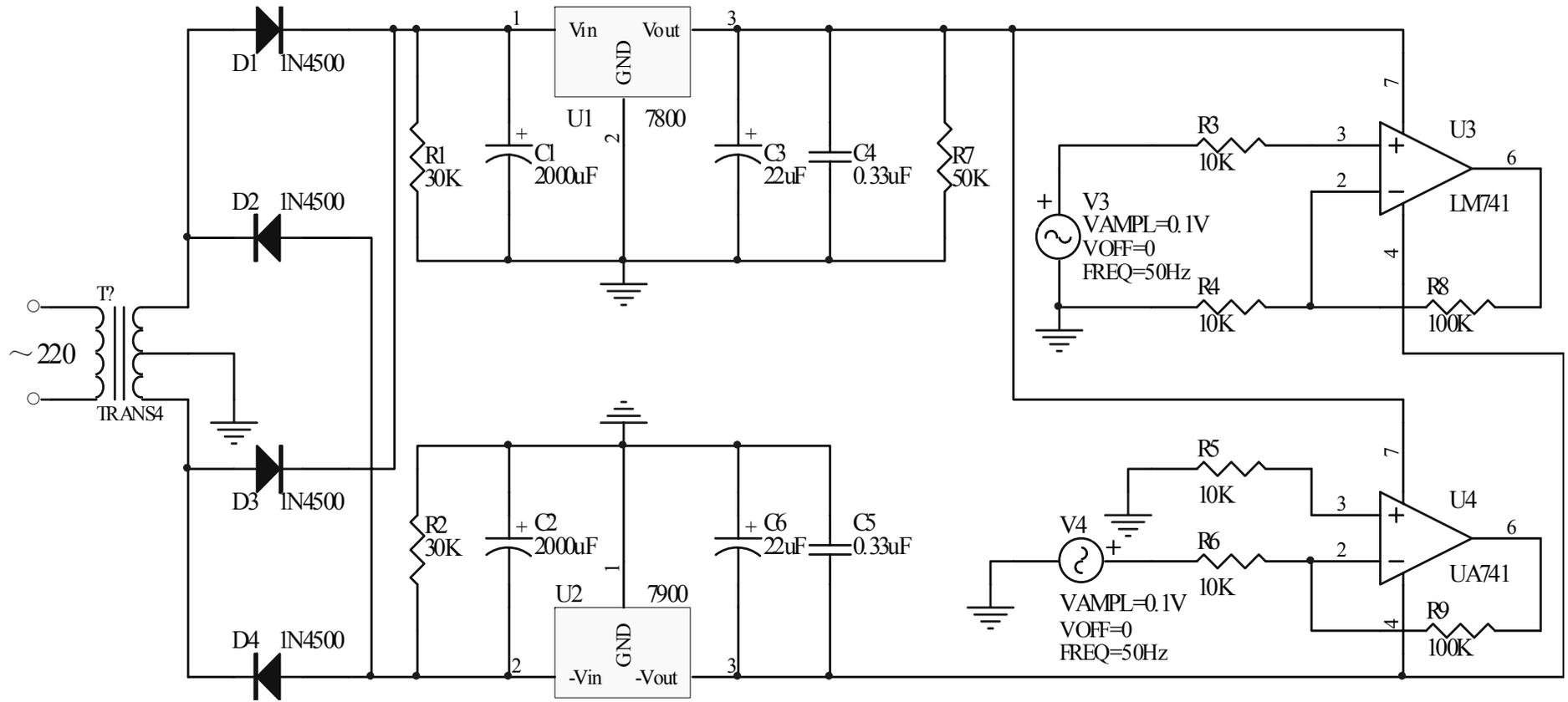


图 13 稳压电源的应用电路

二、实验内容

1. 按照图 13 所示电路图搭建电路；
2. 测量稳压电源各个节点的电压或者波形；
3. 完成双电源电路的搭建和测试后，对 741 芯片的反相、同相放大电路进行测试和分析。

三、实验步骤

1. 熟悉电路的工作原理，使用元器件的参数及要求；
2. 熟悉 7800、7900 系列芯片和 741 芯片的管脚和参数。
3. 测量、分析电路，并给出数据及曲线。

四、试验数据处理及分析

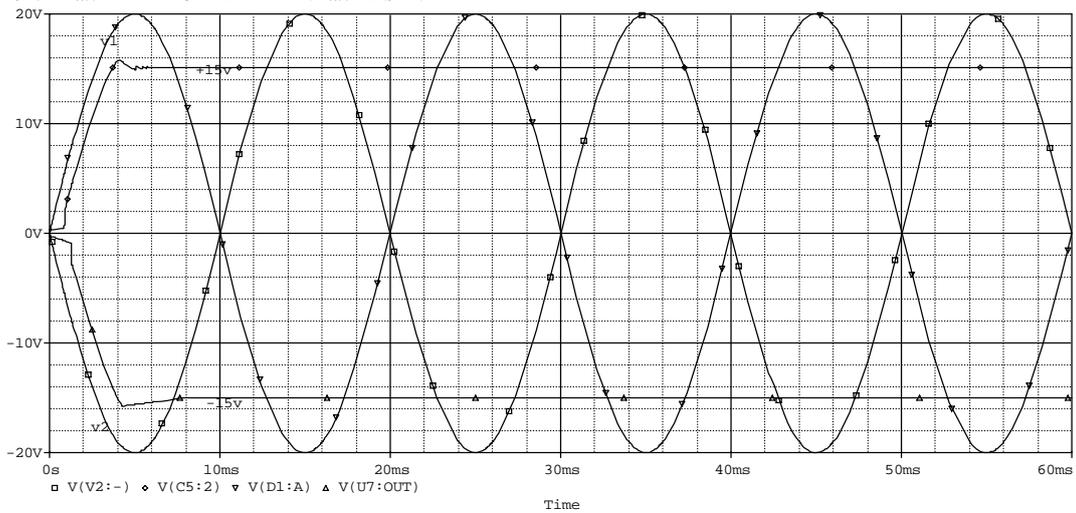
记录电路的主要参数及数据；绘制输入、输出波形图。

五、思考题

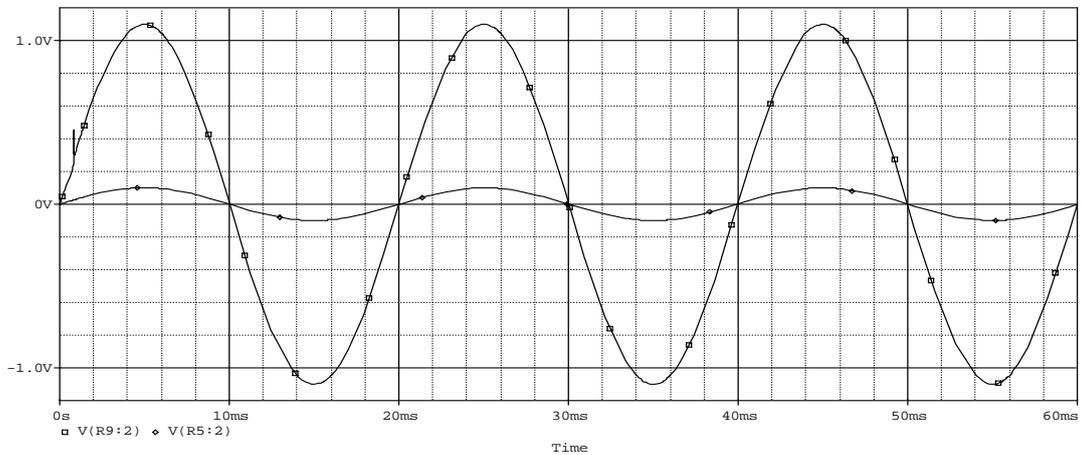
- 1、解释电路工作原理及调试方法。
- 2、解释测量得到的数据曲线。

六、电路波形图

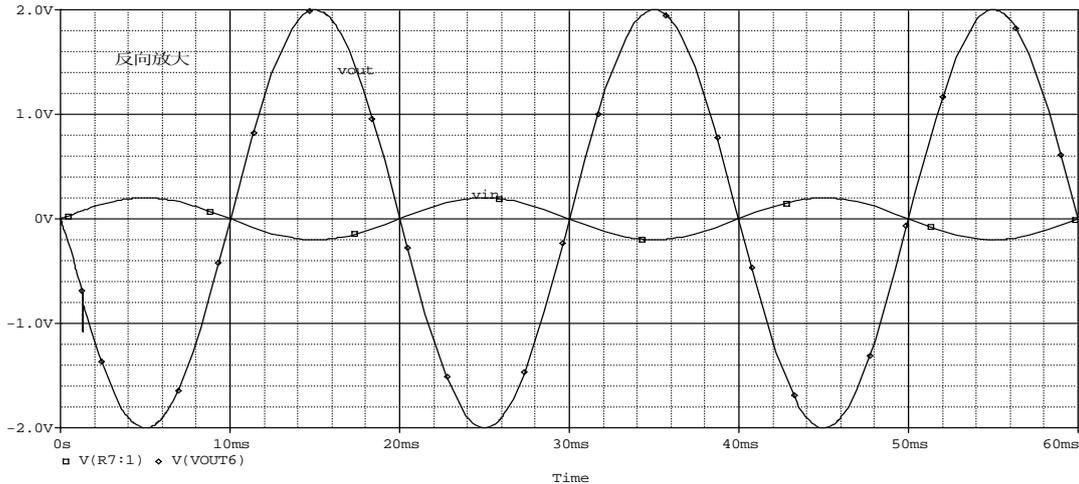
1. 交流输入、正负稳压电路输出波形：



2. 同相放大电路输入、输出波形：



3. 反相放大电路输入、输出波形:



七、参考文献:

- [1] 浙江大学半导体教研室, 晶体管原理, 国防工业出版社, 1980.
- [2] 顾德红, 脉冲与数字电路, 人民教育出版社, 1979.
- [3] 张瑞华, 电子线路分析基础, 水利电力出版社, 1983.
- [4] 桂智彬, 张进城, 微电子学实验教程, 西安电子科技大学, 2005.
- [5] 张建华, 电子技术基础实验技术, 北京工业学院出版社, 1987年.
- [6] 张保华, 模拟电路实验基础, 同济大学出版社, 2007年.
- [7] 林昭炯、韩汝琦, 晶体管原理与设计, 科学出版社 1979年.
- [8] 朱力恒、李乃夫等, 电子技术仿真试验教程, 电子工业出版社, 2003.
- [10] 康华光: 电子技术基础(模拟部分)、高等教育出版社, 1999.6.
- [11] 童诗白、华成英: 模拟电子技术基础, 高等教育出版社, 2001.6.
- [12] 林吉申: 三极管手册, 福建科学技术出版社, 2002.
- [13] 林吉申: 二极管手册, 福建科学技术出版社, 2002.
- [14] 刘恩科、朱秉升, 半导体物理学, 国防工业出版社, 1979.
- [15] 马鑫荣、田立林、李志坚, 半导体学报, 第2卷, 第4期, 288.1981.
- [16] David A. Johns、Ken Martin 著.模拟集成电路设计.北京:机械工业出版社,2005年.
- [17] 毕查德·拉扎维. 模拟 CMOS 集成电路设计.西安:西安交通大学出版社,2003年.
- [19] 黄汉尧、孙青等著: 半导体器件工艺原理, 国防工业出版社, 1980.
- [20] 九院编写组, 微电子实验教程, 东南大学出版社, 1991.
- [21] 贾松良, 双极集成电路分析与设计基础, 电子工业出版社, 3-4章, 1987.

实验二十一 晶闸管伏安特性及触发特性测量

晶闸管(Thyristor)是一种可控整流器件,简称可控硅。能在高电压、大电流条件下工作,作为一种大功率开关型半导体器件,被广泛应用于可控整流、交流调压、无触点电子开关、逆变及变频等电子电路中。

晶闸管的伏安特性和触发特性是晶闸管的最基本特性,这些特性的好坏,直接影响到器件在整机上的正常使用。因此,检测晶闸管的伏安特性和触发特性在晶闸管器件的生产及使用过程中都十分重要。本实验使用晶闸管伏安特性测试仪和晶闸管门极触发特性测试仪来完成参数的测试。其中,伏安特性参数测试时还需另配一台示波器观看伏安特性曲线。

本实验的目的是了解晶闸管的工作原理和其主要参数,掌握晶闸管伏安(V-I)特性测试原理和测试方法,并观察晶闸管伏安特性曲线,根据器件原理对特性曲线进行理论分析;了解门极特性测试电路原理,并掌握门极参数测试条件和方法;掌握晶闸管维持电流的测试原理和方法。

一、实验原理

1、晶闸管的工作原理:

晶闸管是由三个PN结构成的四层三端器件组成,其工作原理如图1所示。电路符号如下:

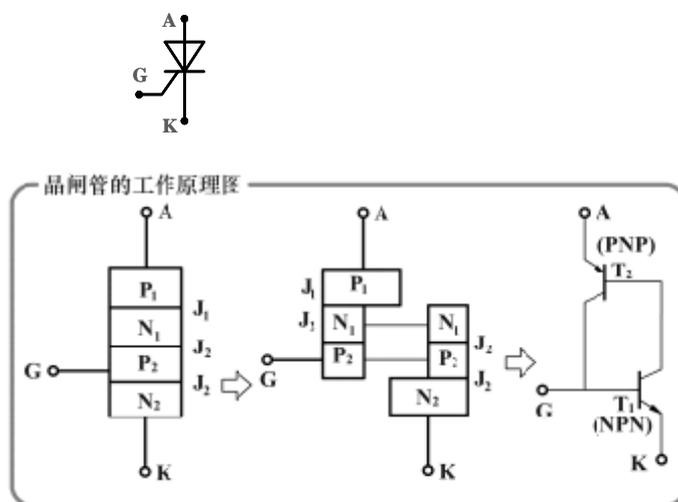


图1 晶闸管的工作原理图

(1) 晶闸管反向特性:当晶闸管阳极(A)和阴极(K)两端加反向电压($U_{AK}<0$)时, J_1 、 J_3 结处于反向偏置, J_2 结处于正向偏置。晶闸管只流过很小的反向漏电流 I_r ,晶闸管处于反向阻断状态。

(2) 正向阻断特性：晶闸管阳—阴极间加上正向电压 ($U_{AK}>0$)，控制极不加电压，J1、J3 结处于正向偏置，J2 结处于反向偏置，晶闸管只流过很小的正向漏电流 I_f ，此时，晶闸管处于正向阻断状态。

(3) 导通：晶闸管阳—阴极两端加正向电压 ($U_{AK}>0$)，控制极加控制电流 ($I_G>0$)，晶闸管触发导通。晶闸管导通后的正向特性与二极管的正向特性相似，即通过晶闸管的电流较大而其本身的管压降很小。一旦晶闸管触发导通后，即使控制极电流消失，晶闸管仍可维持导通状态。晶闸管处于导通状态下，只有减小阳极 (A) 电流使之小于晶闸管维持电流 (I_H) 才能使晶闸管由导通变为关断状态。其工作原理如图 2 所示。

