

半导体专业实验指导书

编写：王冬芳 刘艳涛 张如亮

西安理工大学

自动化与信息工程学院

2018 年 09 月

目录

实验一、晶闸管伏安及触发特性的测量-----	1
I 晶闸管伏安特性测试-----	1
II 晶闸管门极特性和维持电流测试-----	6
III 晶闸管通态峰值压降的测量-----	12
实验二、双极晶体管直流参数的测量-----	17
实验三、MOSFET 交直流参数的测试-----	26
实验四、晶体管开关参数的测量-----	37
实验五、晶体管特征频率测量-----	42
实验六、晶体管稳态热阻的测量-----	50
实验七、半导体传感器的使用与参数测量-----	60
I 光纤传感器—位移测试-----	60
II 光纤传感器—转速测试-----	61
III 电荷耦合图像传感器—CCD 摄像法测径实验-----	62
选做一 超声波距离测量实验-----	64
选做二 半导体应变计性能-----	66
实验八、数字 MOSIC 电参数测试-----	68
实验九、数字 MOSIC 逻辑功能测试-----	77
实验十、双极型运算放大器参数的测试-----	83
实验十一、半导体材料或器件参数的精密测量-----	95
实验十二、模数转换芯片（ADC）性能测试 -----	99
实验十三、晶体管 $C_c \cdot r_{bb}'$ 乘积的测量-----	104
实验十四、实验十二 双极集成电路工艺和版图电路网表提取-----	108
附录 晶闸管准备知识-----	113

实验一、晶闸管伏安及触发特性的测量

晶闸管（Thyristor）是晶体闸流管的简称，晶闸管是 PNP 四层半导体结构，它有三个极：阳极，阴极和控制极；晶闸管具有硅整流器件的特性，能在高电压、大电流条件下工作，且其工作过程可以控制、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。

I 晶闸管伏安特性测试

一. 实验目的：

1. 了解晶闸管测试条件。
2. 了解 $V-I$ 特性测试原理，并学会使用 V_{1-1} 伏安特性测试仪，掌握测试电路原理。
3. 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。

二. 测试原理及电路要求：

1. 测试条件：
 - a. 结温、型式试验室温和额定结温，出厂试验为额定结温 T_{jm} 。
 - b. 门极电路断路（门极电流为零）：或门极至阴极间的电阻，或门极电源，电压和电源内阻应予规定说明。
 - c. 电源频率—单次脉冲或附加结温升可忽略的低重复频率（我国目前大都采用 50Hz）。
 - d. 电压波形—为脉宽近似 10ms 的正弦半波。
 - e. V_{DRM} 、 V_{RRM} 分别为 V_{DSM} 、 V_{RSM} 的 90%。
 - f. I_{DRM} 、 I_{RRM} 分别为对应 V_{DRM} 、 V_{RRM} 的漏电流，表头读取的为平均

值，示波器读取的为峰值。

2. 测试原理电路：

测量 V_{DSM} 的原理图如图 1—1 所示，或采用图 1—2 电路。若图中被测

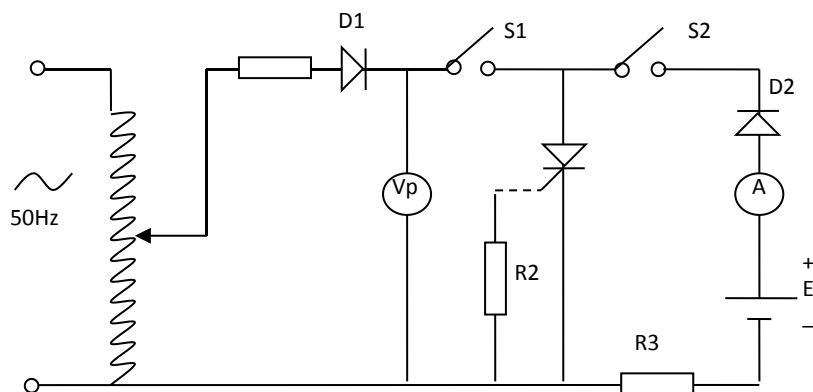


图 1-1 V_{DSM} 测量原理图

元件阴阳极调换，可测量 V_{RSM} 的参数。

图 1—1 中：

G—可调交流电源。

R_1 ， R_2 —保护电阻， R_2 有要求时应予以规定。

D_1 —整流二极管。

S_1 ， S_2 —在断态半周期间对被测元件加电压（近似 180° 电角度）的电气机械开关，或电子开关。

$\textcircled{VP}$ —峰值电压表。

直流电源 E，电流表 $\textcircled{A}$ 和限流电阻 R_3 用于检验被测元件是否转折和处于

导通。E 和 $\textcircled{A}$ 可用仪器（如示波器）代替。

图 1—2 中：

S_1 —施加断态电压的开关（晶闸管）。

B_1 —和交流电源同步的门极触发电路。

B₂—门极电阻或门极偏置条件。

R₁—保护电阻。

R₂—校正电压零位电阻，在校零时接通 S₂。

R₃—电流取样电阻（无感电阻）。

CRO—示波器。

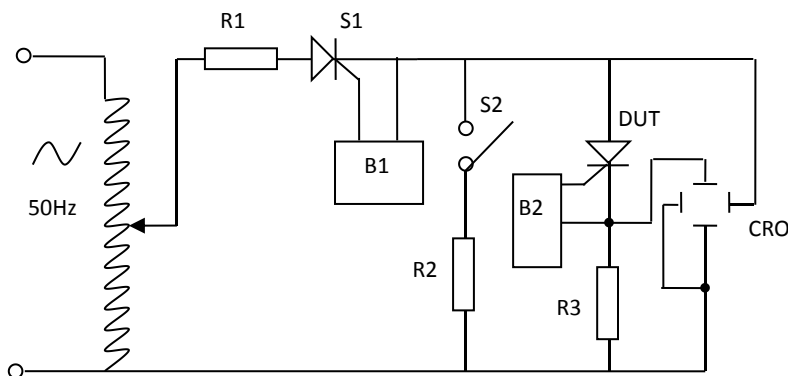


图 1-2

三. 实验操作步骤:

1. 插上电源插头，将调压器调回零位。
2. 按住电流设定开关，同时调节电流设定旋钮，观察电流表到需要的保护值。（注：小电流保护时因保护电流很灵敏，在 1-5mA 调节时可能保护会动作，只要按一下测试即可）。
3. 接好被测元件，选择好正反向。
4. 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} 上升到保护电流设定时，测试灯熄灭，说明被测元件被保护，将调压器回零，按测试按钮。改变换向开关测反向。
5. 换被测元件时，务必将调压器调回零位，再按同样方法测试反向参数。测试完成每只元件后，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。

7. 测容性负载时，测完后应对负载进行放电，以防伤人。

四. 实验内容：

1. 作出两只元件的 V—I 曲线。

2. 测出两只元件的 V_{DRM} ， I_{DR} ， V_{RRM} ， I_{RR} 。

V—I 记录表格

型号：

编号：

V	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
I										
V	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
I										

II 晶闸管门极特性和维持电流测试

一、实验目的：

- 1、了解门极参数和维持电流测试条件
- 2、了解门极触发电流电压和维持电流测试原理及原理电路要求。
- 3、分析实际测试电路及电路设计思想。

二、测试原理：

1、测试条件：

- a、结温、室温。
- b、阳极电压：直流 12V 或 6V。
- c、负载电阻（R）：应予规定。
- d、门极电路如有 R_1, R_2 的值应予说明。

2、门极特性测试原理电路：

如图 1-3 所示。

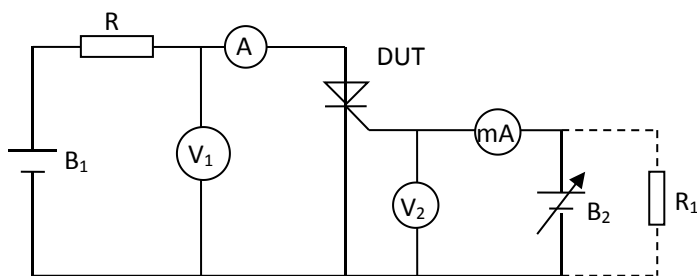


图 1-3 门极特性测试原理电路

B_1 -----直流电源，或脉动直流电源。

B_2 -----可调直流电源，或线变直流电源。

B_3 -----负载电阻， R 的阻值应保证被被测元件完全开通，并使开通电流不小于擎柱电流。

V_1 、 V_2 -----电压表

应注意触发回路电压表与电流表的连接方式所引起的数据误差。 V_2 表内阻应足够大，是分流电流小于被测元件触发电流的 1%，或在读出触发电流时，从回路中断开 V_2 。

测试时由零开始逐渐增加 B_2 电压，在 V_2 表指示突然下降，A 表突增的瞬间，mA 表和 V_2 表所指示的数值分别为门极触发电流 I_g 和门极出发电压 V_g 。注意读数是在被测元件完全开通时进行的。

3、维持电流原理

测试原理电路，如图 1-4 所示。

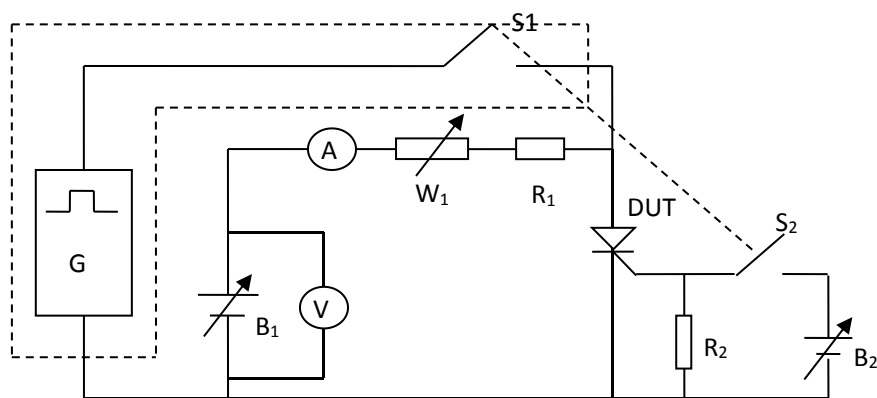


图 1-4 维持电流原理图

B_1 、 B_2 —直流电源。

ⓧ—直流电压表。 ⓐ—直流电流表。

G—脉动电流发生器。

W_2 —调节通态电流大小的电阻。

R_1 —限流保护电阻。

R_2 —门极并联电阻，当要求时数值应予以规定。

虚线部分必要时可以采用。

2. 测试条件:

- a. 结温: 室温。特殊要求时, 应在室温和额定结温下分别测试。
- b. 断态阳极电压: 12V 或 6V。
- c. 应保证被测元件完全开通。
- d. 门极偏置条件: 应说明门极电源电压和电源内阻, 或门极偏压电阻值。

3. 测量步骤:

在室温下进行, 调节 B_1 , 给被测元件施加规定的断态直流电压。闭合开关 S_2 , 调节 B_2 , 增加门极触发电流, 被测元件开通后, 调节 W_1 使通态电流足够大, 保证元件完全开通。断开 S_2 , 调节 W_1 , 逐渐减小通态电流直至元件关断。关断前的瞬间, A 表的指示即为所测元件的维持电流。

为保证被测元件完全开通, 测试电路亦可增加一个脉冲电流源 (图 1-4 虚线部分), 脉冲电流源的幅值或宽度应足够大, 但发热不致影响测量的准确性。采用脉冲电流源时, 被测元件通态电流波形如图 1-5 所示。

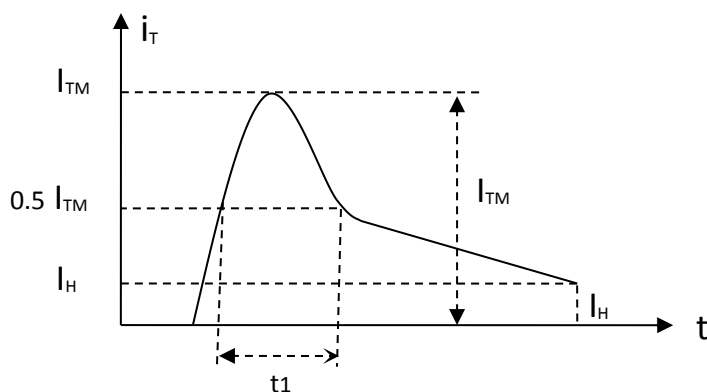


图 1-5 被测元件通态电流波形

I_{TM} 一般为额定通态平均电流的 10%。

t_1 根据不同型式的元件, 在 1~10ms 范围。

三、实验操作步骤：

1、接线：将前面板上大接线柱 A、K 分别可靠连接到被测元件阳极、阴极，小接线柱 g 连接到被测元件门极即可。严禁在未可靠连接时进行测试。

2、测试：本设备采用单片机控制的智能测试系统，面板上设置三个测试按钮，一个按钮测试一组参数，操作使用简单方便。

（1）第一个按钮测试门极触发参数

（2）第二个按钮测试擎住电流

（3）第三个按钮测试维持电流

四、实验内容：

记录表：

型号：

编号：

	1	2	3	4	5	平均	最大相对 误差
I _{gt}							
V _{gt}							

III、晶闸管通态峰值压降的测量

晶闸管的正向压降：由体压降、结压降和接触压降三部分组成。

从通态峰值电压 V_{TM} 与通态峰值电流 I_{TM} 曲线经线性简化的伏安特性上可以求出门槛电压 V_{TO} 与斜率电阻 R_{TO} ，而门槛电压 V_{TO} 取决于结压降，斜率电阻 R_{TO} 取决于体压降，至于接触压降与器件的物理性能无关，仅与金属之间的接触质量有直接关系。

一. 实验目的：

1. 了解测试条件及测试原理电路。
2. 学会使用通态峰值电压测试仪，对元件进行测量。
3. 掌握晶闸管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。

二. 测试原理电路及要求：

1. 测试条件：
 - a. 结温：出厂试验为室温，型式试验为室温和额定结温。
 - b. 通态峰值电流：为通态平均电流的 π 倍（ π 可取为 3）。
 - c. 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，通电时间所引起的结温升效应应能够忽略。
 - d. 脉冲电流宽度应足够宽，以保证元件完全开通。单次脉冲宽度在 1~10ms 范围内，对大容量元件还可以采用开通措施。脉宽不可过窄，脉冲电流上升率超过临界上升率。
 - e. 测量位置，不应与主电流线共振。
 - f. 被测元件紧固压力： $\pm 160\text{kg/cm}^2$ (按管壳与夹具或与散热器的接触面积算)。
 - g. 门极偏置条件：应规定被测元件门极偏压电源和内阻，必要时接入门

极并联电阻。

2. 测试原理，如图 2—1 所示。

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，必要时可接入 R_1 。

R_A : 通态电流取样电阻，要求精密无感。

$\textcircled{V_p}$, $\textcircled{A_p}$: 峰值电压表和峰值电流表。或以示波器代替。

G: 连续可调交流电源。

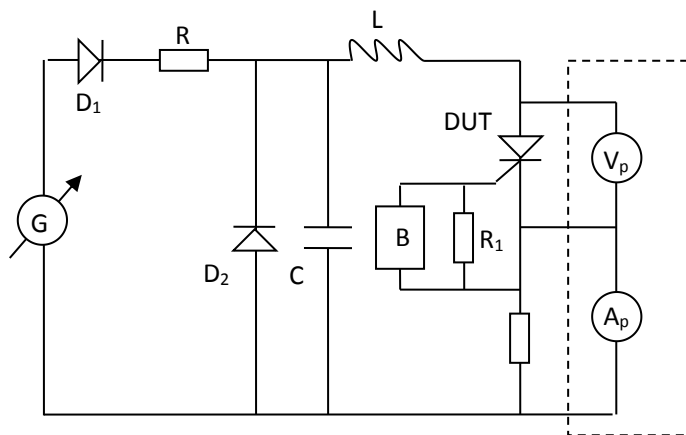


图 2-1

3. 测量程序

a. 电源电压和门极触发电压先调至零。

b. 按规定压力将被测元件接入电路，结温调至规定值。

c. 门极触发电压的幅度和宽度调至选定值，以保证被测元件完全开通。

d. 升高电源电压值，使流过被测元件的脉冲电流达到选定值（由 $\textcircled{A_p}$ 或

示波器监视），此时 $\textcircled{V_p}$ 的指示（示波器上的显示）即为所测通态峰值电压

（对应于选定的脉冲电流）。晶闸管通态电压的波形在导通的瞬间有一个尖

峰电压，其波形见图 2-2 所示。

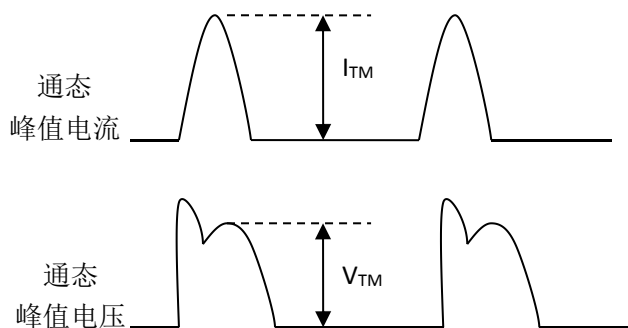


图 2-2

e. 根据不同的 I_T 所对应的 V_T 可绘制出通态伏安特性曲线，通过数据处理计算，亦可绘制出通态耗散功率曲线。做这两条曲线时，必须注明脉冲流的频率和占空比。

通态伏安特性曲线是非线性的，为了便于计算，按 IEC 规定，可作线性近似简化。对应于通态电流等于 0.5 倍额定峰值电流和 1.5 倍额定峰值电流两点间的直线来近似地代替实际曲线。

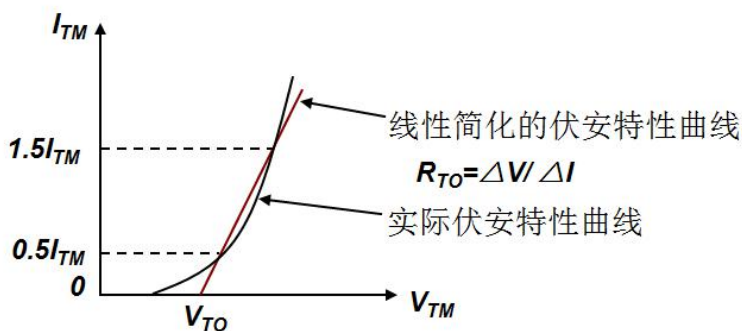


图 2-3

三. 实验操作步骤:

1. 了解测试仪器基本技术指标:

①最大峰值电流: 3000A

②峰值压降测量范围: 0.5~10V

③脉冲：单次

④脉宽： $\geq 7\text{ms}$

2、安装接线：

① 设备就位，分别连接好设备接地线和电源线。

②将被测元件放置于靠近测试设备引出线一侧，尽量缩短主电流引线长度。

③将设备引出线旁的安全开关打倒“OFF”位置。

④主电流线要求可靠连接被测元件，“A”接被测元件阳极，“K”接被测元件阴极。

⑤柜体接线柱大写“A”、“K”为通态峰值压降 V_{TM} ， V_{FM} 测试线，“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体接线柱“g”，“k”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。

3、测试方法：

①按要求连接好被测元件。

②接通电源时应将电流设定电位器逆时针退到底，接通电源。

③根据被测电流大小，选择合适的充电电压，小于 2 千安选 60 伏，2 至 4 千安之间选 100 伏，4 千安以上选 150 伏。

④按住电流设定开关，同时调节电流设定旋钮，观察电流表到需要的电流值。

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，电流表读出峰值电压和峰值电流值。

在测试个别元件的通态伏安特性时，需测量一系列的 I_{TM} 和所对应的

V_{TM} 。每一个 I_{TM} 和 V_{TM} 的整定与上述相同。

I_{TM} 电流整定参数值：

测试元件容量	200A	500A	800A	1000A
I_{TM} 整定值	600A	1500A	2400A	3000A

4. 注意事项：

- ① 测试用的设备允许将主电流线“A”、“K”直接短路进行实验。
- 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 150 多伏，换接元件时，务必将引出铜牌上的安全开关置关闭位置。
- ④ 充电电压选择开关 12 点位置为空档，向左一档为 60 伏，向右一档为 150 伏。

5. 测试内容：

本实验要求学生测量两只元件的通态伏安特性曲线。

- a. 根据被测试元件的额定容量确定最大 I_{TM} 值。
- b. 本仪器测试 I_{TM} 的起始值为 100A，每隔 50A 测一组数据。

四. 实验内容：

1. 根据通态峰值电压测试原理测量，对测得的数据进行处理，并绘制特性曲线。

数据记录表 2—1

型号：

编号：

I_{TM}	V_{TM}					备注
	1	2	3	平均	误差	
100A						

150A						
------	--	--	--	--	--	--

注：表中“平均”指三次测量的平均值。“误差”指三次测量中的最大值与平均值的相对误差。“备注”栏应填入每一数据是否有效，误差大于 5%者为无效，应予以剔除，用符号*来表示。

1. 利用公式 $P_T = 0.286 V_{TM} \cdot I_{TM}$ ，计算不同峰值电流下的功耗并绘制出通态功耗曲线。

五、思考题：

试分析脉冲法测量晶闸管的通态峰值压降时会产生尖峰电压（如图 2-2）的原因是什么？

实验二、双极晶体管直流参数的测量

一、实验目的：

- 1、学会正确使用 XJ4810A 晶体管特性图示仪，并了解图示仪测试原理。
- 2、熟练的掌握测量晶体管的主要直流参数的方法。

二、实验内容：

检测晶体管直流参数：

- (1) 反向击穿电压 BV_{CBO} 、 BV_{CEO} 、 BV_{EBO} ；
- (2) 直流放大系数 h_{fe} ；
- (3) 饱和压降 V_{CES} ；
- (4) 输入正向压降 V_{BES} 。

三、测试线路原理：

如果把晶体管输出特性曲线、输入特性曲线、P-N 结伏安特性曲线能用示波器的荧光屏直接显示出来，通过仪器的标尺刻度就可以测量晶体管各直流参数，下面就以输出特性曲线为例，简述图示意的测量原理。

由图 1 (a) 所示的晶体管输出特性曲线，可想到，如果荧光屏的 x 方向对应集电极电压 V_{ce} ，y 方向对应集电极电流 I_c ，当基极注入一定量的 I_b 时，就能得到对应一条对应于 I_b 的输出特性曲线，就能得到许多条输出特性曲线。

显示输出特性曲线的最基本的线路如图 1 (b) 所示。

此图可以看出解决问题的关键是：

- (1) 如何得到变化的集电极电压加到被测量的 C、E 两端，并达到示波器的 x 轴偏转板，间作水平扫描电压。

(2) 如何把电流 I_C 的变化反映到示波器的 y 方向。

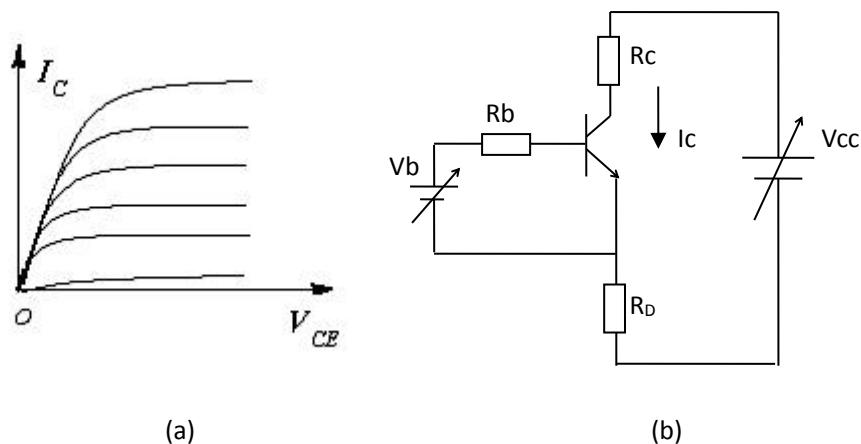


图 1

(3) 如何得到一组不同数值的 I_B 。

1、集电极扫描电压：

50 周的交流电经过二极管整流，但不滤波，得到每秒 100 个峰的单向脉动电压，这个脉动电压加在晶体管 C、E 两端，并送到示波器 x 轴兼作水平扫描电压，如图 2 所示，用一换向开关改变脉动电压的极性，就可以适用 npn 或 pnp 晶体管测试的需要。调节调压器改变输入交流电压的大小，就可以改变脉动电压的峰值，从而使加到 C、E 两端的电压是变化的，此集电极扫描电压就相当于图 1(b) 可调电源电压 V_{CC} 。

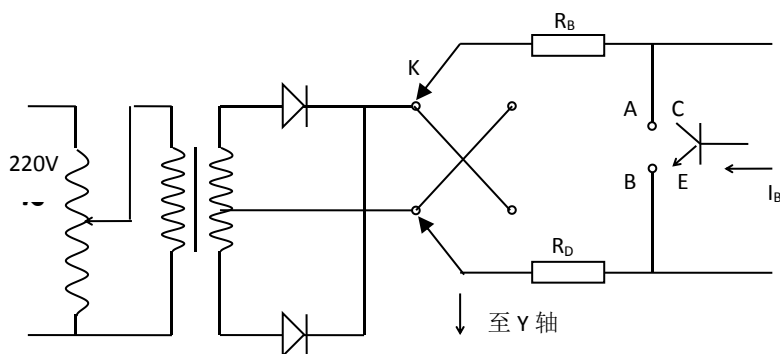


图 2

2、集电极电流 I_C

I_C 电流的变化, 不能直接输入到示波器的 y 轴, 必须变换成电压信号, 加到示波器的 y 轴, 如何把电流信号变换成电压信号, 并能反映出电流的变化, 通过取样 R_D , 把电流 I_C 经电阻 R_D , 得到电压 V_y , $V_y = I_C \cdot R_D$, R_D 是常数, 因而 $V_y \propto I_C$, 示波器 y 方向电压变化反映电流 I_C 的变化, R_D 的数值应较小, 不要过多的影响回路电流的大小。

3、阶梯信号发生器:

又前述已知, 要测晶体管的输出特性曲线, 只需按图 2 插入晶体管, 集电极扫描电压的极性已被测管处于工作状态所需电压电源极性而定, 然后向被测基极送入一定的基极电流 I_B , 这样示波器荧光屏 x 轴将代表 V_{CE} 电压, y 轴将代表 I_C 电流, 就得到一条对应于基极电流 I_B 的公共极输出特性曲线, 改变 I_B 的大小, 就可以得到不同的输出曲线, 可以设想:

送进基极电流用专门设计的电路产生一个阶梯波(如图 3), 这个阶梯是交替变换的一组 I_B , 阶梯波中例如 ΔI_B 是 $0.01\text{mA}/\text{级}$ 时, 第一级(即起

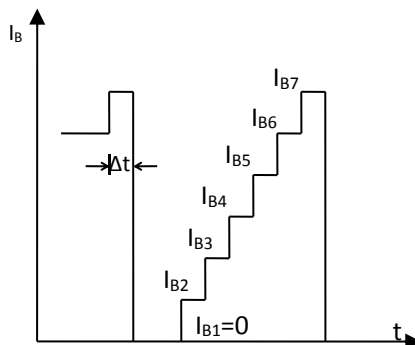


图 3

始级) $I_B = 0$, 第二级 $I_B = 0.01\text{mA}$, 第三级 $I_{B2} = 0.02\text{mA}$ 等等。每注入一个基极电流 I_B 就可得到一条输出特性曲线, 而每一个输出曲线只扫一段短暂时间, 但是要连续不断地扫描, 一秒钟能扫十几次, 人眼在荧光屏上看到的将是一族稳定的特性曲线, 阶梯波的极性也能用换向开关改变以适应测试 pnp 或 npn 管子的需要。

同样道理, 如果示波器 x 偏转板上压降能反映 I_B 的大小, y 偏转板上能反映集电极电流 I_C 的变化, 则荧光屏上显示 $I_B - I_C$ 的关系曲线。

如果示波器 x 偏转板上压降反应基极电压 V_B 的大小, y 偏转板上压降

反应基极电流 I_B 的大小，则荧光屏上显示 V_B - I_B 的关系曲线。

四、实验步骤

（一）准备工作

- （1）打开电源预热 10 分钟左右；
- （2）根据被测晶体管的类型，选择集电极扫描信号的极性基阶梯信号的极性。
- （3）光点聚焦，辉度调到适宜，光点调到 X、Y 零处；
- （4）调节 X、Y 直流平衡；
- （5）放大器校正；
- （6）阶梯校正。

（二）参数测量

1、测量反向击穿电压 BV_{CEO} 、 BV_{CBO} 、 BV_{EBO} ：

（1）测 BV_{CEO}

a、定义： BV_{CEO} 是基极开路时，集电极和发射极之间的最大允许电压。

b、方法：以 npn 型管为例：

峰值电压范围：	0—50V 或 0-100V
X 轴作用：	V_C : 5V/度（或 10V / 度）
Y 轴作用：	I_C : 0.1*0.02mA/度
功耗作用：	5 K
阶梯作用：	关
极性：	+

将被测管 c、e 极按图 5 插入 C、E 孔内，然后缓慢增加集电极电压，集电极电流上升到测试条件规定值时，停止加电压，从荧光屏上显示的图形读取 BV_{CEO} 值。

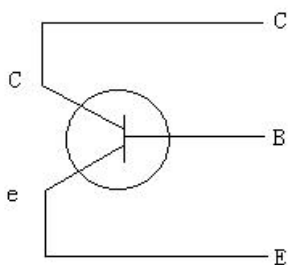


图 5

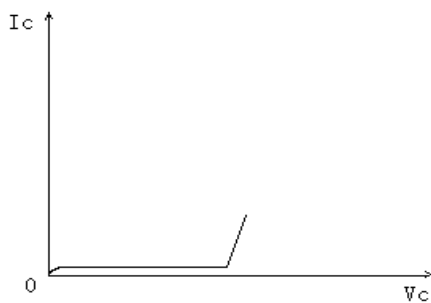


图 6

(2) 测 BV_{CBO}

a、定义： BV_{CBO} 是发射极开路时，集电极反向击穿电压。

b、方法：以 npn 型管为例：

峰值电压范围：	0-100V
X 轴作用：	$V_C : 5 \text{ V/度}$ (或 10 V / 度)
Y 轴作用：	$I_C : 0.1 * 0.02 \text{ mA/度}$
功耗作用：	5 K
阶梯作用：	关
极性：	+

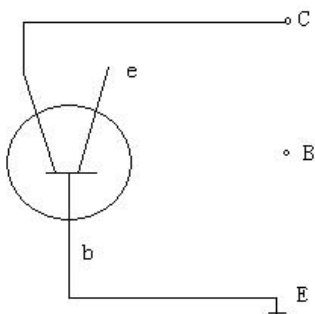


图 7

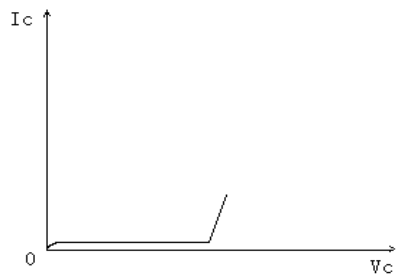


图 8

将被测管 c、b 极按图 5 插入 C、E 孔内，然后缓慢增加集电极电压，

集电极电流上升到测试条件规定值时，停止加电压，从荧光屏上显示的图形读取 BV_{CBO} 值。

(3) 测 BV_{EBO}

a、定义： BV_{EBO} 是发射极开路时，发射结的击穿电压。

b、方法：以 npn 型管为例：

峰值电压范围：	0 — 10 V
X 轴作用：	$V_C: 2V/\text{度}$ (或 $5V/\text{度}$)
Y 轴作用：	$I_C: 0.1 \times 0.02\text{mA}/\text{度}$
功耗作用：	5 K
阶梯作用：	关
极性：	+

将被测管 e、b 极按图 5 插入 C、E 孔内，然后缓慢增加集电极电压，集电极电流上升到测试条件规定值时，停止加电压，从荧光屏上显示的图形读取 BV_{EBO} 值。

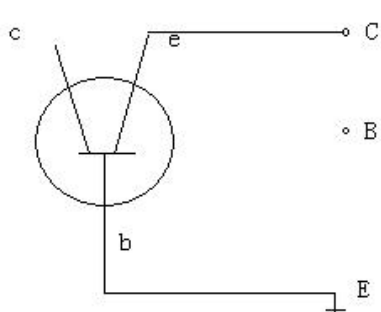


图 9

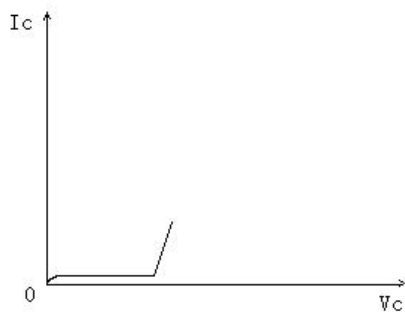


图 10

2、放大倍数 h_{fe} :

(1) 放大倍数 h_{fe} 是在共射极电路中，当集电极电压 V_{CE} 和集电极电流 I_C 为规定值时，集电极电流变化量 ΔI_C 与基极电流变化量 ΔI_B 之比.即

$$h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad \left| \quad I_C=6\text{mA} , V_C=5\text{V} \right.$$

(2) 方法: 以 npn 型管为例:

峰值电压范围:	0 — 10 V
X 轴作用:	V_C : 1V/度
Y 轴作用:	I_C : 1*1mA/度
功耗电阻:	500 Ω
阶梯作用:	重复
极性 (集电极扫描电压):	+
级 / 秒:	200
级 / 族:	10
阶梯选择:	I_B : 10 μ A/级左右
极性 (阶梯):	+

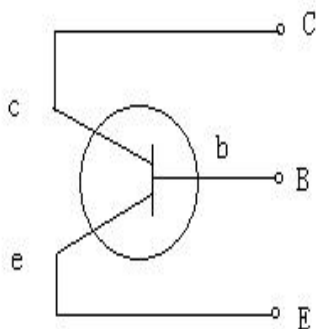


图 11

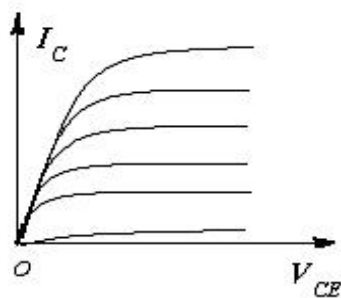


图 12

将被测管的 c、b、e 极按图 11 分别插入 C、B、E 孔内，逐渐加集电极电压，得图 12 的输出特性曲线，根据测试条件，读出 ΔI_C 、 ΔI_B 的值，如图形曲线不清楚时，可改变集电极电压和阶梯选择来获得清楚的图形。

也可以将 I_C - V_C 曲线转变为 I_C - I_B 曲线，即将 X 轴作用放至“基极电流或

基极源电压”，根据测试条件，从荧光屏上显示的图形 13 中，读出 ΔI_C 、 ΔI_B ，求出 h_{fe} 的值。如果曲线不清楚时，可改变集电极电压和阶梯选择来获得清楚的图形。

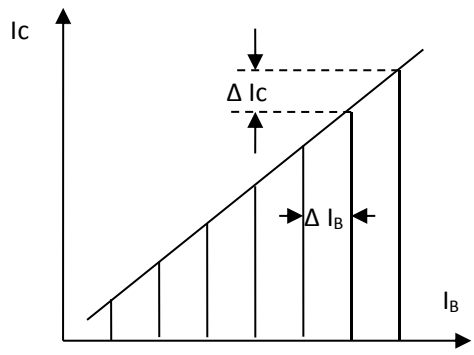


图 13

4 、测试饱和压降 V_{CES} :

(1) 定义：晶体管工作在

饱和时，集电极- 发射极之间的电压。

(2) 方法： 以 npn 型管为例：

峰值电压范围：	0—10V
X 轴作用：	V_C : 0.1 V/度
Y 轴作用：	I_C : 1*1mA/度
功耗电阻：	200 Ω
阶梯作用：	重复
极性（集电极扫描电压）：	+
级 / 秒：	200
级 / 族：	10
阶梯选择：	0.1 mA
极性（阶梯）：	+

将被测管的 c、b、e 极分别插入 C、B、E 孔内，见图 11 ，逐渐加集电极电压，使 $I_C = 10\text{ mA}$ ，第 10 根曲线末端所对应电压即为 V_{CES} 。若曲线很陡，可将 x 作用旋至 0.2 V / 度（或 0.1 V / 度）后，读取数值：

$$V_{CES} \quad | \quad I_B=1\text{mA}, I_C=10\text{mA}$$

5 、测量输入正向压降 V_{BES} :

(1) 定义：晶体管工作在饱和时，基极-发射极之间的电压。

(2) 方法：

测 V_{CES} 的旋钮不变，只将 x 轴作用旋至“基极电压 $0.2V / \text{度}$ （或 $0.1V / \text{度}$ ）”，将 y 轴作用旋至“基极电流或基极源电压”，即得到输入特性曲线 $I_B - V_B$ ，读出 V_{BES} 。

同学们在测试过程中， x 轴作用， y 轴作用，阶梯选择应根据不同被测管的测试条件放至不同量程上，以好读测为准。

五、实验报告内容

- 1、记录晶体管主要直流参数的测试结果。
- 2、分析共射极电路的输出特性曲线情况。

六、思考题：

- 1、说明 BV_{BEO} 、 BV_{CEO} 、 V_{CES} 的测试条件。
- 2、影响晶体管放大倍数的结构参数有哪些？如何改善。

实验三、MOSFET 交直流参数的测试

一、实验目的：

- 1、学会正确使用 XJ4810A 晶体管特性图示仪，并了解图示仪测试原理。
- 2、熟练的掌握测量 MOSFET 主要直流参数的方法。

二、实验原理

1、直流输入特性----- $I_{DS} \sim V_{GS}$ 关系曲线

MOSFET 是用栅电压控制源漏电流的器件，固定一个漏源电压 V_{DS} ，可测得一条 $I_{DS} - V_{GS}$ 关系曲线，对应一组阶梯漏源电压可测得一簇直流输入特性曲线如图 1 所示。每条曲线均有 3 个区域，即截止区、饱和区和非饱和区。曲线与 V_{GS} 轴交点处 $V_{GS} = V_T$ 。曲线中各点切线的斜率即为相应点的跨导 g_m 。切线斜率越大，跨导越大。3 个区域中 $I_{DS} - V_{GS}$ 关系分别为：

(1) 截止区： $0 \geq V_{GS}$ ， $I_{DS} = 0$ 特性曲线与 V_{GS} 轴重合，跨导 $g_m = 0$ 。

(2) 饱和区： $0 < V_{GS} - V_T \leq V_{DS}$ ， $I_{DS} = k(V_{GS} - V_T)^2$ 特性曲线为 2 次曲线，跨导 $g_m = 2k(V_{GS} - V_T)$ 。

(3) 非饱和区： $V_{GS} - V_T > V_{DS}$ ， $I_{DS} = k[2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$ 特性曲线为一直线，所以也叫线性区，跨导 $g_m = 2kV_{DS}$ 。用直流输入特性曲线可测定 MOSFET 在各工作点上的跨导。