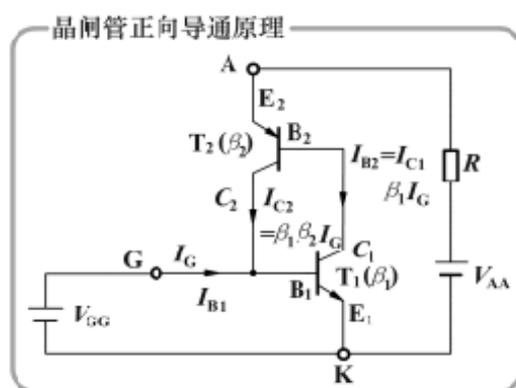


图 2 晶闸管正向导通原理

2、晶闸管的主要参数：

(1)、**正向重复峰值电压 V_{DRM}** ：控制极开路条件下，允许重复作用在晶闸管上的最大正向电压。一般 $V_{DRM}=90\%V_{DSM}$ ， V_{DSM} 为正向不重复峰值电压。

(2)、**反向重复峰值电压 V_{RRM}** ：控制极开路条件下，允许重复作用在晶闸管上的最大反向电压。一般 $V_{RRM}=90\%V_{RSM}$ ， V_{RSM} 为反向不重复峰值电压。

(3)、**门极触发电压 V_{GT} 和触发电流 I_{GT}** ：室温下，当 $U_{AK}=6V$ 或 $12V$ 时，使晶闸管从阻断到完全导通所需最小的门极直流电压和电流。

(4)、**维持电流 I_H** ：在控制极开路且规定的环境温度下，晶闸管维持导通时的最小阳极电流。正向电流小于 I_H 时，晶闸管自动阻断。

维持电流是在室温和控制极断态的情况下，晶闸管已触发导通，再从较大的通态电流降至维持通态所必须的最小电流，所以它是由通态到断态的临界电流。对同一晶闸管，通常 I_L 约为 I_H 的 2~4 倍。

(5)、**擎住电流 I_L** ：晶闸管刚从断态转入通态，并移除触发信号之后，能维持通态所需的最小主电流。

二、实验项目：

I 晶闸管伏安特性测试

晶闸管的伏安特性包括：正向、反向电压—电流特性，通常用以下曲线来表示，见图 3。

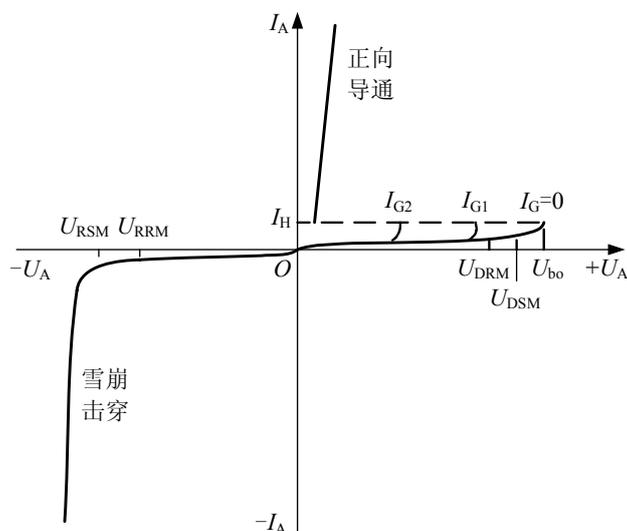


图 3 晶闸管的伏安特性曲线 ($I_{G2} > I_{G1} > I_G$)

1、实验要求：

- 1) 作出两只晶闸管元件的 $V-I$ 曲线。
- 2) 测试两只元件的 V_{DRM} , I_{DR} , V_{RRM} , I_{RR} 。
- 3) 测伏安特性时，电压电流各取什么值？
- 4) 通过示波器观察晶闸管伏安特性曲线，根据器件原理对特性曲线上出现的问题进行理论分析。

2、仪器技术指标：

- 1) 正向和反向峰值电压测量范围：0—2500V
- 2) 正向和反向峰值漏电流测量范围：0—100mA

3、测试条件：

- 1) 室温和额定结温，出厂试验为额定结温 T_{jm} ；
- 2) 门极电路断路（门极电流为零）；
- 3) 电源频率 50Hz，电压波形为脉宽近似 10ms 的正弦半波；
- 4) V_{DRM} 、 V_{RRM} 分别为 V_{DSM} 、 V_{RSM} 的 90%；
- 5) I_{DRM} 、 I_{RRM} 分别对应 V_{DSM} 、 V_{RSM} 的漏电流，表头读取的电平均值，示波器读取的为峰值。

4、实验步骤

- 1) 将调压器调回零位，插上电源插头。
- 2) 打开电源开关。按住测试按键，同时调节电流设定旋钮，观察电流表调到需要的保护电流值。松开测试键。

- 3) 接好被测元件，注意 A、K 的连接是否正确，G 开路，同时选择“正向/反向”开关。
- 4) 按下测试键，测试指示灯亮，手动调节调压器缓慢顺时针转动，峰值电压表 V_{RM} 上升， I_{RM} 上升，这时当 I_{RM} 上升到保持电流设定点时，测试灯灭，说明被测元件过流保护。记录下此时的正反向漏电流 (I_{DR} 、 I_{RR})。将调压器回零，按测试按钮，复位控制电路。改变换向开关，再按同样方法测试反向参数。
- 5) 换被测元件时，务必将调压器调回零位。元件测试完成后，立即将调压器调回零位，使用完毕后关闭电源开关。
- 6) 面板上接有 V—A 特性观测端，可以接到示波器 X-Y 通道观察 V—A 特性曲线。

5、实验数据处理和结果分析

V—I 记录表格

型号：

编号：

V_{DRM}	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
I_{DR}										
V_{RRM}	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
I_{RR}										

峰值电压表电路有几种形式？电路上有何要求？

II 晶闸管门极特性测试

测试原理见下图 4。

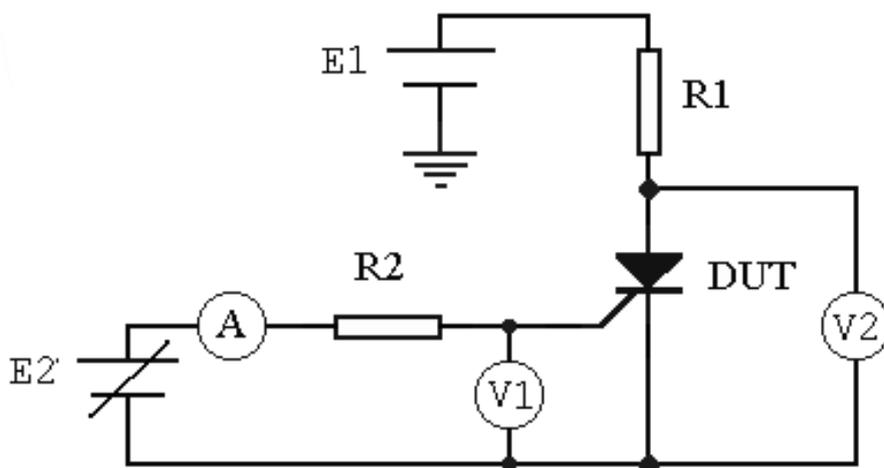


图 4 门极特性测试电路原理图

门极触发电流、门极触发电压：触发电压 U_g 、电流 I_g ：在规定的环境温度和阳—阴极间加一定正向电压的条件下，使晶闸管从阻断状态转换为导通状态所需的最小控制极直流电

压、电流，称为触发电压、电流。一般 U_g 为 1.0~5V， I_g 为几十到几百毫安，为保证可靠触发，实际值应大于额定值。此外，还规定了控制极的瞬间最大电压、电流和平均功率。

1、实验要求：

- 1) 作出两只晶闸管元件的 V—I 曲线。
- 2) 测试两只元件的 V_{DRM} ， I_{DR} ， V_{RRM} ， I_{RR} 。

2、主要技术指标：

- 1) 触发电流测量范围：5—450mA
- 2) 触发电压测量范围：0—4.5V

3、测试条件：

- 1) 结温、室温；
- 2) 阳极电压：直流 12V、6V。

4、实验步骤：

先将直流电源 E2 调到“0”，在晶闸管阳极施加恒定直流电压，然后逐步增加 E2，直到被测元件开通，此时，电流表 A 的电流值即门极触发电流，电压表 V1 的电压即门极触发电压。

测出两只元件的门极参数。

5、实验数据处理和结果分析

	1	2	3	4	5	平均	最大相对误差
I_{gt}							
V_{gt}							

III、维持电流

维持电流是管子室温和控制极断态的情况下，已触发导通，再从较大的通态电流降至维持通态所必须的最小电流，所以它是由通态到断态的临界电流。对同一晶闸管，通常 I_L 约为 I_H 的 2~4 倍。

测试原理见下图 5

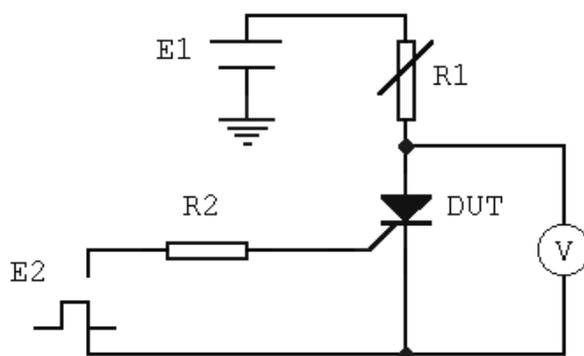


图 5 维持电流测试电路原理图

1、实验要求：

- 1) 测出两只元件的维持电流。
- 2) 根据图 4，简述测试电路的工作原理。

2、技术指标：

- 1) 维持电流测试范围：5—450 mA
- 2) 测量时间：< 2 S
- 3) 读数显示时间：1—9 S 可任意设定

3、测试条件：

- 1) 结温、室温；
- 2) 阳极电压：直流 12V、6V。

4、实验步骤：

首先将负载电阻 R1 调到“0”，向门极施加足够大的触发信号，同时向阳极通以足够大的导通电流，然后撤去 E2，增加负载电阻 R1，逐渐减小阳极电流，当被测元件从通态转为断态时，关断前流过被测元件阳极的电流即维持电流。

5、数据记录表：

1	2	3	4	5	平均	最大相对误差
I_H						

实验二十二 晶闸管通态峰值压降的测量

通态平均电压 $V_{T(AV)}$:

在规定环境温度、标准散热条件下，元件通以正弦半波额定电流时，阳—阴极间电压降在一个周期内的平均值，称为通态平均电压 $U_{T(AV)}$ ，一般又称作管压降。

通态峰值电压 V_{TM} :

晶闸管通以 π 倍额定通态平均电流值 ($I_{T(AV)}$) 时的瞬态峰值电压。

本实验的目的是：了解晶闸管通态峰值压降的测试原理和方法；掌握通态耗散功率的计算方法，绘制所测晶闸管的通态伏安特性曲线和通态耗散功率曲线。

一、实验原理

对被测元件通以正弦半波脉冲电流，底宽 1-10ms，用四端测量法在电流峰点采取电压值，此即为峰值压降。原理如图 1。

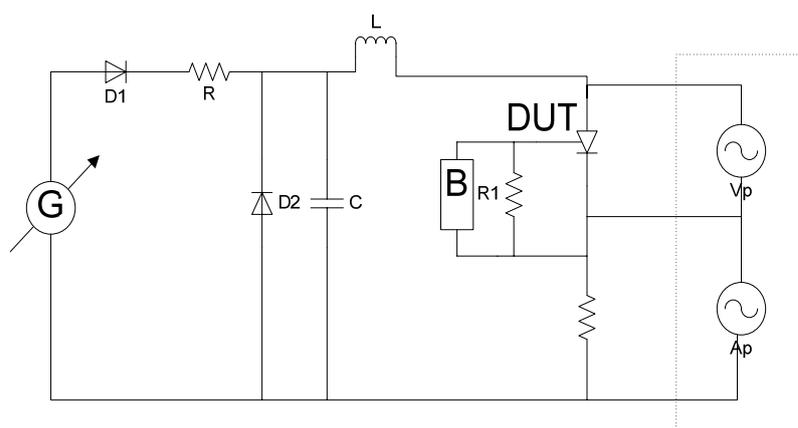


图 1 测试电路原理图

DUT-----被测器件；
R -----保护电阻（限制充电电流）；
L、C ----产生通态脉冲电流的电感和电容；
B -----门极触发电源；
 V_p 、 A_p --峰值电压表和峰值电流表。
G -----连续可调交流电源。

仪器基本技术指标：

- 1、最大峰值电流： 3000 A
- 2、峰值压降测量范围： 0.3-10 V
- 3、脉冲： 单次
- 4、脉宽： ≥ 7 ms
- 5、正向峰值电压测试范围： 0—4.5V

测试条件：

- 1、结温： 出厂试验为室温，型式试验为室温和额定结温；
- 2、通态峰值电流： 为通态平均电流的 π 倍（ π 可取 3 倍）；
- 3、LC 振荡产生的通态电流可以是单次脉冲，也可以是低频重复脉冲；
- 4、脉冲电流宽度应足够宽，以保证元件完全开通。

二、实验内容

- 1、测试两只元件的通态伏安特性曲线。
- 2、根据被测试元件的额定电流确定最大 I_{TM} 值。
- 3、对测试的数据进行处理，并绘制特性曲线。

三、实验步骤

安装接线

- 1、设备就位，分别连接好设备接地线和电源线。
- 2、将被测元件与测试设备引出的铜排可靠连接。
- 3、铜排“A”接被测元件阳极，“K”接被测元件阴极。
- 5、测试仪器面板上接线柱大写“A”和“K”为通态峰值电压 V_{TM} 和 V_{FM} 的检测线，“A”接被测元件阳极，“K”接被测元件阴极，注意这两根线必须跨过主电流大线，直接连接到被测元件上，不可与主电流线提前汇接。
- 6、测试仪器面板上接线柱小写“g”和“k”为元件门极触发线，应直接连接到被测元件，“g”接门极，“k”接阴极，直接连接到被测元件。

测试

- 1、按要求连接好被测元件。
- 2、接通电源时应先将电流设定电位器逆时针退到底，再接通电源。
- 3、根据被测电流大小，选择合适的充电电压，小于 2000A 选低电压档，2000~3000A 之间选高电压档。
- 4、按住电流设定开关，同时调节电流设定旋钮，观察电流表调到需要的电流值。（一般 I_{TM} 取 3 倍 I_{AV} ）
- 5、按下测试按钮，此时可以从充电电压表观察到充电过程，然后自动放电。
- 6、分别从电压表和电流表读出峰值电压和峰值电流值。
- 7、重复测试时，可用复位按钮表头清零。

四、数据记录表

I_{TM}	1	2	V_{TM}	3	平均	误差	备注
300A							
600A							
900A							

五、注意事项

- 1、本设备允许将主电流线“A”，“K”直接短路进行试验。
- 2、本设备有强大的冲击电流和强磁场，严禁手机，手表，计算机和其它电子设备靠近。
- 3、本设备充电电压有 130 多伏，换接元件时，务必将设备电源切断。

实验二十三 变温霍尔效应实验

霍尔效应是研究关于载流导体在磁场中的受力性质时发现的一种磁电现象。对通电的导体或半导体施加一与电流方向垂直的磁场，则在垂直于电流和磁场方向上有一横向电势差出现，这个现象便称为霍尔效应，这个电势差也被叫做霍尔电势差。这一现象是美国物理学家霍尔（A.H.Hall，1855—1938）于1879年在研究金属的导电机理时发现的。