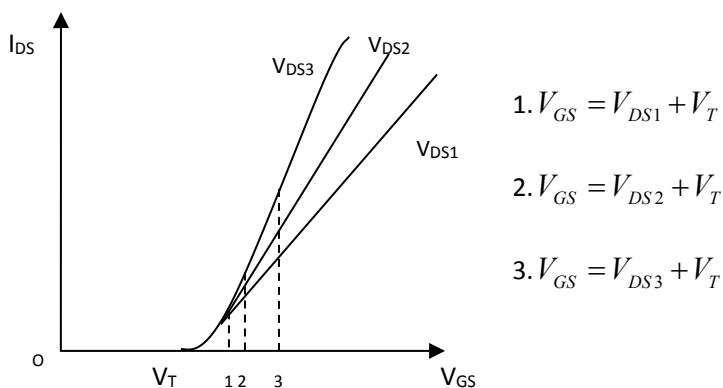


图 1 MOSFET 直流输入特性曲线

2 直流输出特性-- $I_{DS}-V_{DS}$ 关系曲线

MOSFET 在某一固定的栅源电压下所得 $I_{DS}-V_{DS}$ 关系曲线即为直流输出特性，对应一组阶梯栅源电压可测得一簇输出特性曲线，如图 2 所示。每条曲线分 3 个区域：

(1) $V_{GS} - V_T > V_{DS}$ 非饱和曲线斜率逐渐变小。

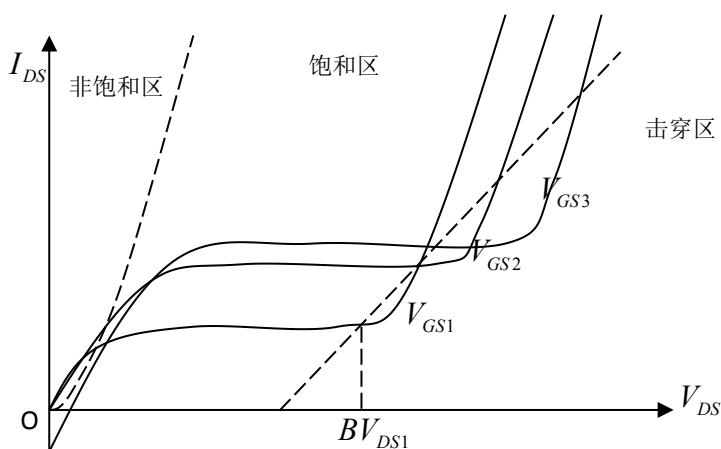


图 2 MOSFET 直流输出特性曲线

(2) $V_{GS} - V_T \leq V_{DS} < BV_{DS}$ 饱和区，为斜率很小的直线。

(3) $V_{DS} > BV_{DS}$ 击穿区，为陡直上升的曲线。

从这簇曲线中可测得 MOSFET 的直流导通电阻 R_{ON} 、动态电阻 r_d 、平均跨导 $\bar{g}_m$ 及源漏击穿电压 BV_{DS} 。

直流导通电阻 $R_{ON} = V_{DS} / I_{DS}$ ，曲线中每点（即每工作状态）的导通电阻为这点对应的 V_{DS} 和 I_{DS} 的比值。在 V_{DS} 很小时，特性曲线呈线性， R_{ON} 即为直线斜率的倒数，即

$$R_{ON非} = 1/[2k(V_{GS} - V_T)] \quad (1)$$

在临界饱和点

$$R_{ON临} = 1/[k(V_{GS} - V_T)] \quad (2)$$

实际上，导通电阻是随 V_{GS} 和 V_{DS} 变化的可变电阻。

MOSFET 动态电阻 $r_d = \partial V_{DS} / \partial I_{DS} |_{V_{GS}}$ ，曲线中个动态点的动态电阻即

为各点切线斜率的倒数。在非饱和区 V_{DS} 很小时， $r_d = R_{ON非}$ ，在饱和区 r_d 是一个阻值很大的常数。

MOSFET 的源漏击穿电压可从特性曲线中直接测取。

MOSFET 在某一 V_{GS} 范围内的跨导平均值 $\bar{g}_m$ 可在特性曲线中直接测出。

$$\bar{g}_m = (I_{DS2} - I_{DS1}) / (V_{GS2} - V_{GS1}) |_{V_{DS}} \quad (3)$$

3. 开启电压 V_T

使 MOSFET 开始强反型导通时所加的栅源电压叫开启电压，它是受衬底电压 V_{BS} 调制的，当 $V_{BS} = 0$ 时开启电压为 V_{T0} 。开启电压测量方法有：

- (1) 最简单的方法是测量 $I_{DS} - V_{GS}$ 关系曲线，曲线与 V_{GS} 轴交点处即为 $V_{GS} = V_{T0}$ 。由于亚开启和漏电流问题，这种方法不够准确。

(2) 拟和直线法可以测得较准确的开启电压。在非饱和区关系式

$$V_{GS} = \frac{1}{2k} \frac{I_{DS}}{V_{DS}} + V_T \quad (4)$$

在 V_{DS} 很小时测得 $I_{DS} \sim V_{GS}$ 关系数据，作 $I_{DS}/V_{DS} \sim V_{GS}$ 关系的直线，直线在 V_{GS} 轴的截距即为开启电压 V_T 。

三、 实验内容

- 1、用 XJ4810 图示仪测量开启电压和输出特性曲线，并观察衬底电压对开启电压的调剂作用。
- 2、在 XJ4810 图示仪所显示的输出特性曲线上测定 MOSFET 的直流导通电阻、动态电阻、跨导和源漏击穿电压。

四、 仪器使用方法

1、XJ27104 VMOS 测试台控件作用简介

(1) 五档直键开关

- A) 左、右选择键（互锁）：按下按钮“左”左侧测试管显示，按下“右”右侧测试管显示。
- B) 零电流、零电压（无锁）：按下旋钮“零电流”被测管基极置零，按下“零电压”被测管栅极置零。
- C) VMOS 管选择键（自锁）：按下时为测试 VMOS 管状态。弹出时为测试常用半导体管，此时沟道极性选择开关与开启电压调节电位器不起作用。

(2) 二位四刀拨动开关：VMOS 沟道极性选择开关

(3) VMOS 管开启电压调节电位器

(4) VMOS 管开启电压测试点

(5) 测试座：左或右测试座外侧上、中、下脚位是 D、G、S，内侧脚

位是 G、D、S

2、测试前准备工作

- (1) 应将 XJ4810 型集电极电源“峰值电压范围”置 10V 档级，起始位置于“0”，其极性应与被测管的 V_{DS} (VMOS) 一致，功耗限制电阻置适当位置。
- (2) 主机 Y 轴“电流/度”置适当范围，主机 X 轴“电压/度”置适当范围，阶梯选择开关“电压/度”置适当范围。
- (3) 测试台上的测试选择开关，根据测试要求选择沟道极性，选择应与被测试管的 V_{GS} 一致，开启电压调节电位器置零，此时可插入被测器件（注意管脚应与管座的标志一致）。

3、使用示例（以 N 沟 VMOS 管 IRF150 为例）

峰值电压范围	0~10V 极性 (+)
功耗电阻	2.5 Ω
X 轴集电极电压	1V/度
阶梯信号	重复
阶梯选择	0.05V/级

把测试台 VMOS 管测试按钮按下，沟道极性选择开关置“N”，再按下“左”或“右”按钮，插入被测器件。调节集电极电压到适当位置，则在屏幕出现一簇曲线，此时曲线显重叠状。再调节 VMOS 管开启电压电位器（逐渐、慢慢地），调到重叠曲线完全打开瞬时（10 级阶梯曲线），立即停止调节（若再加大开启电压易使被测管损坏，另外所测数据也不正确）。此时在屏幕上所显示的曲线为被测 VMOS 管的特性曲线。用数字式万用表在开启电压测试点能正确测得被测 VMOS 管的开启电压值。

4、注意事项：

(1) “P” 沟道型 VMOS 管与 “N” 沟道型 VMOS 管除集电极电压和阶梯极性相反外，其它全部相同。

(2) 测试大功率 VMOS 管时，切记决不要在大电流、高阶梯电压情况下，长时间测试管子，防止被测管发热损坏，另外被测管子发热易引起测试座损坏。测试 VMOS 管时，主机阶梯信号不要使用在单次显示状态下，以免误测。

五、 实验步骤（以 N 沟增强型管为例）

1、用 XJ4810 图示仪测量 MOSFET 开启电压。

(1) 将 MOSFET 的 G、D、S 引出端分别与图示仪的 B、C、E 端连接，将 B、C 端短路，处于饱和状态。

(2) 图示仪上极性选择 NPN，选择发射极接地，阶梯作用置单族，阶梯电流调至最小（否则 D、S 间有明显的电流注入，使测量不准）。

(3) 置衬底偏置电位 $V_{BS}=0$ ，增大图示仪的峰值电压，调节“X 轴作用”、“Y 轴作用”旋钮，图示仪将显示一条 $I_{DS} \sim V_{GS}$ 曲线，确定开启电压 V_{T0} 。

(4) 调节稳压电源，使 V_{BS} 从 0 至 $-10V$ ， $\Delta V_{BS} = -2.5V$ ，测定对应的 V_T 值。注意测完此项后将 B、C 极断路。

2、用 XJ4810 图示仪测量 MOSFET 的直流输出特性。

(1) 图示仪 B、E 端并入 $1k\Omega$ 的电阻，这样阶梯电流就转变成阶梯电压了。如阶梯电流为 $0.5mA$ ，阶梯电压为 $0.5V$ 。

(2) “将阶梯作用”置重复，“阶梯电流”置适当的值（如 $0.5mA$ 或 $1mA$ ），置 V_{BS} 为 0。

(3) 增大峰值电压，调“X 轴作用”、“Y 轴作用”旋钮，在屏幕上显示一簇完整的输出特性曲线。

(4) 用半透明纸将曲线复制下来，标出坐标分度及各曲线对应的 V_{GS} 值。

(5) 调节图示仪，在曲线上测定 $V_{GS}=3V$ 时的 $R_{ON非}$ 、 $\frac{R_{ON临}}{\bar{g}_m}$ $R_{ON临}$ 及源漏击穿电压 BV_{BS} 和饱和区的动态电阻 r_d ，测定 V_{GS} 为 2 到 3V 时的 $V_{DS}=0.5V$ 、3V 时的平均跨导 $\bar{g}_m$ 。

五、数据处理和分析

- 1、将测试的数据进行整理。
- 2、根据测量的数据绘制 MOSFET 直流输入、输出特性曲线。

六、思考题

测量 P 沟 MOSFET 时，衬底应接稳压源的哪一极？XJ4810A 图示仪面板的极性、原点位置等如何调节？

实验四、晶体管开关参数的测量

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性能。

一、 实验目的：

- 1、熟悉晶体管开关参数和影响开关参数的各因素，
- 2、掌握开关时间的测试原理、方法。
- 3、研究测试条件变化对晶体管开关时间的影响。

二、 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。

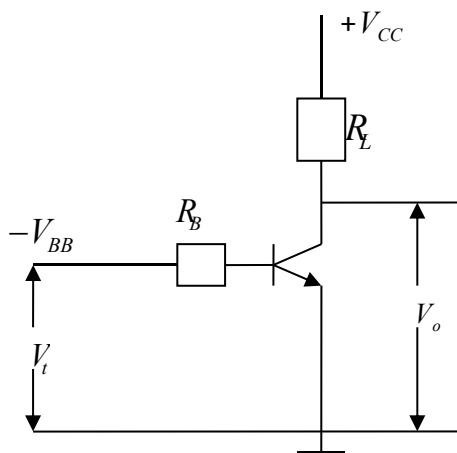


图 1 晶体管开关电路示意图

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开关。

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

当一个接通的开关。

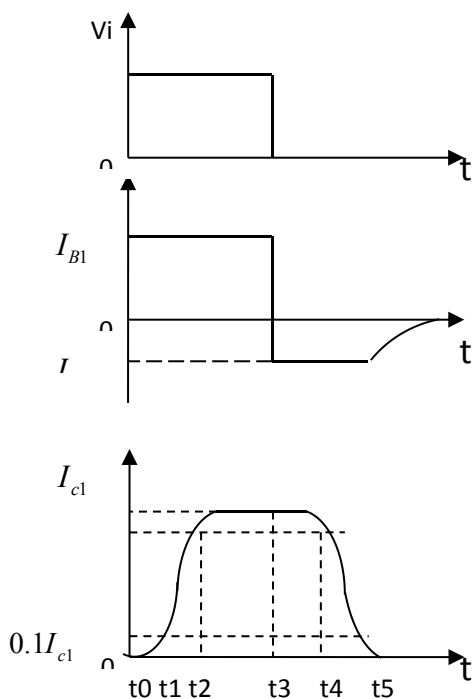


图 2 开关晶体管输入、输出波形

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 $0.1 I_{CS}$ 。

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

存储时间 t_s : 从脉冲信号去除到 i_C 下降到 $0.9 I_{CS}$

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

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个定义的开关时间,按这种定义方法测量开关时间比较方便。

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 是存储在基区中电子的总电荷， τ_n 是基区中电荷寿命。