在20世纪的前半个世纪，霍尔系数及电阻率的测量一直推动着半导体理论的发展，特别是对半导体纯度以及杂质种类的判断是一种有力手段。利用霍尔系数和电导率的联合测量，可研究半导体的导电机理（本征导电和杂质导电）、散射机理（晶格散射和杂质散射）、并可确定半导体的一些基本参数，如：半导体材料的导电类型、载流子浓度、迁移率大小、禁带宽度、杂质电离能等。霍尔效应的研究技术也越来越复杂，出现了变温霍尔、高场霍尔、微分霍尔、全计算机控制的自动霍尔谱测量分析等。

利用霍尔效应制成的元件，称为霍尔元件，已经广泛地用于测试仪器和自动控制系统中磁场、位移、速度、结构、缺陷、存储信息的测量等。

本实验目的是了解半导体中霍尔效应的产生原理、霍尔系数计算公式的推导、测量过程中副效应的产生和消除。掌握变温霍尔效应的测量方法。通过测量数据处理判别样品的导电类型，计算霍尔系数、载流子浓度、电导率、霍尔迁移率等，并求出材料的禁带宽度。

一、实验原理

1. 霍尔效应和霍尔系数

霍尔效应是一种电流磁效应，如图1所示：

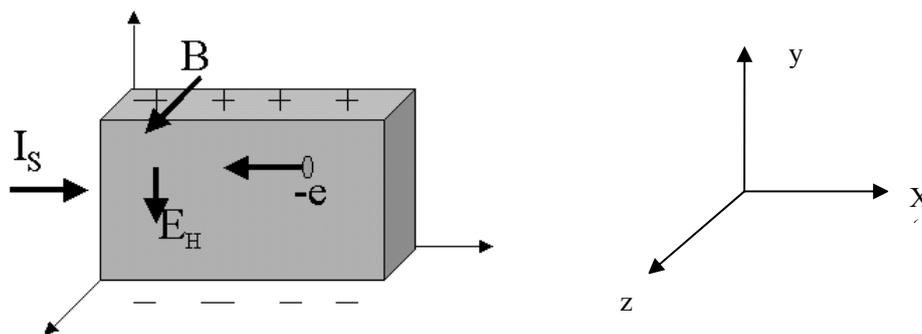


图1 霍尔效应示意图

当通以电流 I_s 的样品放在均匀磁场 B 中，设电流沿 X 方向，电流大小为 I_s ，磁场方向为 Z 垂直于电流方向，磁场强度为 B ，则在垂直于电流和磁场的 Y 方向，将产生一个横向电场 E_H ，这种现象被称为“霍尔效应”。所对应的横向电场 E_H 称为“霍尔电场”。

实验指出，霍尔电场强度 E_H 的大小与流经样品的电流密度 J_x 和磁场强度 B 的乘积成正比。比例系数 R_H 称为霍尔系数，

$$E_H = R_H \cdot J_x \cdot B \quad (1)$$

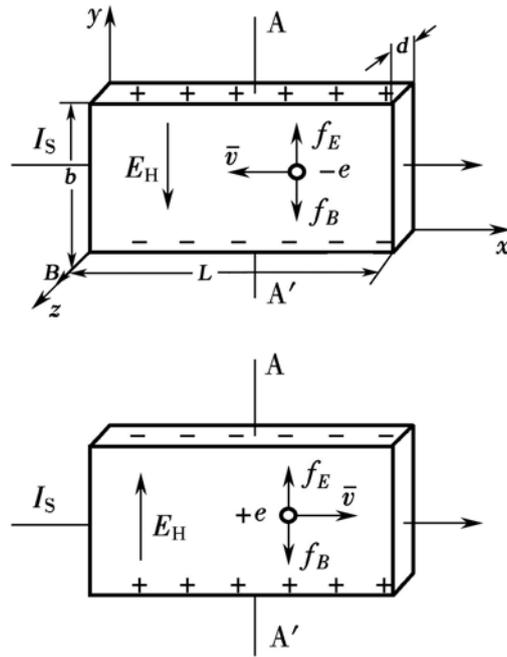


图2 霍尔效应的内部原理图

对应的横向电势差称为“霍尔电压” V_H 与样品厚度 d 成反比，与磁感应强度 B 和电流 I_s 成正比。比例系数 R_H 叫做霍尔系数。

$$V_H = R_H \frac{I_s B}{d} \quad (2)$$

霍尔电位差是洛伦兹力和电场力对载流子共同作用产生的结果，产生霍尔效应的根本原因是带电粒子在垂直磁场中运动时受到洛伦兹力的横向作用，带电粒子偏转，在垂直于带电粒子运动和磁场方向上产生电荷积累。

下面以 P（空穴）型半导体样品为例，讨论霍尔效应产生的原因并推导、分析霍尔系数的计算公式。

假设样品为标准霍尔样品，载流子为空穴，其浓度为 P ，它们在电场 E 作用下，以平均漂移速度 V 沿 x 方向运动，形成电流 I ，在垂直于电场 E 方向上加一磁场 B ，则运动着的载流子要受到洛伦兹力的作用

$$f_B = q(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

式中 q 为空穴电荷电量。该洛伦兹力指向 Y 方向，因此载流子向 Y 方向偏转，该样品的两侧就沿 Y 方向形成了电荷积累，从而产生了一个指向 $-Y$ 方向的电场——霍尔电场 E_H 。当该电场对空穴的作用力 $f_E = qE_H$ 与洛伦兹力 f_B 相平衡时，空穴在 Y 方向上所受的合力为零，达到稳态。在稳态时，有

$$f_E = f_B$$

$$qE_H - q(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) = 0 \quad (4)$$

$$E_H = vqB = R_H J_x B \quad (5)$$

而 x 方向的电流密度

$$J_x = pqv \quad (6)$$

将 (6) 代入 (5), 得

$$R_H = \frac{1}{pq} > 0 \quad (7)$$

如果样品是 n 型半导体, 载流子 (电子) 浓度为 n, 则横向电场与前者相反。所以 n 型半导体和 p 型半导体的霍尔系数具有不同的符号, 据此可以判断材料的导电类型。

$$R_H = -\frac{1}{nq} < 0 \quad (8)$$

实验中通常通过测量霍尔电压 V_H 以求出霍尔系数 R_H 。

采用长、宽、厚分别为 L、b、d 的矩形样品 (注 $L > b > d$), 因为

$$E_H = V_H / b, \quad J_x = I_s / bd$$

将上两式代入 (1) 得

$$\begin{aligned} V_H &= R_H \frac{I_s B}{d} \\ R_H &= \frac{V_H d}{I_s B} \end{aligned} \quad (9)$$

若采用国际单位制, R_H 的单位 m^3/c 。

但在半导体研究中习惯采用实用单位制 (其中, d: 厘米; B: 高斯 Gs), 则

$$R_H = \frac{V_H d}{I_s B} \times 10^5 \quad cm^3 / c$$

当考虑载流子速度的统计分布时, 必须求解玻耳兹曼方程, 这里不予推导, 只给出结果。可参考“半导体物理学”, 式 (7) 及 (8) 应分别修改为

$$P \text{ 型半导体: } R_H = \left(\frac{\mu_H}{\mu_p} \right) \frac{1}{pq} \quad (10)$$

$$N \text{ 型半导体: } R_H = -\left(\frac{\mu_H}{\mu_n} \right) \frac{1}{nq}, \quad (11)$$

式中 n 和 p 分别表示电子和空穴的浓度, q 为电子电荷, μ_n 和 μ_p 分别是电子和空穴的电导迁移率, μ_H 为霍尔迁移率, $\mu_H = R_H \sigma$ (σ 为电导率)。

在半导体中主要由一种载流子导电的情况下, 电导率表示式为 $\sigma_n = nq\mu_n$ 或 $\sigma_p = pq\mu_p$,

由式 (10) 及 (11) 可得

$$|R_H \sigma_p| = (\mu_H)_p \quad (12)$$

$$|R_H \sigma_n| = (\mu_H)_n \quad (13)$$

由此看出, 只要测出样品的霍尔系数和电导率, 就可求得霍尔迁移率以及电导迁移率。

2. 霍尔效应中的副效应及其消除

在霍尔系数测量过程中, 样品在磁场中不仅产生霍尔电压, 还会产生其它一些热磁付效应, 迭加在霍尔电压上, 下面做些简要说明:

(1) 艾廷豪森效应。当样品沿 x 方向通电流 I_x ，沿 z 方向加磁场 B 时，由于载流子速度分布的统计性，大于和小于平均速度的载流子在洛仑兹力和霍尔电场力的作用下，沿 y 轴的相反两侧偏转，其动能将转化为热能，使两侧产生温差。由于电极和样品不是同一材料，电极和样品形成热电偶，这一温差将产生温差电动势 V_E ，有

$$V_E \propto I_x B_z$$

这就是爱廷豪森效应。 V_E 方向与电流 I 及磁场 B 的方向有关。

(2) 能斯脱 (Nernst) 效应。如果在 x 方向存在热流 Q_x (往往由于 x 方向通以电流，两端电极与样品的接触电阻不同而产生不同的焦尔热，致使 x 方向两端温度不同)，沿温度梯度方向扩散的载流子将受到 B_z 作用而偏转，在 y 方向上建立电势差 V_N ，有

$$V_N \propto Q_x B_z$$

这就是能斯脱效应。 V_N 方向只与 B 方向有关。

(3) 里纪—勒杜克 (Righi—Leduc) 效应。当有热流 Q_x 沿 x 方向流过样品，载流子将倾向于由热端扩散到冷端，与爱廷豪森效应相仿，在 y 方向产生温差，这温差将产生温差电势 V_{RL} ，这一效应称里纪—勒杜克效应。

$$V_{RL} \propto Q_x B_z$$

V_{RL} 的方向只与 B 的方向有关。

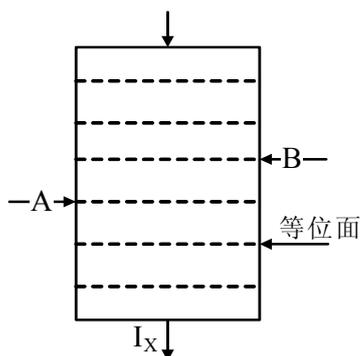


图3 霍尔效应中的副效应

(4) 电极位置不对称产生的电压降 V_0 。在制备霍尔样品时， y 方向的测量电极很难做到处于理想的等位面上，见图3。即使在未加磁场时，在 A 、 B 两电极间也存在一个由于不等位电势引起的欧姆压降 V_0 ：

$$V_0 = I_x R_0$$

其中 R_0 为 A 、 B 两电极间所在的两等位面之间的电阻，

V_0 方向只与 I_x 方向有关。

如果四个测量电极明显偏离正交对称分布，就会产生很大的欧姆压降 V_0 。欧姆压降 V_0 迭加到很小的霍尔电压上，就会大大增加检出霍尔电压的测量误差，要求选用更高级的电压表。

(5) 样品所在空间如果沿 y 方向有温度梯度，则在此方向上产生的温差电势 V_T 与 I 、 B 方向无关。

要消除上述诸效应带来的误差，可以通过改变 I 和 B 的方向，使 V_N 、 V_{RL} 、 V_0 和 V_T 从计算结果中消除，然而 V_E 却因与 I 、 B 方向变化而无法消除，但 V_E 引起的误差一般小于 5%，可以忽略。

实验时可测出下列四个数据：

在样品上加上 $+B$ 、 $+I$ ，则 y 方向两电极间电位差 V_1 应为：

$$V_1 = +V_H + V_R + V_N + V_{RL} + V_0 + V_T$$

$$\text{加+B、-I 时, } V_2 = -V_H - V_R + V_N + V_{RL} - V_0 + V_T$$

$$\text{加-B、-I 时, } V_3 = +V_H + V_R - V_N - V_{RL} - V_0 + V_T$$

$$\text{加-B、+I 时, } V_4 = -V_H - V_R + V_N + V_{RL} + V_0 + V_T$$

由以上四式可得:

$$V_H + V_E = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$$

将实验时测得的 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 代入上式,就可消除 V_N 、 V_{RL} 、 V_0 、 V_T 等附加电压引入的误差。

3. 两种载流子导电的霍尔系数

上面讨论的是只有电子或只有空穴导电的情况。对于电子、空穴混合导电的情况,在计算 R_H 时应同时考虑两种载流子在磁场下偏转的效果。对于球形等能面的半导体材料,可以证明:

$$R_H = A \frac{1}{q} \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p + n\mu_n)^2} = A \frac{1}{q} \frac{p - nb^2}{(p + nb)^2} \quad (14)$$

式中, $b = \mu_n / \mu_p$; μ_n 、 μ_p 为电子和空穴的迁移率, A为修正系数。

4. 霍尔系数与温度的关系

R_H 与载流子浓度之间有反比关系,因此当温度不变时, R_H 不会变化;而当温度改变时,载流子浓度发生变化, R_H 也随之变化。如图4,图中纵坐标为 R_H 的绝对值,曲线A、B分别表示n型和p型半导体的霍尔系数随温度的变化曲线。下面简要地讨论曲线B:

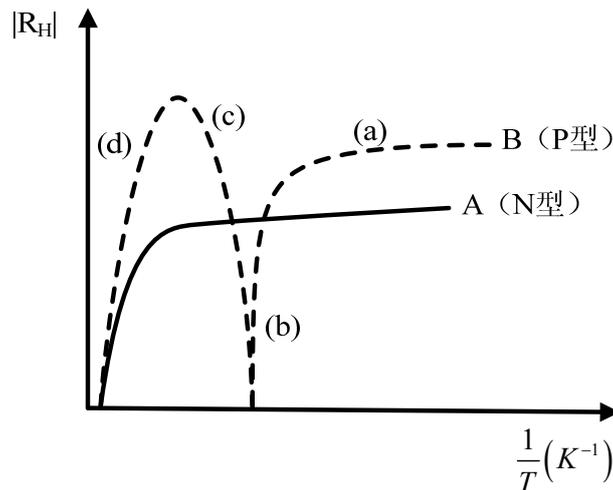


图4 R_H 随温度T的变化关系

(1) 杂质电离饱和区。在曲线(a)段,所有的杂质都已电离,载流子浓度保持不变。

P型半导体中 $p \gg n$, (14)式中 nb^2 可忽略,可简化为

$$R_H = A \frac{1}{qp} = A \frac{1}{qN_A} > 0$$

式中 N_A 为受主杂质浓度。

(2) 温度逐渐升高, 价带上的电子开始激发到导带, 由于 $\mu_n > \mu_p$, 所以 $b > 1$, 当温度升到使 $p=nb^2$ 时, $R_H=0$, 出现了图 (4) 中 (b) 段。

(3) 温度再升高时, 更多的电子从价带激发到导带, $p < nb^2$ 而使 $R_H < 0$, (14) 式中分母增大, R_H 减小, 将会达到一个负的极值(图 4 中 c(点))。此时价带的空穴数 $p=n+N_A$, 将它代

入(14)式, 并对 n 求微商, 可以得到当 $n = \frac{N_A}{b-1}$ 时, R_H 达到极限值 R_{HM} ;

$$R_{HM} = \frac{A}{qN_A} \cdot \frac{(b-1)^2}{4b} \quad (15)$$

由此式可见, 当测得 R_{HM} 和杂质电离饱和区的 R_H , 就可定出 b 的大小。

(4) 当温度继续升高, 达本征范围时, 半导体中载流子浓度大大超过受主杂质浓度, 所以 R_H 随温度上升而呈指数下降, R_H 只由本征载流子浓度 n 来决定, 此时杂质含量不同或杂质类型不同的曲线都将趋聚在一起, 见图中 (d) 段。

5. 半导体的电导率

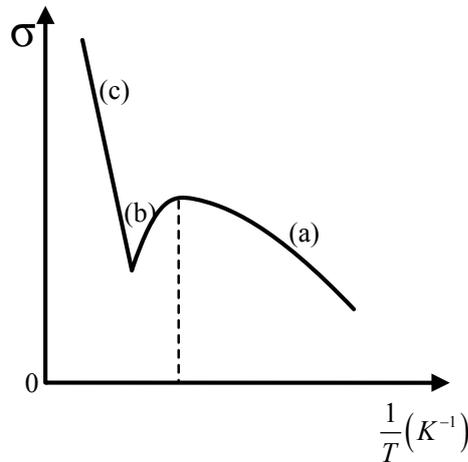


图 5 σ 与温度 T 的关系曲线

在半导体中若有两种载流子同时存在, 则其电导率 σ 为

$$\sigma = qp\mu_p + qn\mu_n \quad (16)$$

实验得出 σ 与温度 T 的关系曲线如图 5 所示。

以 P 型半导体为例进行分析如下:

(1) 低温区。在低温区杂质部分电离, 杂质电离产生的载流子浓度随温度升高而增加, 而且 μ_p 在低温下主要取决于杂质散射, 它也随着温度升高而增加。因此, σ 随温度 T 的增加而增加, 见图 5 中 (a) 段。

(2) 杂质电离饱和温度区。在这区域内杂质已全部电离，但本征激发尚不明显，所以载流子浓度基本上不变。这时在 p 型半导体中空穴浓度 p 、杂质电离产生的空穴浓度 p_s 与受主杂质浓度 N_A 相等，即 $p = p_s = N_A$ 。这时晶格散射起主要作用，迁移率 μ_p 随温度 T 升高而下降，导致电导率 σ 随温度 T 的升高而下降，见图 5 中的 (b) 段。

(3) 高温区。在这个区域中，本征激发产生的载流子浓度随温度升高而指数地剧增，远远超过 μ_p 的下降作用，致使 σ 随 T 而迅速增加，见图 5 中 (c) 段。

实验中电导率 σ 可由下式计算：

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{I \cdot l}{U_0 \cdot ab} \quad (17)$$

式中 ρ 为电阻率，I 为流过样品的电流， U_0 、 l 分别为两测量点间的电压降和长度。

以上讨论都是对形状为严格长方体的标准样品，需要做五个电极。实际上对多数研究对象，制备标准样品是不现实的。范得堡(Van der Pauw)对于不规则形状样品的霍尔系数和电阻率测量方法进行了严格、深入的研究，提出了四电极的霍尔效应测量方法：范得堡(Van der Pauw)法。目前，在科学研究和生产活动中，广泛应用的就是范得堡法。

图 6 给出了范得堡法和标准样品的接线定义，表 1 给出了霍尔测量仪的开关选择与样品内的电流流向、电压方向与微伏表接法。

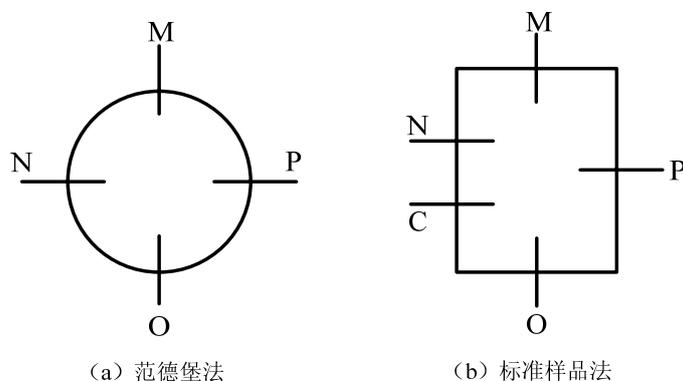


图 6 霍尔测量的样品焊线定义

表 1 霍尔测量仪的开关选择与样品内的电流流向、电压方向与微伏表接法

电压选择	电流流向	电压
V_H	$I+=M \quad I-=O \quad M \rightarrow O$	$A=P \quad B=N \quad V_{m0,pn}$
V_6	$I+=M \quad I-=O \quad M \rightarrow O$	$A=N \quad B=C \quad V_{m0,nc}$
V_M	$I+=M \quad I-=P \quad M \rightarrow P$	$A=O \quad B=N \quad V_{mp,on}$
V_N	$I+=M \quad I-=N \quad M \rightarrow N$	$A=O \quad B=P \quad V_{mn,op}$

说明：“ $I+=M \quad I-=O \quad M \rightarrow O$ ”——M 端接恒流源的正极，O 端接恒流源的负极，电流流向是从 M 到

O。“Vom,pn”——电流从 M 到 O 时，P 端到 N 端的电压。A 为微伏表正端 V_{Hi} ，B 为微伏表负端 V_{Lo} 。

二、实验仪器系统组成

本仪器系统由可换向永磁磁铁、SV-12 变温恒温器、控温仪、CVM-200 霍尔效应测试仪、连接电缆和装在恒温器内冷指上的霍尔探头、标准样品组成。主要仪器如图 7 所示。



图 7 霍尔效应测试系统

本系统各部件均有独立的使用说明和详细的技术指标，此处只列出系统的主要技术指标：

- 磁场：大于4000高斯
- 样品电流：0.1纳安~200毫安
- 测量电压：2微伏~2000毫伏
- 控温精度：可达 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}/30$ 分钟（与实验技巧有关）
- 变温范围：80~320K
- 恒温器液氮容量：200毫升
- 静态液氮保持时间：4~6小时（与预抽真空有关）

为本仪器系统专门研制的 CVM-200 霍尔效应测试仪将恒流源、微伏表及霍尔测量复杂的切换继电器、开关组装成一体，大大减化了实验的连线与操作。CVM-200 霍尔效应测试仪还可单独做恒流源、微伏表使用。系统可以控制样品温度在 80K 到 320K 范围之间连续变化，并能根据实验者的要求控制温度的变化。样品安装在恒温器的控温冷指上，外罩细尾真空罩。系统的抗干扰性能较好，误差较小。

1、SV-12 低温恒温器

SV-12 恒温器是利用稳态气泡原理（SVB）控温的低温恒温器，如图 8。其主液池中装有液氮，通过调节锥形气塞间隙，改变气-液界面的成核沸腾条件，使恒温块的漏热稳定在一定值上，再通过控温仪调节加热电流就可以使样品在低温液体温度到室温（80~300K， $\pm 0.1\text{K}$ ）之间快速变温，并准确地平衡在设定温度上；通过减压-控压，也可以达到更低温

度。与其它控温方式相比，SVB 恒温器具有温区宽、低温下控温方便、致冷剂消耗少、无机械振动、样品在真空中等优点。

操作低温恒温器时需要注意的事项如下：

- 1) . 灌液氮前，认真检查，确保容器内无明显水迹；
- 2) . 取出中心杆，注满液氮，等 15 分钟，待容器冷透后再将液氮补满；
- 3) . 中心杆要用液氮预冷透；
- 4) . 湿手不能触及过冷表面、液氮漏斗，防止皮肤冻粘在深冷表面上，造成严重冻伤！灌液氮时应带厚棉手套。如果发生冻伤，请立即用大量自来水冲洗，并按烫伤处理伤口。

5) . 换装真空室里的样品时，必须先用 Pt 电阻温度计检查，等样品回复室温后才可以从真空阀放气，取下尾部，更换样品。真空夹层不能长时间暴露在空气中，操作应尽快进行，然后用机械泵抽真空至 1Pa，关闭真空阀，即可重新进行新实验。

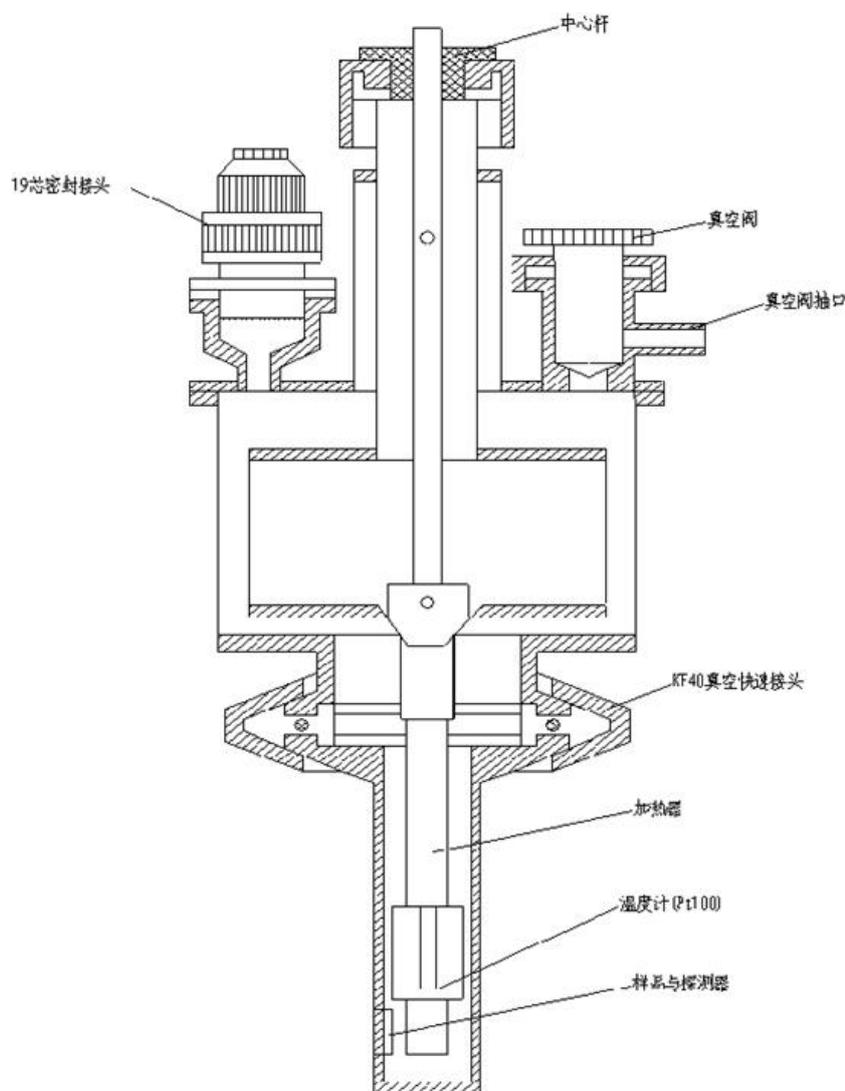


图 8 SV-12 低温恒温器

2、可换向永磁铁

实验时先将永磁铁放置在工作台上，再将恒温器插入永磁铁正中的孔中。图 9 是永磁铁

的俯视结构示意图。实验者可将可换向永磁铁的不锈钢座平放在工作台上，顶部长圆滑动孔横置在实验者左前方，转动中间黑色的磁体，使上面的商标面对实验者。此时磁场方向与商标垂直，N极在靠近实验者一边。将中间黑色的磁体转动180°即可使磁场反向。将恒温器在长圆滑动孔中向左滑动平移就可以将样品移到无磁场区域。

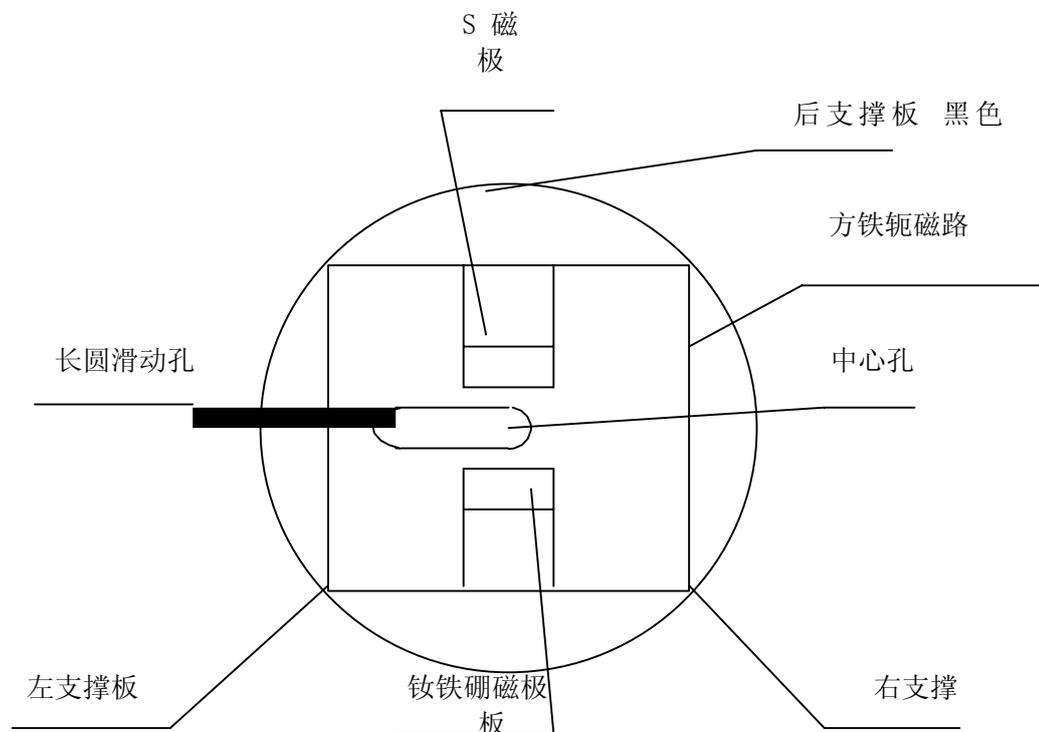


图9 可换向永磁磁铁俯视结构示意图

3、温度控制仪

温度控制仪专门用于低温实验的温度控制，具有分辨到0.1K的数字显示、稳定、调节方便的特点，其输出为经可控硅移相、连续调制的直流低压加热电流，对其他测量仪器的电磁干扰小，使用安全。

主要技术指标

- 控温温区：±200℃（千万不要设定高于恒温器容许的最高温度40℃，以防烧坏恒温器）
- 显示方法：数字直接显示被测控位置温度
- 显示误差：小于 ±1.0% FS ±0.1K
- 设定偏差：小于±0.1K
- 两档输出：最大输出分别对应最高电压为：100%=24VDC 15%=12 VDC
- 最大允许输出电流为1安培（注意：一定要与恒温器加热器最大容许电压、电流和功率匹配，以免烧坏加热器，引起极大的麻烦）
- 温度系数：25±10℃时小于每度0.05%
- 电源：220V AC±10% 50赫兹 小于40W（用0.5安培保险管）