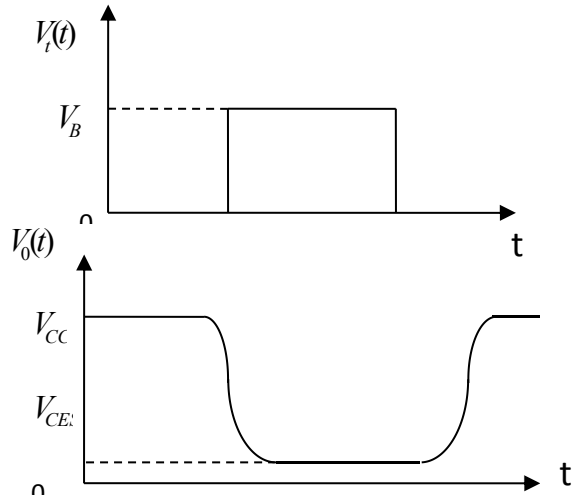


图3 开关晶体管输入、输出电压波形

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、数学处理，最终可得到延迟时间

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

式中 V_{DE} 、 V_{DC} 分别为发射结和集电结的接触电势差， n_c 、 n_e 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 ，基极驱动电流继续对发射结和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 $0.7V$ ），集电结反向偏差逐渐减小，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方程，进而可求得上升时间

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

存贮时间主要是基区、集电区超量存贮电荷消失，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

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

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 $\tau_s \approx W_C^2 / 2 L_{pc}$ ，这里 τ_{PC} 和 L_{pc} 分别为集电区的少子寿命和扩展长度。

$$t_f = \beta_{DC} \left(\frac{1}{\omega_r} + 1.7 R_L C_{TC} \right) \ln \left(\frac{\beta_{DC} I_{B2} + 0.9 I_{CS}}{\beta_{DC} I_{B2} + 0.1 I_{CS}} \right) \quad (5)$$

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，测试或使用条件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，和理论分析结果进行比较。

测量双极型晶体管开关时间的实验装置如图 4 所示。由于受输入脉冲前后沿的影响以及示波器频宽的限制，此装置只适用于测量开关时间较长的晶体管。

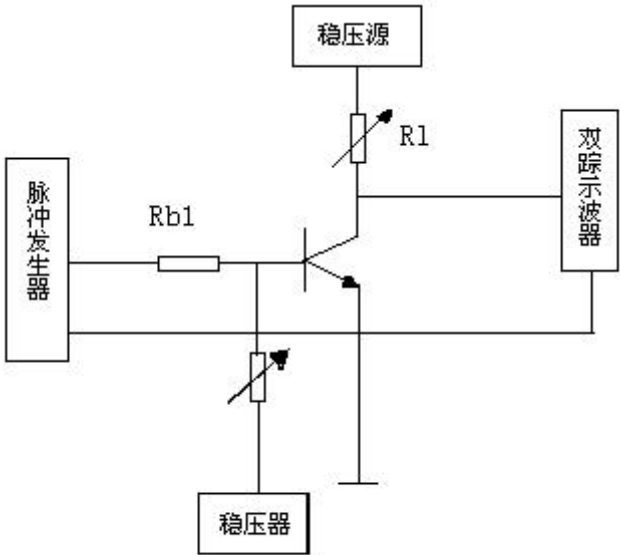


图 4 开关时间测试装置框图

三、实验内容

- 1、用图 4 所示的实验装置在示波器上观察晶体管输入与输出波形，读出各开关时间参数。
- 2、测量高频管（如 3DG12）和低频管或具有不同电流增益的晶体管的开关时间，研究晶体管本身的参数对开关时间的影响。
- 3、改变外电路参数 I_{B1} 、 I_{B2} 和 I_{C3} ，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。
- 4、用 BJ2961 型晶体管、集成电路动态参数测试仪测量开关管的开关时间。如果被测管为 3DK4，其测试条件： $I_B=10\text{MA}$ 、 $I_C=100\text{MA}$ ，测试结果和低频管进行比较。

四、实验步骤

1、用图 4 所示的实验装置测量晶体管开关时间

- (1) 将测试仪器按图 4 所示的实验装置连接，校准个仪器。
- (2) 给被测管加上脉冲信号，观察输入、输出波形，读出晶体管四个开关时间参数及开启和关断时间。

(3) 改变被测管和测试条件重复上面的测量。

2、面板说明

按键： $\uparrow \downarrow \rightarrow \leftarrow$ ：上下左右键，可移动所选参数或功能。

确认： 确认键，对所选参数或功能的确认。

3、屏幕说明

(1) 主菜单

开机后屏幕上显示的菜单即为主菜单，有六个选项：“管序号”，“参数”，“扫速”，“图形分析”，“打印”，“帮助”，按面板上的“ $\uparrow$ ”，“ $\downarrow$ ”键确认。

(2) 子菜单

A、管序号：按“ $\uparrow$ ”，“ $\downarrow$ ”键移动选项按钮到“管序号”，按“ $\rightarrow$ ”，“ $\leftarrow$ ”键可以改变被测管的序号，管子的测试结果按序号自动存储，相同序号的管子只存储最新的测试结果。

按“确定”键进入“管极性”子菜单，屏幕右上方弹出“管极性”的选项“PNP”“NPN”，根据被测的型号按“ $\uparrow$ ”，“ $\downarrow$ ”键选择，按“确定”键确认并退回到主菜单。

B、参数：仪器可测得参数有六个： $t_d, t_r, t_{on}, t_s, t_f, t_{off}$ 按“ $\uparrow$ ”，“ $\downarrow$ ”键移动选项按钮到“参数”，按“确认”键进入“参数”子菜单，按“ $\uparrow$ ”，

“↓”键确认测试 t_d, t_r, t_{on} 或 t_s, t_f, t_{off} ，相应的选项弹起，按“确认”键确认测试参数并退回到主菜单。

C、扫速：扫速共分 20nS/cm, 50nS/cm, 100nS/cm, 200nS/cm 四档，按“↑”，“↓”键移动选项按钮到“扫速”，屏幕右上方弹出“扫速”的四个选项，按“↑”，“↓”键选择不同扫速，按“确认”键确认退回到主菜单。

D、图形分析：该选项可定量分析测试曲线，按“↑”，“↓”键移动选项按钮到“图形分析”，按“确认”键后屏幕的图形显示区域显示测试曲线，用亮线标出 A, B 曲线的 10%点，90%点以及 t_d, t_r, t_{on} 或 t_s, t_f, t_{off} 计算方法。

E、打印：该选项可将测试结果输出到打印机，按“↑”，“↓”键移动选项按钮到“打印”，按“确认”键进入“打印”一级子菜单，屏幕右上方弹出“打印”的四个选项：“START”“END”“打印”“返回”。

START：按“→”，“←”键可以改变打印的终止管序号。

END：按“→”，“←”键可以改变打印的终止管序号，注意终止管序号应比起始管序号大。

打印：连接好打印机后，按“确认”键即可将从 START 到 END 的管子测试结果打印出来。

返回：按“确认”键返回主菜单。

F 帮助：按“↑”，“↓”键移动选项到“帮助”，按“确认”键后屏幕上显示出仪器的操作说明书，按“↑”，“↓”键翻页，按“确认”键返回主菜单。

说明：图形显示区域是指屏幕中间的网格部分，上部为 B 曲线显示区域，

下部为 A 曲线显示区域，X 轴是时间轴，每格代表的时间由扫速决定，区域右顶部显示当前扫速，例：当前的扫速是 50nS/cm，表示每格代表的时间是 50nS，区域左顶部显示当前管子的型号（NPN 或 PNP）

4、用 BJ2961 型晶体管开关参数测试仪进行测量

- 1) 将仪器的四个部分（A 屉，B 屉，测试盒，正负极性脉冲头）按图所示按好。
- 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，例：选用的测试盒的标称是，就应将琴键的“1/10”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) 开机后仪器默认的“管序号”为 1，“测试参数”为 t_{off} ，“测试扫速”为 100nS/cm
- 5) 插上被测管，如果下屉显示的 I_B, I_C 与测试盒的标称有误差，可调整相应的调节旋钮使之一致。
- 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。

五、数据处理和分析

本实验测量双极型晶体管的开关时间并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、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，高频管和开关管的延迟时间 t_d 、上升时间 t_r 、开

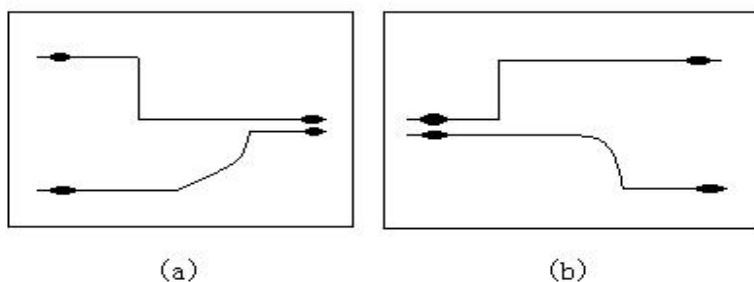


图 5

启时间 t_{on} 及存贮时间 t_s 、下降时间 t_f 、关闭时间 t_{off} 。如图 56(a)、(b)所示。

图中(a)表示 NPN 管测量 t_s 、 t_f 、 t_{off} 波形及 PNP 晶体管测 t_d 、 t_r 、 t_{on} 波形。图 5(b)表示 NPN 管测量 t_d 、 t_r 、 t_{on} 波形及 PNP 管测量 t_s 、 t_f 、 t_{off} 波形。

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。

六、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。

实验五、晶体管特征频率测量

晶体管特征频率 f_t 的测量定义为共射极输出交短路电流放大系数 $|\beta|$ 随频率增加而下降到 1 的工作频率，它反映了晶体管共发射运用具有电流放大作用的频率极限，是晶体管的一个重要频率特性参数。 f_t 主要取决于晶体管的合理的结构设计，但也与晶体管工作时的偏置条件密切相关。因而，晶体管的特征频率 f_t 是指在一定集团偏置条件下的测量值。其测试原理通常采用“增益—带宽”积的方法。

一、实验目的

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 V_{CE} 和 I_E 变化的规律，加深其与晶体管结构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。

二、实验原理

共发射极交流工作状态下，晶体管发射结电压周期性变化引起发射结、收集结空间电荷区的电荷和基区、发射区、收集区内的少子、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，加之载流子渡越收集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放大系数可表示为

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

其幅值和相位角随频率变化的有关系分别为

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

$$\varphi = -[\arctg(\omega/\omega_\beta) + m\omega/\omega_\beta] \quad (3)$$

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， $|\beta| = \beta_0/\sqrt{2}$ ， $|\beta|$ 下降 3dB；

当时， $f \gg f_\beta$ ， $|\beta|f = \beta_0 f_\beta$ 。根据定义， $|\beta|=1$ 时的工作频率即为

特征频率 f_T ，则有

$$f_T = |\beta|f = \beta_0 f_\beta \quad (4)$$

另外，当晶体管共基极截止频率 $f_a < 500\text{MHz}$ 时近似有 $f_T \approx f_a/(1+m)$ ，微波管中 $f_T = f_a$ 。所以关系式(26.4)表明当工作频率满足 $f_\beta \ll f < f_a$ 时共发射极交流短路电流放大系数与工作频率乘积是一个常数，该常数即特征频率 f_T ，亦称“增益—带宽”积。上式同时还表明 $|\beta|$ 与 f 成反比， f 每升高一倍， $|\beta|$ 下降一倍，在对数坐标上就是 $|\beta| \sim f$ 的(-6dB)/倍频关系曲线，图 1 表示了 $|\beta|$ 随频率变化的关系。

直接在 $|\beta|=1$ 的条件下测量 f_T 是比较困难的，而在工作频率满足 $f_\beta \ll f < f_a$ 之关系时测得 $|\beta|$ ，尔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 f_T ，使测试变得简单，这就是通常测量 f_T 的基本原理。

晶体管原理课中分析了特征频率与晶体管结构等参数的基本关系。在一般情况下晶体管的收集结势垒电容远小于发射结势垒电容,如果再忽略寄生电容的影响,那么特征频率可以表示为:

$$f_T^{-1} = 2\pi(r_e C_{Te} + W_b^2 / \lambda D_b + \chi_{mc} / 2v_\delta l + r_{cs} + C_{Tc})$$

$$= 2\pi(\tau_e + \tau_b + \tau_d + \tau_c) \quad (5)$$

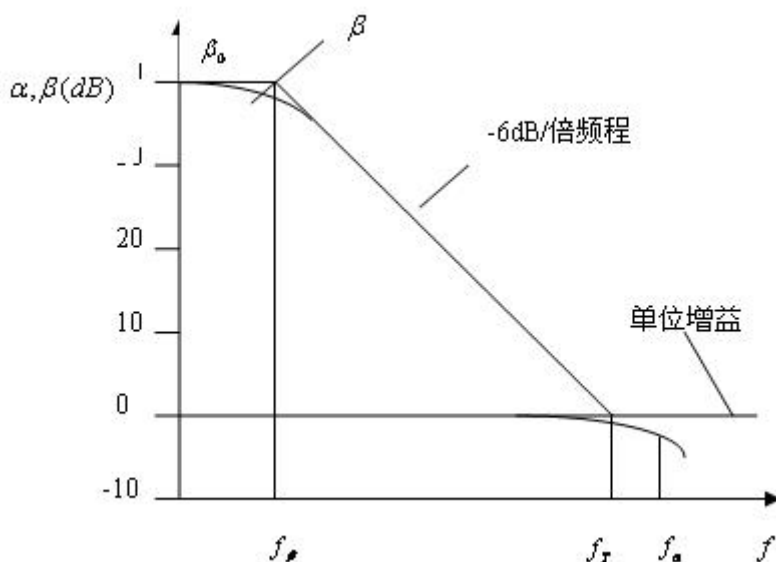


图 1 电流放大系数与频率的关系

很明显, f_T 是发射结电阻、基区宽度、势垒电容各势垒区宽度等的函数。而这些参数虽然主要取决于晶体管的结构,但也与晶体管的工作条件有关,即工作偏置不同 f_T 也不等。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 (a) 表示了 V_{CE} 等于常数时 f_T 随 I_E 的变化。图 2 (b) 表示 I_E 等于常数时, f_T 随 V_{CE} 的变化。这种变化是载流子传输时间随工作偏置改变所致。