- 外型尺寸：宽 217 毫米；高 104 毫米；长 320 毫米。

使用方法：

- 后面板：插接电源线，经后面板接头接恒温器的 Pt100 铂电阻温度计和加热器。
- 最大输出开关：有三档分别是 5%、15%、100%。红灯点亮表示输出加热。
- 温度设定：中间的数码管显示设定的温度值。按前面板上的▲键或▼键可设定或者修改温度设定值。
- 温度控制：左边的数码管显示测量的温度值。在控温过程中，测量的温度值会逐渐接近于设定值，但是会有一定的波动。

4、实验样品

本仪器中的两块样品均为范德堡法样品，其电阻率较低。

- ◆ 1 号样品 (S_1)：美国 Lakeshore 公司 HGT-2100 高灵敏霍尔探头，
工作电流 ≤ 10 mA，室温下的灵敏度为 55—140mV/kG
- ◆ 2 号样品 (S_2)：厚 1.11 mm，铽化钕，最大电流 60mA。

三、实验内容与实验步骤

1. 实验准备

a) 查看样品（由于出厂时样品已经放好，故不需装入样品）：拧开真空开关，打开卡箍，即可小心地取下恒温器的细尾部，观看恒温器的结构、样品的电极焊接。查看完后，安上恒温器的细尾部并用卡箍卡紧。

b) 对恒温器抽真空到 2~3Pa。

c) 将永磁铁放置在工作台上，再将恒温器插入永磁铁正中的孔中。

d) 检查，确定接线正确。

e) 打开 CVM-200 霍尔效应测试仪的电源开关，进行预热。设定微伏表为 2000mV 档，设定恒流源输出一个比较小的电流。

2. 室温下霍尔测量

a) 打开控温仪的电源开关，读取测量的室温值；

b) CVM-200 霍尔效应测试仪样品开关选择样品 S_2 ，调整样品电流到合适值。测量时，将恒温器放置在磁场正中心，按下开关 V_H ，测霍尔电压 V_{H1} ，如果电压较小，改到 200mV 或 20mV 档；按电流换向开关，测 V_{H2} ；将黑色的永磁磁体转 180° 后再测 V_{H3} ；电流换向，测 V_{H4} ；将恒温器水平左移，使样品处的磁场为 0，按 V_M 开关，测 V_{M1} ；按电流换向开关，测 V_{M2} 。按 V_N 开关，测 V_{N1} ；按电流换向开关，测 V_{N2} ；

c) 用同样的步骤测量样品 S_1 。

3. 变温测量

a) 取出恒温器的中心杆，分 3 次向杜瓦瓶里加灌液氮，插入恒温器的中心杆，拧到底再回转一圈；

b) 设定恒温器温度为一个比较低的值（100K 附近）。控温时顺时针转动中心杆至最低

位置，再回旋约 $180^\circ \sim 720^\circ$ 即可通过控温仪设定控温了；

- c) 等待温度稳定时，依照步骤 2-b 对样品 S1、S2 进行测量并记录数据；
- d) 改变设定温度，等待温度稳定后，重复上步步骤；
- e) 从液氮温度到室温之间选定十几个实验点，测量并记录下数据。由于样品 S2 的导电类型的转变温度大概在 160K 至 170K 之间，所以开始温度可以不必取得很低。

4. 整理实验仪器，关闭仪器电源，将恒温器中的剩余液氮回收。

四、霍尔效应的实验数据处理

1. 霍尔系数和载流子浓度：

霍尔电压的方向与电流方向、磁场方面和载流子类型有关，具体详见教科书。本系统所提供的标准样品在室温下为 n 型载流子导电，在液氮温度时为 p 型载流子导电。请于实验前用指南针确定电磁铁磁极性与电流方向的关系，供实验判断载流子类型用。

进行霍尔测量时，由于存在热电势、电阻压降等副效应，故要在不同电流方向和磁场方面下进行四次霍尔电压测量，得到四个值： V_{H1} 、 V_{H2} 、 V_{H3} 、 V_{H4} 。

最后，霍尔电压：

$$|V_H| = \frac{1}{4}(|V_{H1}| + |V_{H2}| + |V_{H3}| + |V_{H4}|) \quad (18)$$

$$\text{霍尔系数: } R_H = \frac{V_H t}{IB} \quad (19)$$

式中： V_H 是霍尔电压，单位为伏特； t 是样品厚度，单位为米； I 是通过样品的电流，单位为安培； B 是磁通密度，单位为韦伯/米²；霍尔系数的单位是：米³/库仑。

对于单一载流子导电的情况：

$$\text{载流子浓度为: } n = \frac{10^{19}}{1.6R_H} (\text{米}^{-3}) \quad (20)$$

2. 电阻率：

标准样品的电阻率：

$$\rho = \frac{twV_\sigma}{IL} (\text{欧姆} \cdot \text{米}) \quad (21)$$

其中： V_σ 为电导电压（正反向电流后测得的平均值），单位为伏特； t 是样品厚度，单位为米； w 是样品宽度，单位为米； L 是样品电位引线 N 和 C 之间的距离，单位为米；而 I 是通过样品的电流，单位为安培。

对范德堡样品：

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\pi t}{2f \ln 2} (R_{mp.on} + R_{mn.op}) \\ &= \frac{\pi t}{4If \ln 2} (|V_{M1}| + |V_{M2}| + |V_{N1}| + |V_{N2}|) \end{aligned} \quad (22)$$

其中： I 为通过样品的电流（假设在测量过程中使用了同样的样品电流）， f 为形状因

子，对于对称的样品引线分布， $f \approx 1$ 。

3. 霍尔迁移率：

$$\text{霍尔迁移率：} \quad \mu = R_H / \rho \quad (23)$$

对于混合导电的情况，按照上式计算出来的结果无明确的物理意义。它们既不代表电子的迁移率，也不代表空穴的迁移率。

五、思考题

- 1、如何确定霍尔电场的方向？
- 2、在本实验中哪些因素影响霍尔系数的正确测量？怎样克服这些因素的影响？
- 3、如何选取温度点进行测试才会更好的得到霍尔系数的曲线？
- 4、霍尔系数测量中有哪些负效应？通过什么方式消除它们？哪种负效应不易消除？
- 5、如何把爱廷豪森效应从霍尔测量结果中分离出来？
- 6、霍尔系数是如何定义的？在什么物质中（导体还是半导体）—霍尔系数强烈地依赖于温度？
- 7、霍尔系数的测量结果是否与样品的几何形状有关？是否与样品性质的均匀有关？
- 8、磁阻效应对霍尔系数测量结果有什么影响？如何减小该影响？
- 9、试估计霍尔系数测量的精度。
- 10、如果已经知道某一材料的霍尔系数，我们可以根据它得到哪些其他的材料的参数？可以设计哪些实验来通过霍尔系数测量其他物理量？

六、实验报告要求

1. 原始数据表格。
2. 数据处理：根据实验测量结果，逐一计算不同温度条件下的电阻率 ρ 和霍尔系数 R_H 。根据计算出的电阻率及霍尔系数，作 σ （即 $1/\rho$ ） $\sim (1/T)$ 以及 $|R_H| \sim (1/T)$ 曲线，指出杂质电离饱和区的温度范围，指出样品 S2 的霍尔系数为零时的大概温度。
3. 分析实验中的测量误差来源，以及它们对实验结果产生的影响。
4. 完成实验思考题。（选做）

七、参考文献

- [1] 熊俊. 近代物理实验. 北京：北京师范大学出版社，2007
- [2] 黄昆. 固体物理学. 北京：高等教育出版社，1988
- [3] E.H.Putley, The Hall effect and related phenomena, London Butter-worths, 1960
- [4] 中国科学院半导体所 理化测试中心，半导体检测与分析 科学出版社，1984
- [5] L. J. Van der Pauw, Philips Technical Review, 20, 220(1958-1959)

实验二十四 恒流源及脉冲法测试实验

恒流源电路在工程实践中有着广泛的用途。可以用来测量电阻值，为磁控溅射台、粒子加速器等设备的电磁铁提供稳定电流，达到稳定磁场的作用。也可用于检测热继电器、塑壳断路器、小型短路器及需要设定额定电流、动作电流、短路保护电流等场合。当前正在飞速发展的 LED 照明也是用恒流源驱动的。

本实验的目的是：了解恒流源工作原理及电流镜原理；了解四端法微电阻测试技术原理；掌握脉冲法测试技术及同步采样技术。

恒流源的实质是利用器件对电流进行反馈，动态调节设备的供电状态，从而使得电流趋于恒定。只要能够得到电流，就可以有效形成反馈，从而建立恒流源。

一、 基本概念：

恒流源是输出电流保持不变的电流源，而理想的恒流源具备以下特点：

- a) 输出电流不因负载阻抗的变化而改变，输出电流负载调整率为“0”；
- b) 不因环境温度变化而改变；
- c) 内阻为无限大。

恒流源的电路符号如图 1 所示：

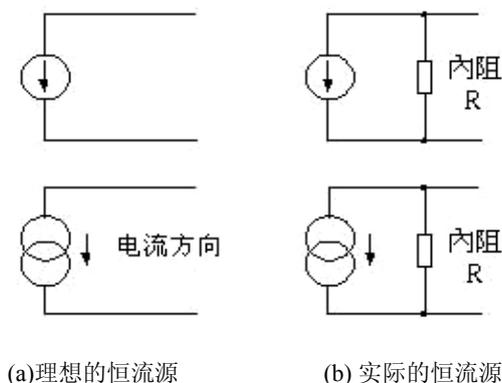


图 1 恒流源的电路符号

工程上实用的恒流源，其各项特性指标都是有限的，实际应用中的恒流源，还有最大带载阻抗或最大输出电压的限制指标。

恒流源电路中，随着负载电阻 R 的增大，负载两端的电压 U 也增大，但是为了保证恒流输出条件， U 是有范围的。当负载电阻太高时，恒流源将不再具有恒定电流输出，因此恒流源电路存在一个最大带载阻抗的限制指标。

二、 实验原理

大家知道，双极型三极管是典型的电流控制器件，利用三极管的恒流特性可以设计一个恒流源。

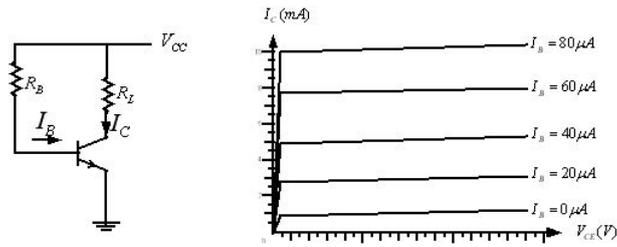


图2 三极管组成的恒流源电路

从三极管特性曲线可见，工作区内的集电极电流 I_C 主要受基极电流 I_B 控制，集电极电压 V_{CE} 对 I_C 的影响很微弱，因此只要 I_B 值固定， I_C 就基本稳定。而 V_{CE} 使 I_C 发生倾斜的程度，正反映了三极管恒流特性的非理想性。

输出电流 I_O 即是流经负载的 I_C 。

$$I_O = I_C = \beta \times I_B = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \approx \beta \frac{V_{CC}}{R_B} \quad (\text{假设 } V_{CC} \gg V_{BE})$$

但是三极管的恒流特性不够理想，通常目前设计恒流源时普遍采用电压参考器件与运算放大器，再配备大功率三极管或 MOS 管作为输出级，构成实际的恒流源。这样可以提高三极管的恒流特性。

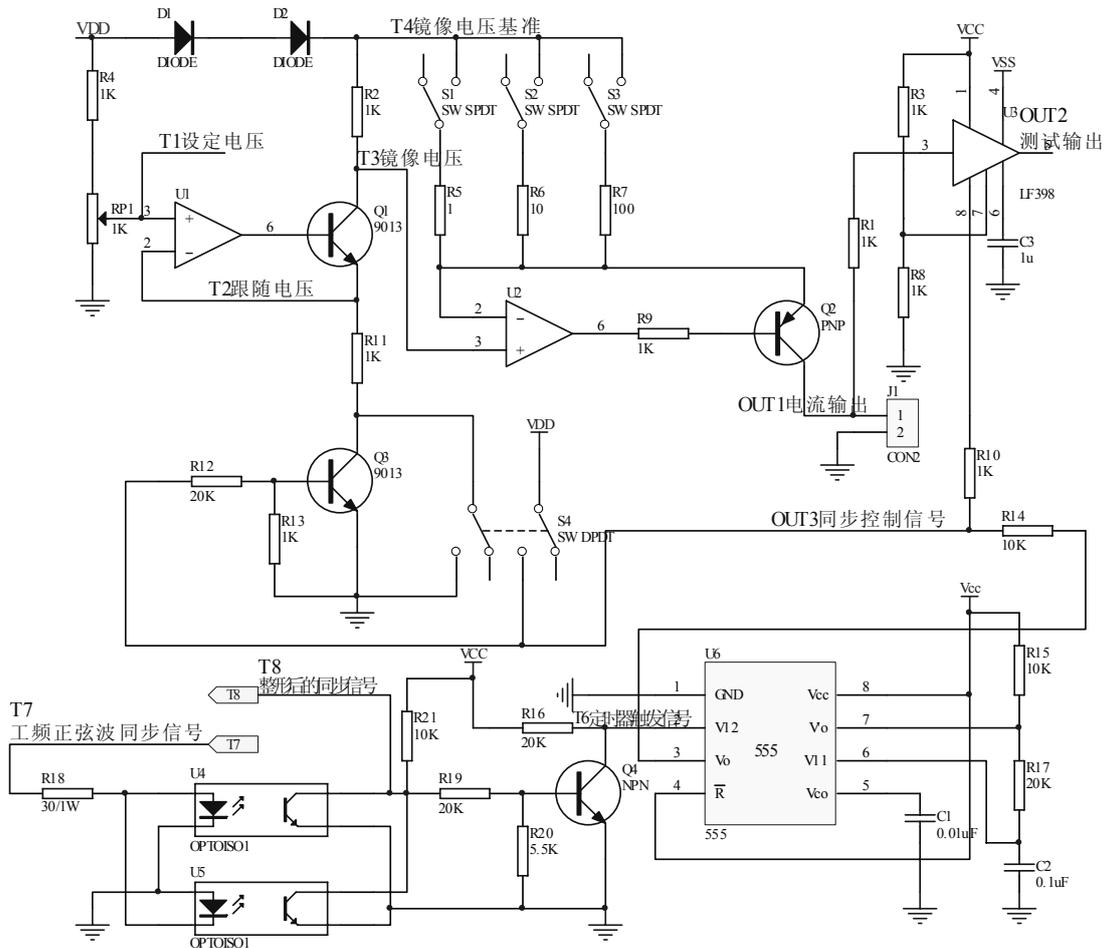


图3 实验电路图

如图 3 所示，恒流源实验电路中 U1、Q1 及其周围元件构成第一级恒流源，调节电位器 RP1 可以设定电流。镜像电压经过 U2 和大功率三极管 Q3 后，就得到了对地输出的恒流源。R5、R6、R7 分别为三路恒流电阻，电路接的恒流电阻不同恒流电流输出将改变。

在电路中，对应的三路最大输出电流分别为：500mA、50mA、5uA，最大带载能力为 8V 左右。

第一级恒流源如图 4 (a) 所示，根据运放的虚短虚断原理，跟随电压将恒定等于设定电压。又 R11 上的电流 I_{R11} ($I_E=I_{R11}$) 等于跟随电压除以 R11 的阻值，因此 I_E 将是一个恒定的值。在三极管电路中 $I_C \approx I_E$ ，因此流过 R2 上的电流是恒定的。第一级恒流源的电流输出即 I_{R2} ，但这个恒流源是一个浮地（输出端没有和地相连）输出，浮地电流输出在实际应用中不实用，会影响系统的稳定性。第二级恒流源如图 4 (b) 所示，在第二级恒流电路中，当镜像基准电压和镜像电压固定不变时，流过 R5、R6、或 R7 上的电流将是恒定的，又三极管的 $I_E \approx I_C$ 所以电流的输出是一个固定值。

在图 4 所示电路中的电压有如下关系：

跟随电压=设定电压

V_{R11} =跟随电压

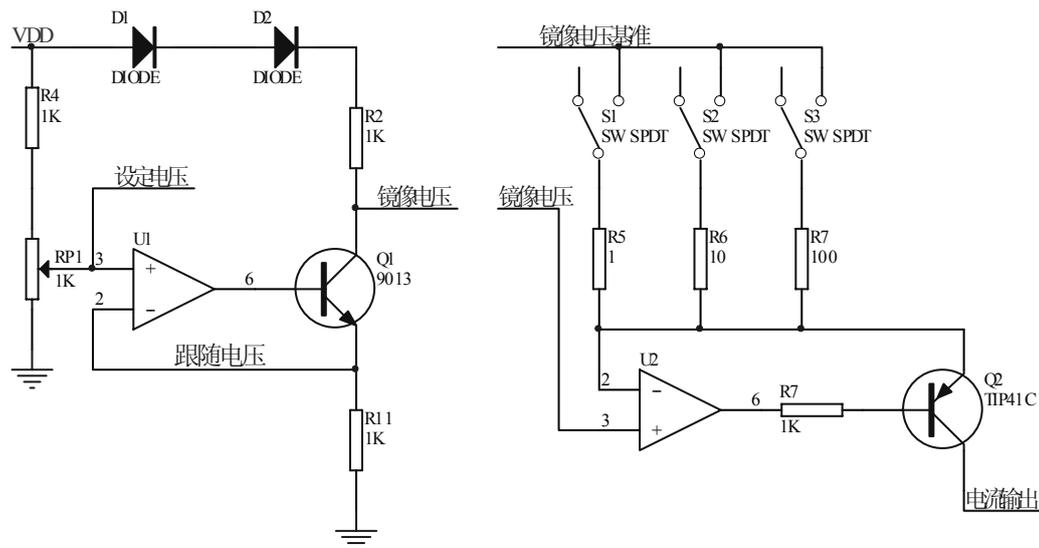
V_{R2} =镜像基准电压-镜像电压

由于 $R2=R11$ ， $I_C=I_E$ 则 $V_{R2}=V_{R11}$ ，所以得到：

设定电压=镜像基准电压-镜像电压恒流

所以电流值为：

$$\text{恒流电流} = \frac{\text{设定电压}}{\text{恒流电阻}}$$



(a)第一级恒流源

(b)第二级恒流源

图 4 第一、二级恒流源

在图 4 电路中的 D1 和 D2 可以保证电路的电流输出能设置为 0A。假如电路不接 D1 和

D2, 当设定电压设置为 0V 时, U1 的输出电压为 0V 控制 Q1 截止, 因此镜像电压等于 VDD。镜像电压输入到第二级恒流源时, 理论上 U2 要控制 Q3 使 U2 的反向输入端的点等于镜像电压, 所以此时 Q3 的状态应该是截止状态, 即 U2 的输出电压要大于等于反向输入端的电压。但是实际中 U2 的最大输出电压不能达到电源电压 VDD, 所以在不接 D1、D2 的情况下, Q3 的截止状态不能实现。引入 D1、D2 后, 镜像基准电压相对 VDD 有一个 1.4V 左右的压降, 这样就可以保证 U2 的输出电压能够满足大于等于反向输入端电压的要求, 使 Q3 能实现截止状态, 此时输出电流为零。

当测试对象的恒流源电流值较大时, 比如 1A 以上, 甚至几千 A 以上时, 用来产生恒流源电路的平均功率变得异常大, 电路内部功耗和被测件上的功耗也非常大。这不仅对测试精度影响很大, 而且实现起来也有很大难度, 这时就需要采用脉冲法进行测试。其原理是: 用占空比很小的窄脉冲电流, 甚至单次脉冲电流代替连续的直流恒流源进行测试, 同时配备与脉冲电源同步的采样测试电路进行测试。这种方法可以完美解决大电流测试和低功耗要求的矛盾, 是工程实践中的常用方法。

如图 5 所示, 在 T7 处输入正弦信号, 通过 U5、U6 (PC817 光电耦合器) 进行同步采样使 T8 输出正向脉冲信号。在 T8 处输出的为正向脉冲信号, 通过三极管 Q4 将正向脉冲信号反相, 得到的反向脉冲输入到 555 芯片中。555 芯片的外围电路是单稳态触发器的标准外围电路, 输出的 PWM 信号一个输入到三极管 Q3 的基极上, 一个输入到采样保持电路的控制端上。Q3 通过 PWM 信号来控制它的工作状态, 当 PWM 信号为高电平时 Q3 导通, 恒流源工作; 当 PWM 信号为低电平时 Q3 截止, 恒流源不工作。

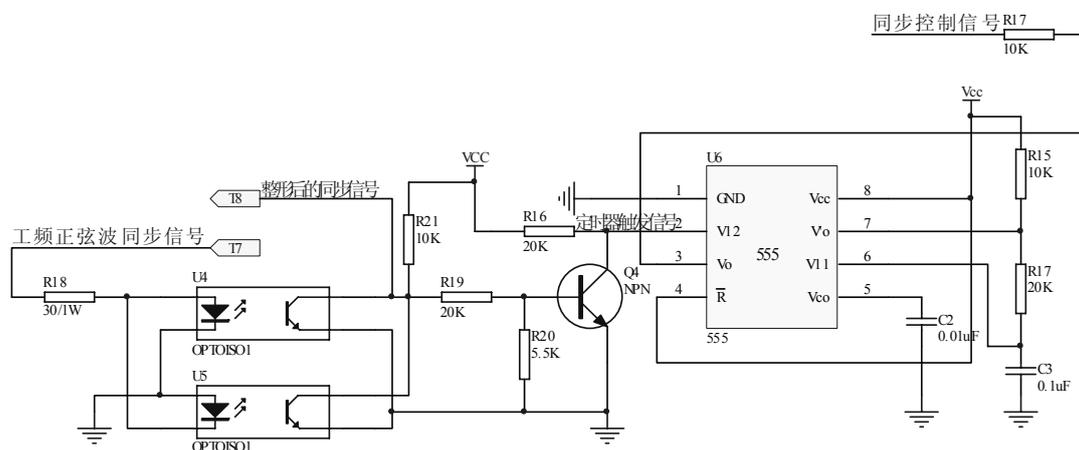


图 5 同步采样信号产生电路

在图 3 中开关 K4 用来选择电流的测量模式: 当 K4 接右边时输出脉冲电流, LF398 的控制端接的是采样信号, LF398 电路根据采样信号进行采样。当 K4 接左边时输出持续电流, 这个时候 LF398 的控制端接的是 VDD, 使 LF398 电路保持在采样状态。这种采样称为同步采样。

四端法测试技术 (即一对电流端, 一对电位端), 如图 6 所示,

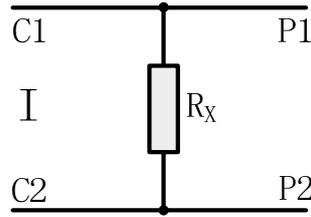


图6 四端法测试原理图

R_x 为被测电阻，由恒流源提供恒定电流源，即 C1、C2 为电流端，P1、P2 为电位端，采用四端测试技术，可有效消除接触电阻与连线电阻的影响，可以用来测试微小电阻，最小到毫欧，甚至微欧。例如继电器接点电阻，开关的触头电阻。

三、 实验内容：

1. 在“恒定电流”模式下测量不同恒流电阻时恒流源的电流输出；
2. 在“恒定电流”模式下测量不同阻值的负载时恒流源的恒流特性；
3. 在“测脉冲”模式下测量电路的波形输出和恒流源的特性。

四、 实验步骤：

实验仪器：综合实验台、万用电表、恒流源实验模块。

“测恒流源”

1. 用万用表测 T1 点电压，并调节 RP1 使设定电压为 0.5V，这时跟随电压测试点 T2 也为 0.5V，开关 K4 断开， $U_{t3} < U_{t4} < V_{DD}$ 。

2. 闭合开关 K4， $U_{t4} - U_{t3} \approx 0.5V$ ，此时理论上 R2 与 R11 两端的镜像电压都为 0.5V，但由于实际中 R2 和 R11 的阻值有偏差，而且三极管的集电极电流大于发射极电流，因此往往 U_{R2} 大于 0.5V。测量 R2 两端的电压，若不等于 0.5V，调节 RP1 使 $U_{R2} = 0.5V$ 。

3. 为计算方便，选择负载 R 的阻值为 1Ω，10Ω，100K。若负载 $R = 1\Omega$ ，当闭合 K1 时，输出电流为 500mA，则 $U_R = 500mA \times 1\Omega = 0.5V$ ；当闭合 K2 时，输出电流为 50mA，则 $U_R = 50mA \times 1\Omega = 0.05V$ ；当闭合 K3 时，输出电流为 0.005mA，则 $U_R = 0.005mA \times 1\Omega = 0.005mV$ ；再用万用表测负载上的电压，看是否等于计算出来的电压。

4. 同理，更换负载 R 的阻值，同样看用万用表测出来的电压是否与计算出的电压相等。（因为是恒流源，所以当设定电压是定值时，则闭合 K1、K2 或 K3 时，输出电流也为定值，与负载 R 无关，所以可以根据这个原理测出未知电阻 R 的阻值）

“测脉冲”

1. 用万用表测 T7 测试点输入同步信号电压值（交流）。

2. 再观察 T7（交流正弦波）、T8 交流过零检测（正向脉冲信号）、T6（负向脉冲信号）、OUT3（正向脉冲信号）、T3\T4（负向脉冲信号）的波形。测脉冲信号时，开关 K4 断开（T1 检测设定电压，T2 检测设定电压的跟随电压，T4 镜像电压基准，T3 检测镜像电压，OUT1 检测 P1 电流输出，OUT2 检测采样电压，OUT3 检测同步输出信号，T7 检测工频正弦波同步

信号输入，T8 检测整形后同步信号输出，T6 检测计时器脉冲触发信号)。

五、 分析实验结果:

设定电压 U_{T1}	I_{R5} (闭合 K1)	I_{R6} (闭合 K2)	I_{R7} (闭合 K3)	负载 $R=U_{P1}/I$

I 为分别闭合 K1、K2、K3 是的输出电流。 U_{P1} 为负载 R 上的电压。

实验二十五 功率放大电路的测试

功率放大电路是一种将给定频率、电压等特征参数的信号进行放大并输出要求的电压、电流及功率的电路。通常要求电路在失真许可的范围内，高效地为负载提供尽可能大的功率。功放管的工作电流、电压的变化范围很大，所以三极管常常是工作在大信号状态下或接近极限运用状态。常用的功率放大器有线性功率放大器、谐振功率放大器、开关功率放大器，其中线性功率放大器又包括甲类、乙类、甲乙类等各种工作方式。为了提高效率，改善电源利用率，可以将放大电路做成推挽式电路（半桥及双桥式）。将功放管的工作状态设置为甲乙类，可以减小交越失真。

功率放大器可以由分立元件组成，也可由集成电路实现。本实验通过这二种电路来了解集成功率放大器与分立器件功率放大器的区别；学习互补对称功率放大器基本结构，各部分电路功能，一般设计方法；输出功率，频率响应，失真分析等基本指标的测量方法，加深对互补对称功率放大器工作原理的理解；观察互补功率放大器的交越失真现象，了解克服交越失真的方法；掌握高、低音调节方法，观察音调调节与波形变化的关系，并分析音调，音色与信号基波，谐波等特征参数的关系。

一、 实验器材：

综合实验台、万用电表、功率放大器实验模块、示波器。

二、 实验原理：

功率放大电路按其电路结构可分为：通用集成运放与分立元件组成的 OCL 功率放大器和集成功率放大器电路。

(1) 通用集成运放与分立元件组成的 OCL 功率放大器

由分立元件组成的功放，如果电路选择得好，参数选择恰当，元件性能优良，设计和调试的好，性能也很优良，许多优质功放均是分立功放。选用分立元件组成的功放作为实验对象，可以清晰的反映每一块局部电路的物理概念，容易看清设计方法及参数选择原则。

图 1 是一个由分立元件构成的互补对称 OCL 电路，电路由缓冲放大级、音调控制级、电压推动级和复合输出级构成。

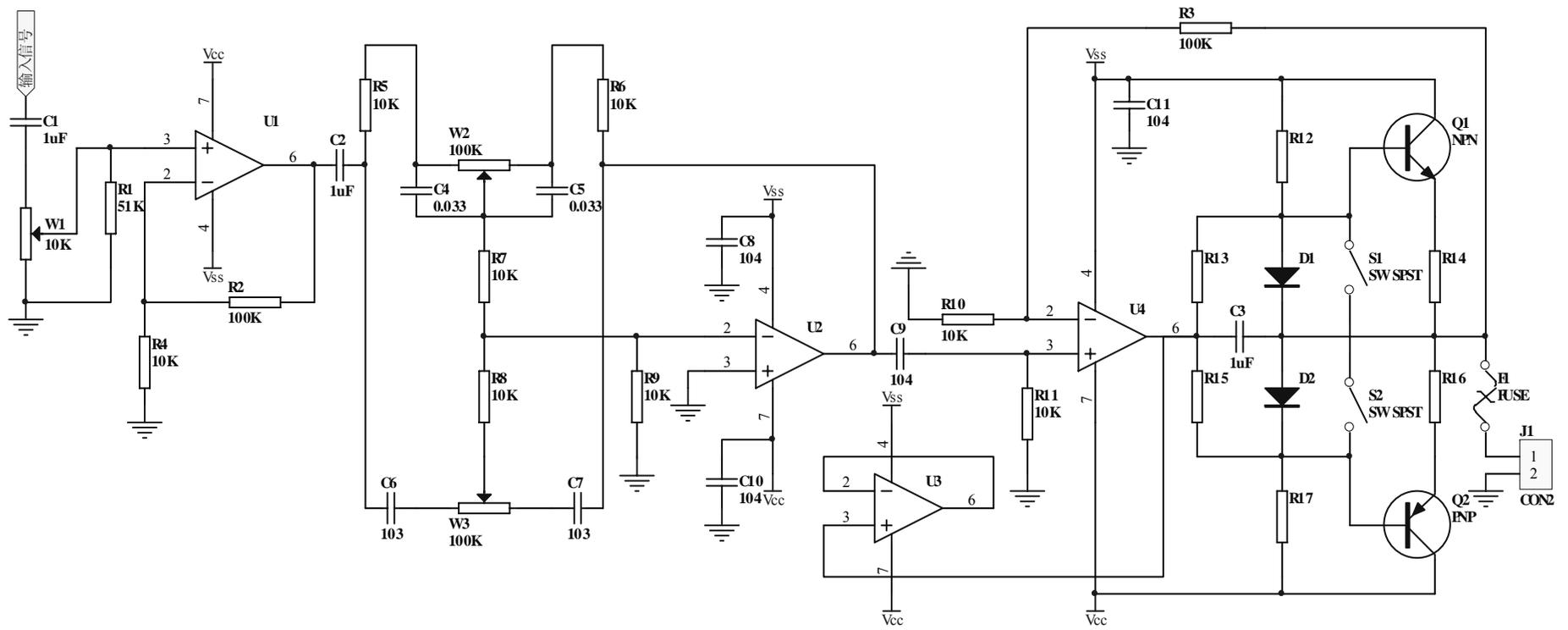


图1 由分立元件构成的互补对称 OCL 电路

1、 缓冲放大级：

该模块由外部电路及运放组成，通过调节外部电路中电阻元件的大小进一步调节输入信号，运放及其外围电路可以实现对输入信号的放大。

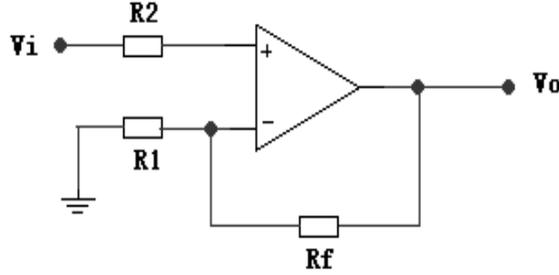


图 2 缓冲放大电路 $V_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})V_i$

2、 音调控制放大电路：

音调控制是指人为地调节输入信号的低频、中频、高频成分的比例，改变音响系统的频率响应特性，以补偿音响系统各环节的频率失真，或用来满足聆听者对音色的不同爱好。反馈式音调控制电路只改变电路频率响应特性曲线的转折频率，而不改变其斜率。反馈式音调控制电路可以很好地补偿音响系统的频率失真，而且适应于人耳的听觉特性。