将关系式 $\tau_e \approx kT/q I_E$ 代入式(5)，得到

$$f_T^{-1} = 2\pi \left(\frac{kT}{q} \cdot \frac{1}{I_E} C_{Te} + \tau_b + \tau_d + \tau_e \right) \quad (6)$$

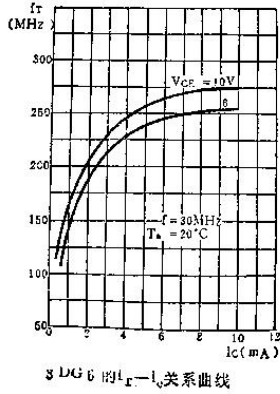


图 2 (a)

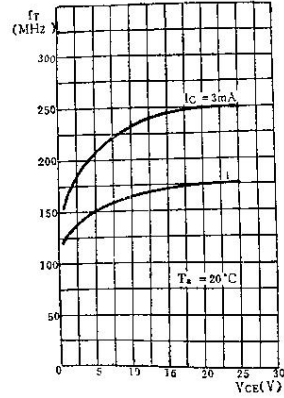


图 2 (b)

一般情况下，在收集极工作电压一定， $I_E < I_{CM}$ 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。

f_T 的测试装置如图 3 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，基极和收集极插孔短接，旋转电流调节旋扭使 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了的输入信号电流。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。

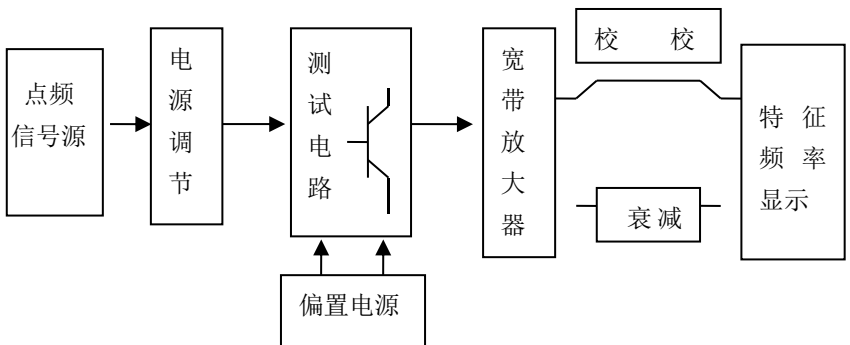


图 3 特征频率测试系统方框示意图

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，但都是依据增益一带宽积的原理而设计的，其结构框图仍可用图 3 表示，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 f_T 显示表头满偏，这实际上是信号源输出一恒定其极电流。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，而有的有测试仪则将一定的衰减倍率设定在了仪器内部结构中，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其极电流是定值，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。另外，否则不同测试仪的测量范围不同，信号源频率不等，所含测试点频数量也可能不一样。如:QG-25 型信号源测试频率固定为 400MHz，测试范围为 400~4000MHz；QG-16 型信号源

可以输出 10MHz, 30MHz, 100MHz 三个测试频率, 测试范围为 100~1000MHz 等。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。

三、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 $f_T \sim V_{CE}$ 变化头条。
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。
6. 改变测试频率重新进行 1~4 的实验。

四、实验操作步骤

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. 准备

- (1) 将“极性转换”置“0”, “参数量程”置于“校准”。
- (2) 将“电流量程”置于所需档位。将电流的调节旋钮逆时针调到最小。

3. 校准

- (1) 接通本仪器的电源预热半小时。
- (2) 将校准用短路器插入 B、C 插孔, 调节“校准”旋钮使参数表准确满度, 拔下短路器。
- (3) 在温度发生很大变化和仪器长期未经使用需要调节检波负载, 即校准右边电位器。方法参考使用手册。

4. 测量

- (1) 依被测管 f_T 的大致范围将“参数量程”置 1000MHZ 或 300MHZ 档。
 - (2) 按测试盒管脚标记插入被测管。(注意：一定要插到底)
 - (3) 按被测试管的极性需要把“极性转换”置于“NPN”或“PNP”。
 - (4) 顺时针缓缓转动电压、电流调节旋钮，使偏压、偏流指示到规定值。
 - (5) 在参数表盘上直接读出值。
 - (6) 恢复到“准备”状态，以便下次测量。
5. 在规范偏置条件下测量样管的 f_T 。
 6. V_{CE} 在规范值测量 $f_T \sim I_E$ 关系
 7. I_E 在规范值测量 $f_T \sim V_{CE}$ 关系
 8. 测试完毕，各开关、旋钮恢复到起始位置，关断电源开关，切断电源。

五、注意事项

1. 测试过程中所用测试条件，按“半导体器件手册”中所规定的 I_{CM}, BV_{CEO} ，使 $I_C < I_{CM}, V_C < BV_{CEO}, P_C < P_{CM}$ 。
2. 管脚请勿插错，极性开关请勿放错。
3. 过载灯泡亮时，请立即关断极性开关和电源开关，并报告辅导老师。

六、数据处理和分析

1. 将实验步骤 4、5、6、7、的测试及结果数据列表，并计算相应的 $|\beta|$ 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 $C_{Te}, \tau_b + \tau_d + \tau_c$ 值。
4. 对实验步骤 5、6、7 的相应曲线和测量数据进行简要理论分析。

七、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 $f = 3 f_{\beta}$ 和 $f = 5 f_{\beta}$ ，理论上 f_T 的相对误差是多少？

实验六、晶体管稳态热阻的测量

一：实验目的：

掌握热阻 R_T 的测试原理，了解 NC2991 型晶体管热阻测试仪的工作原理及测试方法。

二：实验内容：

- 1、测晶体管的 R_T ；
- 2、根据实验结果用 2 种方法计算晶体管的热阻 R_T ，并比较 2 种方法的精度和实用价值。

三：测试原理：

1、测量热阻的一般方法

双极晶体管热阻计算公式如下：

$$R_{th} = (T_j - T_{ref}) / P_1 \quad (1)$$

式中：

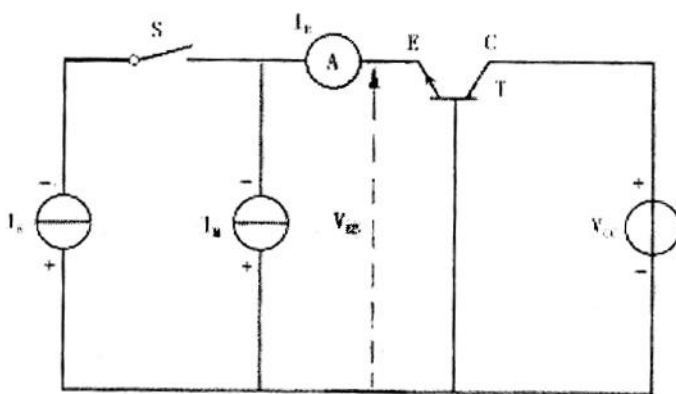
T_j 为器件结温；

T_{ref} 为环境温度或管壳温度；

P_1 为加在器件上的功率， $P_1 = I_C V_{CB} + I_E V_{EB}$

2、电特性法热阻测量方法原理

电特性法热阻测量的依据是双极晶体管参数（主要指 V_{BE} ）随温度变化的特性。实验表明，在 $0^\circ\text{C} \sim +200^\circ\text{C}$ 的温度范围内，晶体管正向压降 V_{BE} 随结温 T_j 的升高线性下降。测量方法为发射极-基极正向法，选择适当的加热脉冲持续时间 (t_p)，测量 V_{BE} 的温度特性测得结温，由此进一步测量结至任意点的热阻。



T 为被测晶体管 I_E 为电流探测器

图 1 测量 NPN 晶体管热阻的基本试验电路

图 1 中示出了测量 NPN 晶体管热阻的基本电路。基极接地测试电路包括两个电流源（测试电流源和加热电流源）、一个电压源（提供集电极—基极电压 V_{CB} ）和加热电流开关（S）。此测试方法可采用直流或脉冲开关。

开关 S 断开时，只有测量电流 I_M 流入被测晶体管（T）；发射极—基极正向电压为 V_1 ，结温为 $T_j(1)$ 。将开关 S 闭合，加热电流与测量电流一起流入晶体管。在加热脉冲持续时间（ t_p ）内，结温从 $T_j(1)$ 上升到 $T_j(2)$ ，然后，将开关 S 断开，发射极电流恢复到 I_M ；记录此时发射极—基极电压 V_4 。当结温仍很高时，在测试电流下，发射极—基极正向电压维持在小于初始值 V_1 上，在结温下降过程中，该电压上升，然后升到 I_M 的初始值 V_1 。（如图 2）。

为了计算热阻，首先记录测试电流下的发射极—基极电压在时间 t_0 和 $t_0 + t_p$ 时刻的值（ V_1 和 V_4 ）。

两值之差为 $\Delta V_{EB}^{(1)}$ 。则结至固定温度参考点 X 的热阻由下式给出：

$$R_{th(j-X)} = \frac{\Delta T_j}{\Delta P_T} = \frac{\Delta V_{EB}^{(1)} / \alpha_{VEB}}{I V_{EB} + h_{FB} I V_{CB}} \quad (2)$$

其中： α_{VEB} 为器件的热敏温度系数 (mV/K)。

h_{FB} 为晶体管共基电流增益。

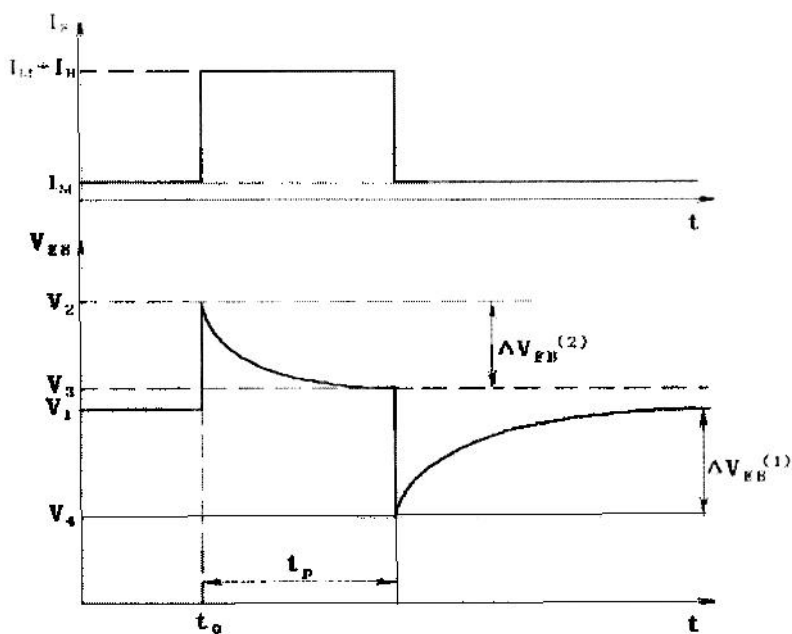


图 2 I_E 和 V_{EB} 随时间的变化

必须根据参考点的位置和晶体管的材料, 适当选择加热脉冲的持续时间以使结被充分加热而参考点的温度又没有显著变化。

四、实验步骤

1、 测试前准备:

在进行各项操作之前, 应先正确连接被测器件, 将被测器件的 B、C、E 三端分别连接至面板上的 B、C、E 口。

检查面板上各开关是否处于正确状态, 否则应进行正确设置。

使用恒温夹具时, 用专用数据线将恒温夹具控制仪面板上“主机接口”和微机上温度采集接口相连, 读取和处理夹具当前温度。

2、 测试 BE 间 I—V 特性

“I—V 特性”是给三极管发射结（或二极管）施加阶梯恒流偏置并测量其正向压降，绘制 I—V 特性曲线。

在测试软件界面中，激活“I—V 特性”标签页。

单击“I—V 特性”按钮，若“c、b 间短路”复选框处选定状态，再热阻仪首先将被测管集电极和发射极短路，然后向发射结注入不同的偏置电流（阶梯恒注）进行测试，得到器件的 V_{BE} ，测试结果将以数据和曲线形式分别显示在客户区左、右两部分中。如果选择“c、b 间短路”复选框处于不选状态，测试数据为被测管集电极开路状态下的“I—V 特性”。如图 3 所示。