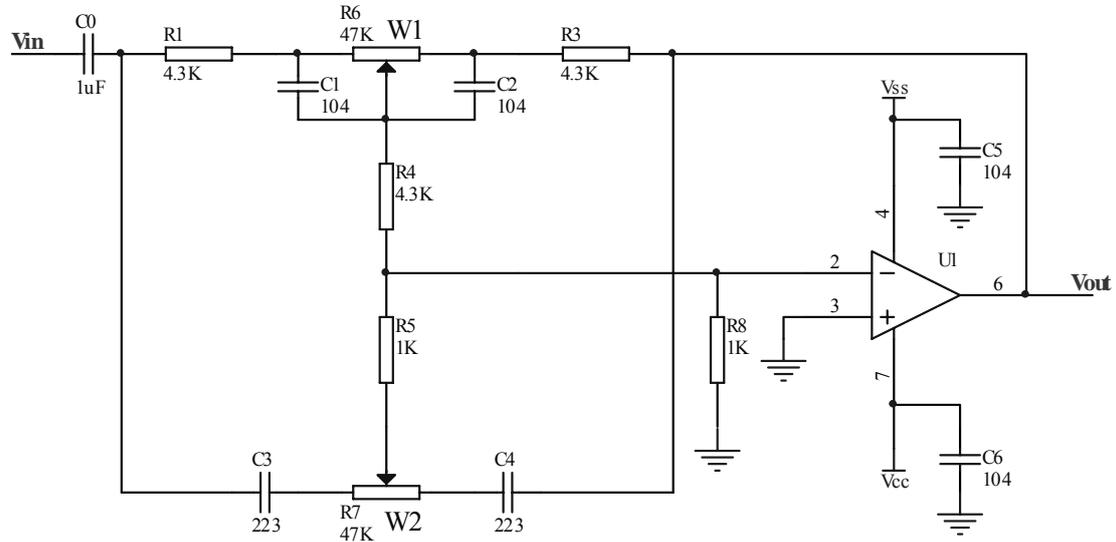


图 3 音调控制放大电路

当输入混合信号时，由于电容通高阻低的作用，C1、C3 对低频信号相当于开路，对高频信号相当于短路，高频信号经 C3 或 R1、C1 流向运放反相输入端，低频信号则流经滑动变阻器进入反相端，当 W1 置于某一位置时，根据虚短及虚断的原理，得

$$\frac{U_1}{R_1 + Z_1 // W_{11}} = \frac{0 - U_o}{R_3 + W_{12} // Z_2} \quad A_{iv} = - \frac{R_3 + Z_2 // W_{12}}{R_1 + Z_1 // W_{11}}$$

当 W1 从左向右滑时，W₁₁ 增大，W₁₂ 减小，A_{iv} 减小，该电路为低频衰减电路；

当 W1 从右向左滑时, W_{11} 减小, W_{12} 增大, A_{iv} 增大, 该电路为低频提升电路;

当 W1 置于最左端时, 输入端 R6 短路 ($W_{12}=R6$), 反馈端 R6 达到最大,

$$\frac{U_i}{R_1} = \frac{0-U_o}{R_3+R_6//Z_2} \quad A_{iv} = -\frac{R_3+R_6//Z_2}{R_1}$$

当 W1 置于最右端时, 输入端 R6 达到最大, 而反馈端 R6 短路,

$$\frac{U_i}{R_1+R_6//Z_1} = \frac{0-U_o}{R_3} \quad A_{dv} = -\frac{R_3}{R_1+R_6//Z_1}$$

高频信号调节原理分析相同:

因此可以通过调节滑变改变对应电路阻抗值大小, 进而调节高、低频信号比例, 达到音调调节的目的。

图 3 中 C5, C6 接在电源输入端, 组成两个退耦电路。由于电路系统中变化的电流对系统供电电源里的电源内阻起作用, 从而导致电源向电路输出实际电压产生抖动。因此加入退耦电容有利于稳定电源电压。其参数大小一般为 0.1~10uf 之间均可。

R8 是一个平衡电阻, 运算放大器的平衡电阻是用来平衡运放的两个输入端子的失调电流的, 使得两个端子的电压平衡。运放输入级一般都采用差分对称结构, 差分对结构要求电路严格对称, 而实际情况是两管的 β 值不可能完全一致, 因此导致输出端有失调电压, 因此为了减小失调电压, 在设计时加上平衡电阻来调节两管的电流。

3、电压推动级:

该模块主要由一运算放大器组成, 用于对上级输出信号进行放大。

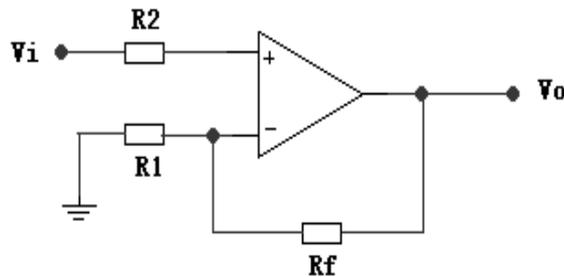


图 4 电压推动电路 $V_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})V_i$

4、复合输出级:

在多级放大电路中, 输出级的任务是推动负载工作, 因此要求有较大的输出功率, 即要向负载提供较大的信号电压和信号电流。一般采用甲乙类双电源互补电路, 可以避免交越失真。

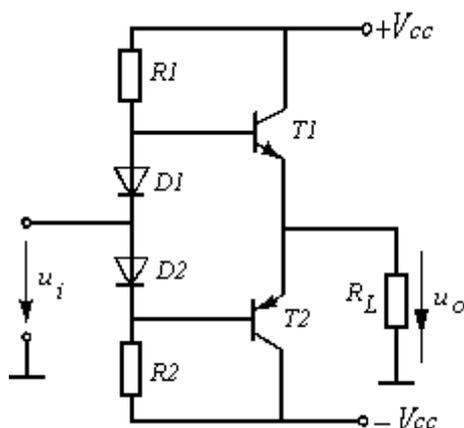


图5 甲乙类双电源互补电路

图5为一甲乙类双电源互补对称电路，该电路是对乙类双电源互补对称电路的改进，由于乙类双电源互补对称电路Q点为零，而BJT存在一定的门坎电压，因此乙类双电源互补对称电路输出会出现交越失真。

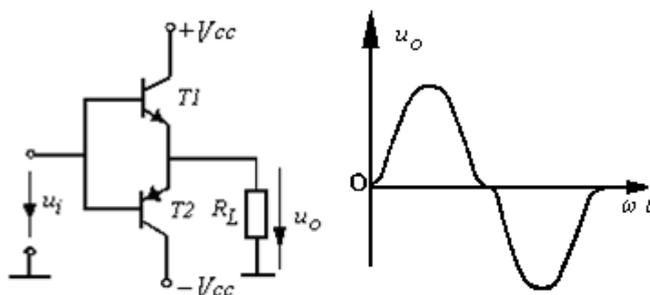


图6 乙类双电源互补对称电路

图5中偏置电阻R1，R2用于向电路提供适当的偏置电流，而D1，D2在静态时各自产生一个压降，使T1，T2处于微导通状态。因此在有输入信号时，可以避免产生交越失真。

$$\text{负载可以获得最高电压为: } U_{om} = (V_{cc} - U_{ce01}) \frac{R_{p1}}{R_{p1} + R_9}$$

$$\text{最大不失真输出功率: } P_{om} = 1/8 \times (U_{om}^2 / R_{p1})$$

(2) 集成运算放大器:

集成功率放大器与分立元件组成的电路比较，有以下特点:

1) 体积小，重量轻，外接元件少，调试简单，使用方便。由于大批量生产，成本较低，价格也较便宜。

2) 由于集成器件可以通过工艺提高管子的对称性，减小分布参数的影响，所以在性能上可以十分优良。例如：温度稳定性好、功耗低、电源利用率高、失真小等。

3) 集成电路在设计中一般都增加有各种保护电路，如过流保护、过热保护、过压保护和启动、消除噪声等电路，所以集成功率放大器性能稳定，可靠性很高。

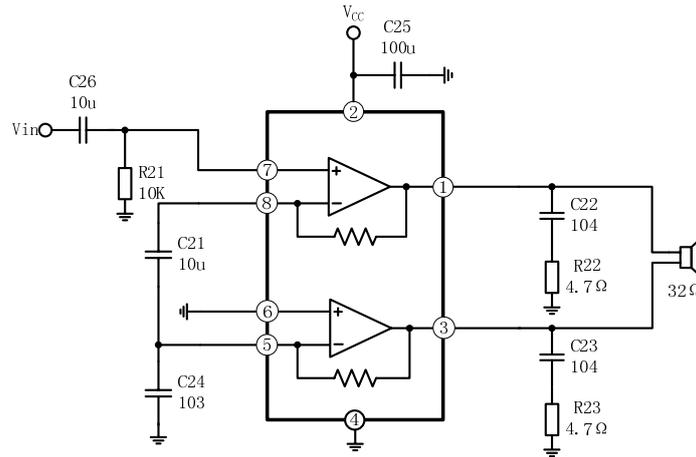


图 7 集成运放 TDA2822 组成的功率放大电路

该电路是 TDA2822 的单声道 BTL 接法，具体元器件功能如下：

C26 是用来滤掉直流信号，直流信号会烧坏电路；R21 是偏置电阻，是用来产生大小合适的输入电压；TDA2822 内部如图 7 所示，7、6 为两功放的正输入端，5、8 为负输入端，由于为单声道接法电路，所以 6 接地，5、8 接电容接地，C21、C24 电容是反馈电容，这个电容值的大小影响放大器的一小频响和一小些增益；C25 为电源的滤波电容；C22、R22 与 C23、R23 一样，组成茹贝尔网络（相关知识见附录），茹贝尔网络是个负载的补偿网络，防止喇叭的反电动势的影响，网络可以不要，不会有太大的影响。

注意：两个电路都要输入交流信号，若输入直流，会烧坏电路，所以需在输入级串联一个大小约为 10uf 的电容，用来滤除直流信号。

三、 注意事项：

1. 拔插连接线时，严禁牵拉导线，而应捏住插头拔出，以免拉坏连接线。
2. 动手实验之前，必须看懂实验原理图。
3. 集成功放实验，先不接扬声器，接上电源，则正负输出端之间电压应小于 0.1V。

四、 实验步骤：

1. 开启电源，测各 LM358N 运放电源管脚电压是否为直流电压 $\pm 12V$ （一般是 4、8 脚）。测 TDA2822M 集成功放管脚 2 输入电压是否为直流电压 $+12V$ 。
2. 将 INPUT1 输入 100Hz 正弦波，500mV 信号，观察输出电压 UT1、UT2、UT3 的波形，并观察交越失真波形，并记录各波形输出电压值及波形幅值。
3. 观察测试点 T3 上的输出波形，分别闭合 S1、S2 及同时闭合 S1、S2，观察交越失真波形变化情况，并记录各波形输出电压值及波形幅值。
4. 逐步增大 INPUT1 输入信号的幅值，直至输出电压幅度最大，而无明显失真时为止，并记录此时波形输出电压值及波形幅值。

5. 分别调节电位器 W2、W3，可改变负反馈的深度，观察输出电压的波形有何变化。

6. 将 INPUT2 输入 100Hz 正弦波，500mV 信号，观察两个输出通道波形，并记录各波形输出电压值及波形幅值（T1 检测缓冲级输出波形，T2 检测高低音调节输出波形，T3 检测交越失真波形，OUT1 检测功率放大器输出波形，OUT2 检测推动级输出波形，OUT3、OUT4 分别检测集成功率放大器的双通道输出波形，T7、T8 分别检测 INPUT1、INPUT2 输入信号由分立元件组成的功放，如果电路选择得好，参数选择恰当，元件性能优良，设计和调试的好，则性能也很优良，许多优质功放均是分立功放。选用分立元件组成的功放作为实验对象，可以清晰的反映每一块局部电路的物理概念，容易看清设计方法及参数选择原则。

五、 数据测量及记录：

1. 理论测试：

管脚	LM358N(管脚 4)	LM358N (管脚 8)	TD2882M (管脚 2)
理论电压值			
实测电压值			

2. INPUT1 输入 100Hz 正弦波，500mV 信号

输出电压	UT1	UT2	UT3
波形记录			
输出电压值			
输出波形幅值			

3. T3 点的测试

T3 状态	S1 开, S2 关	S1 关, S2 开	S1 开, S2 开
波形记录			
输出电压值			
波形幅值			

4. INPUT1 增大输入幅值增大直至稳定时的数据记录

INPUT1 输入幅值						
输出电压值						
输出波形幅值						

5. INPUT2 输入 100Hz 正弦波, 500mV 信号

	输出通道 1	输出通道 2
波形记录		
输出电压值		
输出波形幅值		

附录:

1)、OCL 电路

OCL 是英文 Output Capacitorless 的缩写,意思是“没有输出电容器”的功放电路。OCL 电路是指无输出耦合电容的功率放大电路,电路轻便并适于电路的集成化。

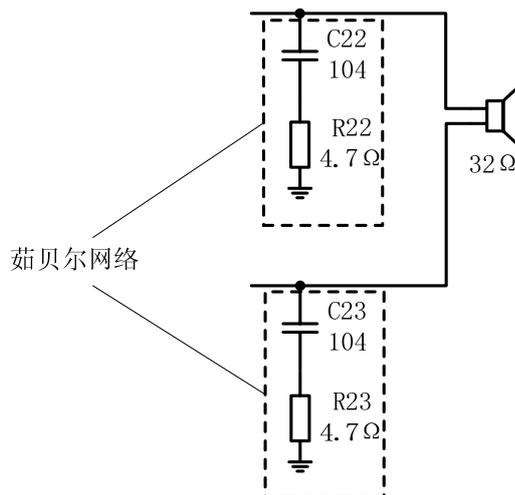
该电路的特点是:双电源供电、不需输出电容、频率特性好、可以放大慢变化的信号。但是它需要两组对称的正、负电源供电,在许多场合下显得不够方便。由于 OCL 电路输出端不用电容耦合,低频特性好,电源对称性强,因而噪声很小。

OCL 电路是一种互补对称输出的单端推挽电路,为甲乙类电路工作方式,是由 OTL(无输出变压器)电路改进设计而成的。它的特点是:前置、推动、功放及至负载扬声器全部都是直流耦合的,即省略了匹配用的输入、输出变压器,也省略了输出电容器,克服了低频时电容器容抗使扬声器低频输出下跌,低频相移的不足,以及浪涌电流对扬声器的冲击,避免了扬声器对电源不对称,使正负半周幅度不同而产生的失真,成为当今大功率放音设备的主流电路。

但是,整个放大电路的直耦方式,也成为电路的最大弊端:当某一级电路某一点出现故障时,多数情况下都将造成其余放大级电路静态工作点的牵连变化,出现无声、声音失真、沙哑甚至烧机,给检测、判断故障增加了很大难度。有时一个小小的失误或考虑不周,就造成大面积的烧机,损失严重,让人不敢开机。

$$\text{OCL 功率估算公式: } P_{om} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{cc}^2}{R_l}$$

2)、茹贝尔网络 (Zobel):



该电感线圈主要起高频扼流作用,与阻容支路组成茹贝尔网络,该网络已经存在半个世纪,主要作用是抵御和削减外电路(传输线、音箱等)收集的空间高频无线电波对功放电路的不良影响。也能抑制扬声器振动切顶导致瞬态高次谐波对功放的反作用干扰。

功放电路里,大多数商品机输出端对地会有一个几欧到几十欧的电阻串联 0.1 微法电容,

有的朋友以为这就是“茹贝尔网络”，其实，这个东西的作用，是吸收高频尖峰，避免高频自激，起稳定作用的。要说起到茹贝尔网络的作用，那也是微乎其微。

茹贝尔网络，是并联在低频喇叭上的一只电阻和一只电容的串联，使得低音喇叭在相当宽的频率范围内呈现近似纯阻，进而使分频点稳定，改善阻尼，改善相位失真。这个电阻跟电容的取值，电阻 R 取所用喇叭在需要补偿的频率下的阻抗，电容 C 的容抗取喇叭感抗 L/RR ，实际 R 一般取标称值，4 欧喇叭 C 大约是 4-10 微法，8 欧喇叭 10-20 微法。

这种网络能使放大器在工作频率范围内的输出阻性增加，从而增加了音讯放大器的稳定系数。在一个放大器驱动多个扬声器的场合，当使用交叉网路时，Zobel 保持着负载的阻性阻抗，使交叉网路的设计更简单。

所需电压。RP3 为调“0”电位器，RP2A 为输出信号增益调节电位器。C3A 和 C4A 用来滤除正负电源对地的纹波成分。

压力测量电路基本原理：

如图 1 所示，左边接压力电桥，5 为供给电压输出，4、2 为比较电压输入。当不施压时 4、2 输入电压为 0，经 N1、N2 后输入放大器 N4A，从而仪表放大器的输出为 0。当施加压力时，4 和 2 会有电压输入，这时 4 和 2 之间的压差比较小。先将小压差电压信号送给由 N1、N2、N4A 组成的仪表运放进行初步差分放大，仪表运放输出的压力信号再经过 N4B 进一步放大到可以显示和控制的值。

2、 温度测量

PT100 是铂热电阻，它的阻值和温度的变化成正比。PT100 的阻值与温度变化关系为：当 PT100 温度为 0℃ 时它的阻值为 100 欧姆，在 100℃ 时它的阻值约为 138.5 欧姆。铂电阻的特点是精度高，稳定性好，性能可靠。铂在氧化性的气氛中，甚至在高温的物理、化学性质都非常稳定。铂被公认为是目前制造热电阻的最好材料。铂电阻主要作为标准电阻温度计使用，也被用在工业测量中。

工业用的标准铂电阻 R_0 有 100Ω 和 50Ω 两种，并将电阻值 R_t 与温度 t 的对应关系列表格，成为铂电阻分度表，分度号分别为 PT100 和 PT50。

表 1 PT100 热电阻（0~140℃）分度表：

0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15
40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69
70	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52
80	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33
90	134.71	135.09	135.47	135.85	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13
100	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91
110	142.29	142.67	143.05	143.43	143.80	144.18	144.56	144.94	145.31	145.69
120	146.07	146.44	146.82	147.20	147.57	147.95	148.33	148.70	149.08	149.46
130	149.83	150.21	150.58	150.96	151.33	151.71	152.08	152.46	152.83	153.21
140	153.58	153.96	154.33	154.71	155.08	155.46	155.83	156.20	156.58	156.95

Pt100 热电阻采用三线制接法，采用三线制可以消除连接导线电阻引起的测量误差。这是因为测量热电阻的电路一般是不平衡电桥。热电阻作为电桥的一个桥臂电阻，其连接导线（从热电阻到测量电路）也成为桥臂电阻的一部分，这一部分电阻是未知的且随环境温度变化，会造成测量误差。采用三线制，将导线一根接到电桥的电源端，其余两根分别接到热电阻所在的桥臂及与其相邻的桥臂上，这样消除了导线线路电阻带来的测量误差。

铂电阻的三线制接法：

当测量电桥连接温度传感器的导线长到导线电阻不能忽略时，导线上的电阻会给测量数据带来误差，采用三线制接法可以减小这种误差。

二线制接法如图 2 中 (a) 所示，当导线电阻不能忽略时，相当于在 R_t (R_t 是热电阻) 上串联了一个电阻，如 (b) 所示，这时候测得的数据其实是 $R_t + \Delta r$ ，测得值大于实际值。

三线制接法如图 2 中 (c) 所示，其等效电路如 (d) 中所示。当连接传感器的三条导线电阻相等时，可以有效降低二线制接法中带来的误差。

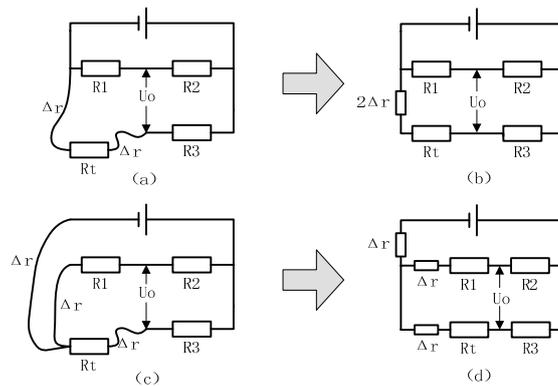


图 2 二线制和三线制接法和等效电路

在测试电路中，标称阻值为 100 欧的铂电阻与 R_1 、 R_2 、 $R_{p1}+R_3$ 共同构成测温电桥，铂电阻采用 3 线制接法。选用超低失调运放 OP07 搭成差动放大器，将电桥的压差信号放大。在反馈回路设置了电位器 RP_2 ，用来调节放大器的增益。

测温原理：测试电桥电压由稳压管 VW_2 产生 10V 的参考电压，采用 R_1 、 R_2 、 $R_{p1}+R_3$ 、 $Pt100$ 构成测量电桥 ($R_1=R_2$)，当 $Pt100$ 的电阻值和 $R_{p1}+R_3$ 的电阻值不相等时，电桥会输出一个毫伏级的压差信号，这个压差信号经过 N_5 放大后输出期望大小的电压信号。

实验原理图如下：

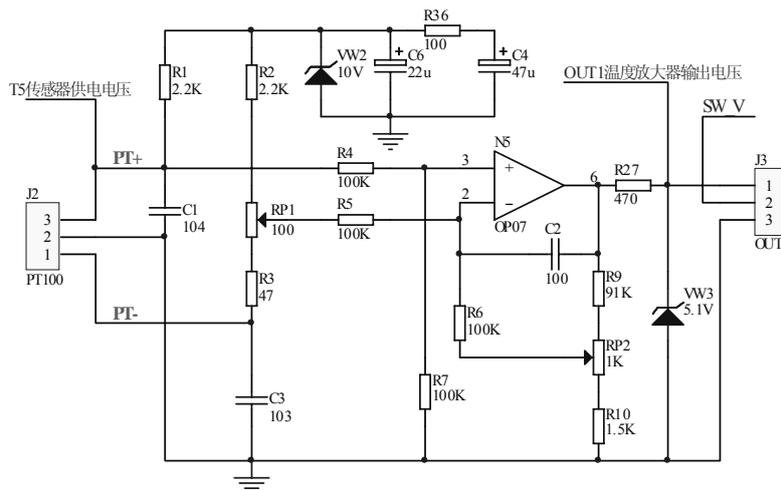


图 3 温度测量电路

3、0-5V 至 0-20mA 电流环转换电路：

当测量到的信号需要传递到较远的地方时，如果采用电压传送方式，会在导线上产生压降，给测量结果带来很大的误差。为了克服这个缺点，可以采用电流信号传送方式。这时候

调节 RP6 电位器，使跟随电压 $UT6=OUT2$ ，因为 $R32=R26=R30=100\Omega$ ，所以 $UR30=OUT2$ ，所以 $UT7=2UR30=2OUT2$ 。测 $UT8$ 应小于 12V。

(3) 测温度

根据 Pt100 在不同温度下阻值的变化情况（一般在温度越高的情况下，它的阻值越高），我们可以借助变阻箱来模拟 Pt100 在不同温度下阻值的变化情况。

1. 因为当 Pt100 在 0°C 它的阻值是 100Ω ，所以先输入信号负载 100Ω ，并用万用表测 $OUT1$ 在 100Ω 时的电压值并调节电位器 RP1 使之 $OUT1=0V$ 。

2. 逐渐增加输入负载的电阻值，观察 $OUT1$ 电压的变化情况。（T1 桥路单边放大信号 1，T2 检测桥路单边放大器信号 2，T3 检测仪表放大器输出电压，T4 检测压力传感器电路电桥激励电压，T5 检测传感器供电电压，T6 检测 Q2 发射极电压即 T4 的跟随电压，T7 检测电流环输出端电压，T8 检测 LM358 运放工作电压， $OUT1$ 检测温度放大器输出电压， $OUT2$ 检测压力传感器放大器总输出电压及电流环输入电压， $OUT3$ 检测镜像放大器输出电压， $OUT4$ 检测镜像放大器反馈电压）

四、 注意事项

1. 使用压力传感器时应小心，轻拿轻放，以避免损坏电阻应变片；
2. 注意接线正确，电路连接完整；
3. 波形不正确时，应注意压力传感器引线是否良好接入电路。

五、 分析实验结果

1. 测量加载力 F 与输出电压 U 的关系：保持工作电压 U_s 为 10.0V。

- (1) 加载砝码，每次 1Kg，分 8 次加到 8Kg，记录每次加载时的输出电压值。
- (2) 加到额定值后，开始卸载，分 8 次卸完，记录每次卸载时的输出电压值。
- (3) 重复上述两步骤，进行三次测量，将输出电压记录在表 1 中。

表 1 输出电压随加载力变化数据表（工作电压不变）

加载力 (KG)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
加载输出 U (mv)									
卸载输出 U (mv)									
加载输出 U (mv)									
卸载输出 U (mv)									
加载输出 U (mv)									
卸载输出 U (mv)									

2. 测量传感器工作电压 U_s 与输出电压 U 的关系：保持加载的砝码为 5KG（选作）。

(1) 调节工作电压 U_s 从 1.0V 到 10.0V，分别记录 10 次的输出电压值（每次 1V）。同样，降低电压时，分别再记录 10 次的输出电压值（每次 1V）。

- (2) 重复上述步骤，进行三次测量，将输出电压记录在表 2 中：

表 2 输出电压与工作电压变化数据表 (压力不变)

工作电压 (V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
加压输出 U (mv)											
减压输出 U (mv)											
加压输出 U (mv)											
减压输出 U (mv)											
加压输出 U (mv)											
减压输出 U (mv)											

3. 数据处理

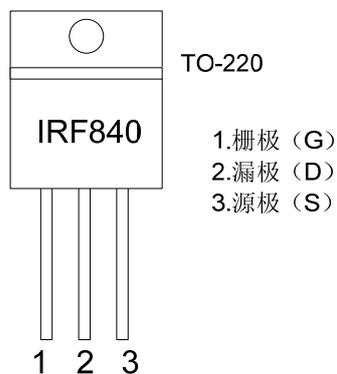
(1) U_s 一定时, 作 $U \sim F$ 关系曲线 (分别将加载三次平均, 减载三次平均, 做两个曲线)。

(2) F 一定时, 作 $U \sim U_s$ 关系曲线 (分别将加载三次平均, 减载三次平均, 做两个曲线)。

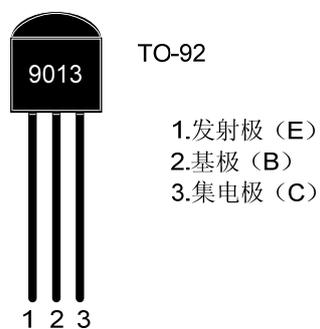
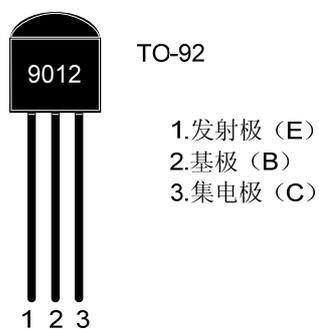
(3) 用 $U \sim F$ 曲线, 测给定物体的质量。

附录：本书涉及到的主要器件的管脚图

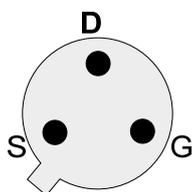
场效应管：IRF840



三极管：9012/9013

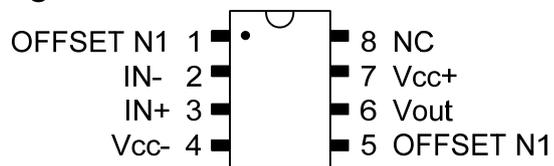


3DJ6G / 3DJ7E:



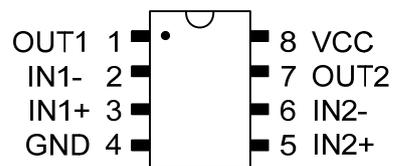
运算放大器：UA741 / LM741 / AD741

DIP-8

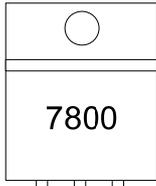


LM358

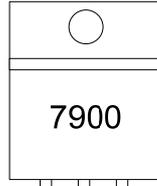
DIP-8



三端稳压器：78xx/79xx:

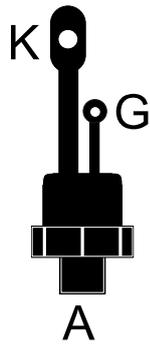


输入 地 输出



地 输入 输出

晶闸管



大功率二极管