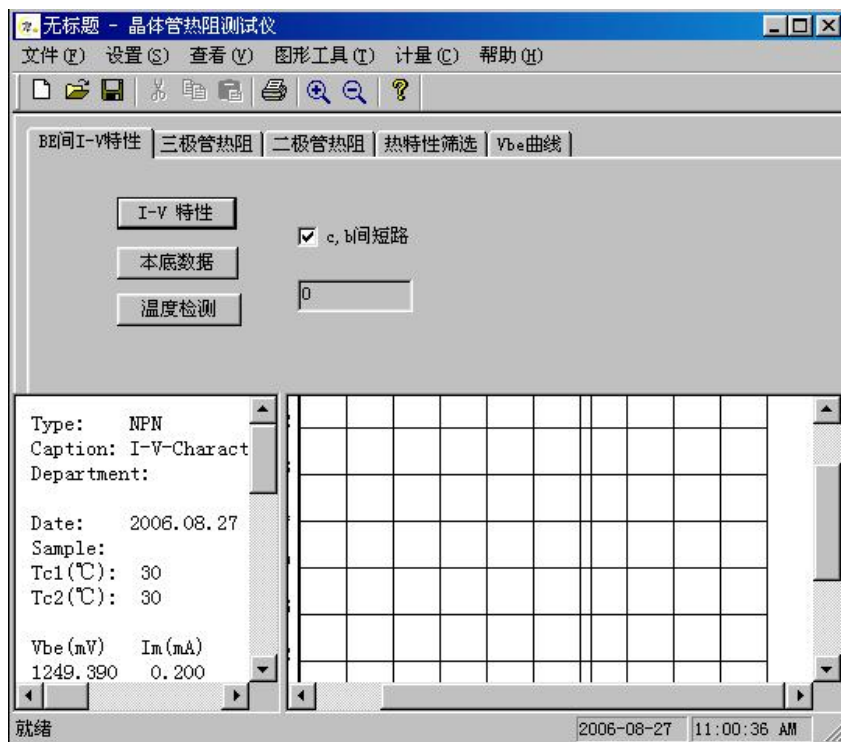


图 3 I—V 特性曲线

3、 三极管热阻

热阻测试包括瞬态热阻测试和稳态热阻测试，测试方法可依据国家标准 GB/T4587-94（IEC 747-7-1988）中“11 热阻”规定。瞬态热阻测试和稳态热阻测试操作方法相似，在此仅以瞬态热阻测试说明测试方法。

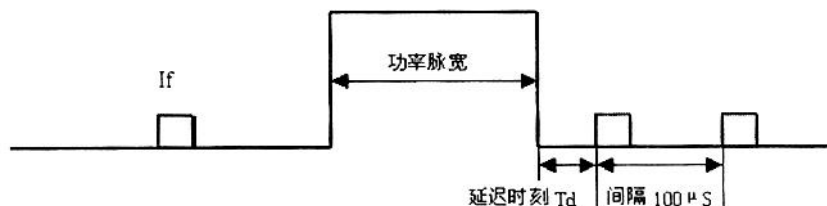


图 4 热阻测试中功率脉冲与测试恒流波形式示意图

依据国标测热阻的测试过程：热阻仪首先测量发热前的 V_{BE} 值；然后给被测管施加加热电压 V_{CB} 和加热电流 I_C ，使被测管管芯发热；加热脉宽过后经过一定的延迟时间 T_d ，热阻仪测量被测管 V_{BE} 值，相隔 $100\ \mu s$ 后再次测量，得到第二个 V_{BE} 值，完成测试过程。根据发热后两次 V_{BE} 测量值，推算出刚去掉加热功率瞬间 ($T_d=0$) 的 V_{BE} 值，由以上数据计算出热阻。上述过程均由热阻仪自动完成，用户只需输入几个参数即可。热阻测试波形示意图 3，三极管热阻测试窗口见图 5。具体操作步骤：

a. 若进行稳态热阻测试，将被测管正确地安装在恒温夹具上，并将恒温夹具的测试引出线正确连接到热阻仪上，将恒温夹具控制仪与微机的温度通讯接口用专用线连接（此接口支持热插拔），清空软件界面中“壳温”文本框。调节好夹具设定温度（标准规定 $60^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ ）。若进行瞬态热阻测试，只需将被测管直接接入主机，不使用恒温夹具控制仪时，将当前被测管环境温度输入软件界面中“壳温”文本框中即可。



图 5 三极管热阻测试界面

b. 正确设置主机面板各开关状态。

c. 在测试软件界面中，激活“三极管热阻测试”标签页（若软件界面中没有测试标签页，可以“查看”菜单中选择“测试对话框”子菜单项，显示出测试标签页后再激活此页）。

d. 选取合适的加热功率脉宽时间单位并输入脉宽数值，单位与有效数值范围如下， μs ：300~1000（必须为 10 的整数倍）， ms ：1~1000； s ：1~2000。在选择加热功率脉宽时间单位为“s”时，测试过程显示测试进程对话框，若遇异常情况，用户可单击对话框中“取消”按钮中止测试进程。

e. 输入热敏参数测试电流，范围：1mA~20mA。初始值为 10mA（推荐 10mA，对于小功率晶体管，10mA 的测试电流可能会使管芯发热，可适当减小测试电流。此情况下温度系数 $\alpha_{V_{EB}}$ 不能用本说明书“第五章 热阻测量原理”中的式（4）求得，只能通过 GB/T4587-94 中提到的温度系数 $\alpha_{V_{EB}}$ 的

测量方法测得。具体方法请参照“第五章 热阻测量原理”中的有关内容)。

f. 输入去电后第一次测量 V_{BE} 的延迟时间，范围：50 μs ~ 300 μs ，初始值为 50 μs 。

g. “反推”复选框初始为不选状态。此状态下，以去功率后延迟 T_d 时间测得的 V_{BE} 值作为热阻计算依据。“反推”复选框处于选定状态时，根据 T_d 时刻和 $T_d+100 \mu s$ 时刻两次测量的 V_{BE} 值反推计算出去功率后零时刻的 V_{BE} 值，以此值作为热阻计算依据。

h. 单击“测试”按钮，测试结果将以数据形式显示在客户区左半部分，热阻值以大字形式显示在客户区右半部分。

注意：输入具体数值时要注意允许的范围，如果超出范围，程序会提示用户重新输入。输入加热脉宽时要注意被测器件允许最大耗散功率，瞬态热阻测试时由于定时短，一旦开始测试，不允许用户中断测试过程，稳态热阻测试时可以进程条形式显示测试进程，允许用户中断。

4、 二极管热阻

操作步骤如下：



图 6 二极管热阻测试界面

a. 若进行稳态热阻测试，将被测管正确地安装在恒温夹具上，并将恒温夹具的测试引出线正确连接到热阻仪上：二极管正极接热阻仪“B”插孔，负极接热阻仪“E”插孔。将恒温夹具控制仪与主机的温度通讯接口用专用线连接（此接口支持热插拔），调节好夹具设定温度。若进行瞬态热阻测试，只需将被测管直接接入主机，不使用恒温夹具控制仪时，将当前被测管环境温度输入测试标签页“壳温”文本框中即可。

b. 将热阻仪面板极性转换开关切换至“关”状态（即 NPN 状态，开关下方指示灯熄灭）。调节主机面板上功率电流旋钮，使功率电流到要求值。

c. 在测试软件界面中，激活“二极管热阻测试”标签页（若软件界面中没有测试标签页，可从“查看”菜单中选择“测试对话框”子菜单项，显示出测试标签页后再激活此页）。

d. 加热“功率脉宽”、热敏参数“测试电流”、去电后第一次测量的热敏参数 V_{BE} “延迟时间”的输入和“反推”复选框的选取请参见前节“三极管热阻”。

e. 在“温度系数”文本框中输入测得的二极管热敏参数温度系数^①。

f. 根据二极管施加加热电流时可能产生的最大正向电压值，在“电压采集范围单选钮”中进行正确选择，例如：测试 LED 应选择“ $\pm 5V$ ”，测试硅二极管应选择“ $\pm 1.25V$ ”，这样可最大限度地保证硅二极管电压的测量精度。

g. 单击“测试”按钮，测试结果将以数据形式显示在客户区左半部分，热阻值以大字形式显示在客户右半部分。

①二极管热敏参数温度系数可用 NC8861 型恒温夹具控制仪与配套夹具

给被测管加热升温（硅器件最高不超过 175℃，其他材料器件根据其特性确定最高加热温度），测得两个或多个热敏参数温度特征值。用公式： $K=(V_{m1}-V_{m2})/(T_1-T_2)$ ， V_{m1} 、 V_{m2} 分别为器件在温度 T_1 、 T_2 ，偏置电流 I_m 下测得的正向电压值。

五、计算方法

本仪器热阻计算考虑到测试过程中加热功率施加前后，参考点温度变化的影响。热阻测试前必须保证晶体管结与参考点之间达到热平衡——结温与参考点温度相等。于是热阻计算公式可进行下列推导：

$$R_{th(j-ref)} = \frac{T_j - T_{ref}}{P} = \frac{\Delta T_j - \Delta T_{ref}}{P} = \frac{\Delta V_{EB}}{\alpha_{VEB} P} - \frac{\Delta T_{ref}}{P} \quad (4)$$

式（4）中 T_{ref} 为参考点温度。

系统热敏参数测试时的发射结偏置电流一般取 $I_M=10mA$ 。

实验表明，各种硅管在偏置电流 $I_M=10mA$ 条件下， $V_{BE}=f(T_j)$ 曲线的线性部分外推至绝对温度=0K（-273.15℃）时， $V_{BE}=1267mV$ （其误差一般不大于±2%），此理论仅对 $I_M=10mA$ 有效。

利用此特性，只需在任意室温（ T_a ，单位：K）下测出此时的基极—发射极的正向电压 $V_{BE(Ta)}$ ，即可快速得到 V_{BE} 的温度系数 α_{VEB} 。

$$\alpha_{VEB} = (1267 - V_{BE(Ta)}) / Ta \quad (5)$$

将（5-5）代入式（5-4）即可求得被测管的热阻公式。

$$R_{th(j-X)} = \frac{\Delta V_{EB}^{(1)} * Ta}{(1267 - V_{BE(Ta)}) * (I_H V_{CB})} - \frac{\Delta T_X}{(I_H V_{CB})} \quad (6)$$

在 $I_M \neq 10mA$ 时，式（5）不成立。例如测试小功率晶体管，10mA 的测试电流可能会使管芯发热，此时应根据器件参数选取合适的测试电流，

$\alpha_{V_{EB}}$ 不能用式 (5) 求得, 只能通过温度系数 $\alpha_{V_{EB}}$ 的测量方法测得。操作方法如下: 将被测管放入温度可控的加热器中并与仪器正确连接, 再将仪器温度探测头放入加热器并使之紧贴被测管壳, 选定合适的测试电流, 加热器给器件加热到某一温度 T_b (比如 100°C) 并达到平衡时, 测量此温度下的发射极—基极正向电压 $V_{BE(Tb)}$, 热阻可由式 (7) 得出。

$$R_{th(j-X)} = \frac{\Delta V_{EB}^{(1)} * (T_a - T_b)}{(V_{BE(Tb)} - V_{BE(Ta)}) * (I_H V_{CB})} - \frac{\Delta T_X}{(I_H V_{CB})} \quad (7)$$

热阻仪软件热阻测试页“反推”复选框初始为不选状态。此状态下, 以去功率后延迟 T_d 时间测得的 V_{BE} 值: V_{mh1} 作为热阻计算依据。即:

$\Delta V_{EB} = V_{mh1} - V_{mc}$; “反推”复选框处于选定状态时, 根据 T_d 时刻和

$T_d + 100\mu\text{s}$ 时刻两次测量的 V_{BE} 值: V_{mh1} 和 V_{mh2} 值反推计算出功率后零时刻

的 V_{BE} 值: V_{mh0} 作为热阻计算依据。即 $\Delta V_{EB} = V_{mh0} - V_{mc}$ 。式 (6)、(7) 中

$$\Delta T_X = T_{c2} - T_{c1}。$$

七、思考题:

- 1、简单叙述测试晶体管热阻的原理, 以及 NC2991 型热阻测试仪是如何实现 R_T 测试?

实验七、半导体传感器的使用与参数测量

一、实验目的

- 1、掌握几种传感器的工作原理；
- 2、了解几种传感器的应用领域，测试方法。

二、实验内容及原理

I 光纤传感器——位移测试

(一) 实验原理:

本实验仪中所用的为传光型光纤传感器,光纤在传感器中起到光的传输作用,因此是属于非功能性的光纤传感器。光纤传感器的两支多模光纤分别为光源发射及接收光强之用,其工作原理如图(1)所示。

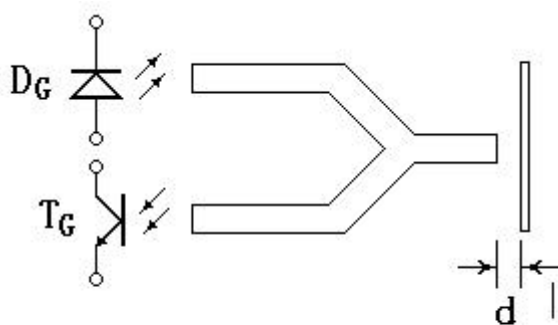


图5 光纤位移传感器工作原理图

光纤传感器工作特性曲线如图(2)所示。一般都选用线性范围较好的前坡为测试区域。

(二) 实验所需部件:

光纤、光电变换器、放大稳幅电路、近红外发射及检测电路（光纤变换电路内）、反射物（电机叶面）、电压表。

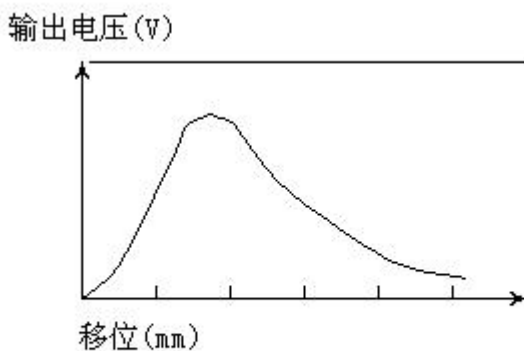


图6 反射式光纤位移传感器输出特性曲线

（三）实验步骤:

1. 将光纤、光电变换块与光纤变换电路相连接,注意同一实验室如有多台光电传感器实验仪,由于光电变换块中的光电元件特性存在不一致,则光纤变换电路中的发射\接收放大电路的参数也不一致,故请做实验之前将光纤\光电变换块和实验仪对应编号,不要混用,以免影响正常实验。
2. 光纤探头安装于位移平台的支架上用紧定螺丝固定,电机叶片对准光纤探头,注意保持两端面的平行。
3. 尽量降低室内光照,移动位移平台使光纤探头紧贴反射面,此时变换电路输出电压 V_0 应约等于零。
4. 旋动螺旋测微仪带动位移平台使光纤端面离开反射叶片,每旋转一圈(0.2 毫米)记录 V_0 值,并将记录结果填入表格,作出距离 x 与电压值 mv 的关系曲线。

从测试结果可以看出,光纤位移传感器工作特性曲线如图(2)所示分为前坡 I 和后坡 II。前坡 I 范围较小,线性较好。后坡工作范围大但线性较差。因此平时用光纤位移传感器测试位移时一般采用前坡特性范围。根据实验结果试找出本实验仪的最佳工作点。(光纤端面距被测目标的距离)

思考题:

如何利用光纤传感器位移测试的原理,设计一个光纤传感器压力测试单元?(提示:压力致使物体产生形变)。

II 光纤传感器——转速测试

（一）实验所需部件:

光纤、光电变换块、光纤变换电路、测速电机、电压/频率表、示波器

（二）实验步骤:

1. 光纤变换电路中 F_o 端输出为整形电路输出，它可以将光纤探头所测到脉动信号整形为标准的 5VTTL 电平输出，以供仪器中的数据采集卡计数之用。
2. 开启转速电机,调节转速，用示波器观察 V_o 端输出电压波形和经过整形的 F_o 端输出方波的波形，如 F_o 端无输出则可能是 V_o 端输出电压过高，可适当降低放大增益，直至 F_o 端有方波输出为止。
3. 用示波器或频率计读出电机的转速。
4. 示波器探头接于光电变换器 V_o 端，放大器增益置最大，根据上面实验结果，探头安装在距反射叶片的最佳工作点处。开启电源与旋转电机，调节示波器，以能稳定地观察输出波形为好。读出相邻输出波形峰值之差，根据位移测试标定结果，判断旋转电机叶片的抖动情况，得出电机转动是否平稳的结论。

注意事项：电机叶片转动时 V_o 输出电压峰值之差是比较小的，而且要特别注意背景光的影响。

III 电荷耦合图像传感器---CCD 摄像法测径实验

（一）实验目的:

通过本实验进一步加深对 CCD 器件工作原理和具体应用的认识。

（二)实验原理:

电荷耦合器件（CCD）的重要应用是作为摄像器件，它将二维光学图像信号通过驱动电路转变成一维的视频信号输出。当光学镜头将被摄物体成像在 CCD 的光敏面上，每一个光敏单元（MOS 电容）的电子势阱就会收集根据

光照强度而产生的光生电子，每个势阱中收集的电子数与光照强度成正比。在 CCD 电路时钟脉冲的作用下，势阱中的电荷信号会依次向相邻的单元转移，从而有序地完成载流子的运输—输出，成为视频信号。

用图像采集卡将模拟的视频信号转换成数字信号，在计算机上实时显示，用实验软件对图像进行计算处理，就可获得被测物体的轮廓信息。

（三）实验所需部件：

CCD 摄像头、被测目标（圆形测标）、{CCD 图象传感器实验模块}、视频线、图像采集卡、实验软件

（四）实验步骤：

- 1、根据图像采集卡光盘安装说明在计算机中安装好图像卡。
- 2、被测物前安装好摄像头，连接 10V 稳压电源，视频线连接图像卡与摄像头。
- 3、查无误后开启主机电源，进入测量程序，启动图像采集后，屏幕窗口即显示被测物的图像，适当地调节 CCD 的镜头与前后位置，使目标图像最为清晰。
- 4、尺寸标定：先取一标准直径圆形目标（ $D_0=10\text{mm}$ ），根据测试程序测定其屏幕图像的直径 D_1 （单位用像素表示），则测量常数 $K=D_1/D_0$ 。
- 5、保持 CCD 镜头与测标座距离不变，更换另一未知直径的圆形目标，利用测试程序测得其在屏幕上的直径，除以系数 K ，即得该目标的直径。

注意事项：

CCD 摄像机电源禁止乱接，以免造成损坏。

思考题：

如何利用此方法测试方形物体的尺寸。

选做一 超声波距离测量实验

（一） 测量原理

人耳所能听闻的声波在 20~20000Hz 之间。频率超过 20000Hz 的声波是人耳不能听闻

的声波称为超声。声波的频率愈高，其与光波的某些特性也愈相似。

声波的波峰与波峰之间的距离称为一个波长 λ 。波长与声波的频率成反比，与声波的传播速度成正比，公式如下：

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

式中 c —— 声波传播速度

f —— 声波的频率

超声波具有的特点：传播时在不同的介质界面上具有反射的特性。超声波的频率愈高，方向性也愈好。超声波的频率愈高，其传播的能量愈大，同时在介质中的衰减也愈大。同一频率的超声波在不同介质中的衰减是不同的。

超声波在空气中以纵波的方式传播，气体中的纵波声速公式如下：

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho}} \quad (2)$$

ρ ——密度

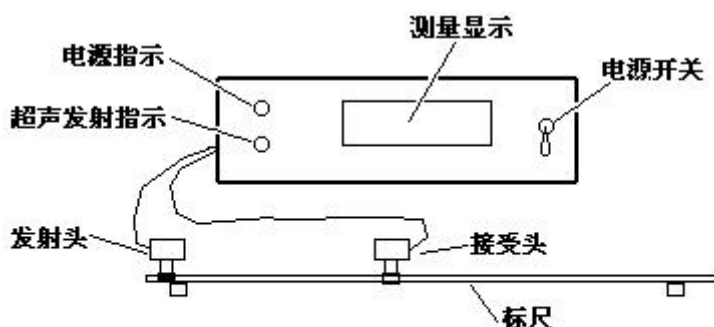
P_0 ——静态压力

γ ——热容比

超声波在气体中的传播速度约为 344 米/秒，

（二）实验原理：

超声测距实验仪见图（3）所示。



图（1）

发射头内部安装有超声发射探头，安装在标尺滑轨一端；另一端的接收头内部安装有接收部探头，两端均可在标尺滑轨上自由滑动；打开测距仪电源开关后，电源指示灯亮，测距仪开始工作；测距仪每隔 2 秒钟，由发射部件发出一超声脉冲，接收部件接收超声脉冲，如果正确接收到超声脉冲，测距仪将显示测量结果，否则显示“----”。

发射探头和接收探头是两个结构略有差异的电声传感器，其工作频率为 40KHz。

（三）实验操作：

打开测距仪的电源开关，电源指示灯亮；超声发射指示灯有规律地闪烁，表示发射部件正间隔性地发射出超声脉冲；移动接收头在道轨上的位置，记录下测距仪的显示结果和发射头和接收头之间的实际距离。

按下“时间/距离 转换开关”，则测距仪显示由距离转换为时间，可根据超声波在空气中的传播速度与仪器显示的发射-接收时间计算出两探头之间的距离，并与仪器直接显示的距离比较。

仪器上的“显示微调”可以调节距离显示值。

仪器的最小测距范围应 ≥ 5 厘米。

（四）实验数据：

单位：厘米

测距仪显示					
测量距离					

五、注意事项：

超声波探头工作时应避免剧烈震动，否则会使数字显示发生跳动。移动探头时请推移螺丝，切不可用力拉扯探头连接线，以免造成仪器故障。

选做二 半导体应变计性能

（一）实验原理：

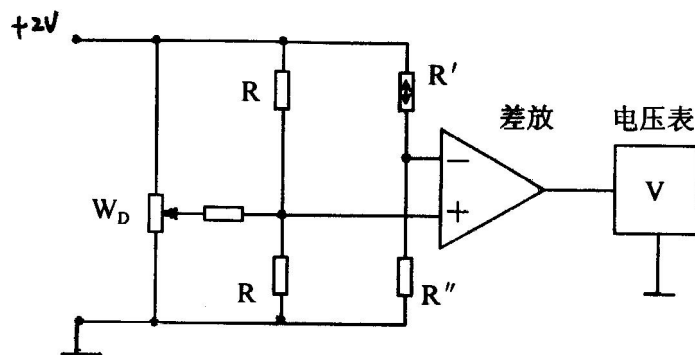
半导体应变计主要是根据硅半导体材料的压阻效应制成，当半导体晶体受到作用力时，晶体除产生应变外，电阻率也会发生变化。

与金属应变片相比，半导体应变计灵敏系数很高，可达 100~200，但是在稳定性及重复性方面都不如金属箔式片。实际使用时都是采用全桥工作形式。

（二）实验所需部件：

贴于双平行悬臂梁上的半导体应变计（一片）、直流稳压电源（2V）、

公共电路模块（一）{公共电路模块}、电压表、应变加热器、温度计（自备）



(图 4)

(三) 实验步骤:

1、按图（4）将应变计接入差动放大器、电桥、电压表、注意直流激励输出电压为 2V，以免因为电压过高引起半导体应变计自热。

2、连接主机与公共电路模块的电源并开启，调节电桥 W_D 电位器，使系统输出为零，此时差动放大器增益可置最大电压表可先置 20V 档。

3、用手提、压平行悬臂梁上下各约 5mm，观察电路输出电压变化范围、应变梁弹性恢复及重复性情况。

4、打开“应变加热”开关，记录半导体单臂电桥的温飘情况。（此时电压表应放 20V 档）

注意事项:

由于半导体应变计非常灵敏，当环境温度有微小变化时都会引起电桥电路输出电压变化。随着加热温度的改变，半导体单臂电桥系统输出电压要有一个相当长的时间才能基本稳定。

实验八、数字 MOSIC 电参数测试

一、实验目的

熟悉 MOSIC 的功能和参数的物理意义，掌握其测试方法。测试包括 MOSIC 的最高工作频率、静态功耗、工作功耗、输入高（低）电平、输出高（低）电平、输出驱动能力及延迟时间等。

二、实验原理

1、MOSIC 静态功耗（也称维持功耗） P_{DD}

MOSIC 的静态功耗是：当输入端为固定的逻辑电平，输出端空载，输出状态固定不变时电路所消耗的能量。静态功耗是温度的函数。由于静态时从电源到地没有直流通路，CMOSIC 静态功耗很小，它只取决于漏电情况。

2、输出高电平 V_{OH} （低电平 V_{OL} ），输入高电平 V_{IH} （低电平 V_{IL} ）

（1）当输入端为固定的 V_{CC} 或 V_{SS} ，输出端空载时，所输出的固定电平称为输出高电平 V_{OH} 及输出低电平 V_{OL} 。

（2）当输出端维持应有的 V_{OH} 和 V_{OL} 时，输入端所能输入的最小高电平或最大低电平。

V_{OH} （ V_{OL} ）越接近 V_{CC} （ V_{SS} ）， V_{IH} （ V_{IL} ）越远离 V_{CC} （ V_{SS} ），其电路性能越好。

3、逻辑功能和最高工作频率 f_{max}

（1）先根据被测的 IC 应有的逻辑功能确定输入波形的时序，搭一个相应的测试电路产生这些输入波形并把其送入被测 IC 的输入端，用示波器或逻辑分析仪测试输入输出波形所对应的时序关系。

（2）最高工作频率 f_{max} 取决于电路各级在动态工作中的充放电速度。在额定的负载下，保持正确的逻辑关系和额定的波形幅度，电路所能承受的输入脉冲的频率为 f_{max} 。

4、工作功耗 P_W

静态功耗和动态功耗的总和为电路的工作功耗。

$$P_W = P_{DD} + P_A + P_T \quad (1)$$

动态功耗包括瞬态功耗 P_T 和交变功耗 P_A 。其中 P_T 是在动态工作中电源对电容（包括级间栅电容、PN 结电容和输出级负载电容等）的充放电所消耗的能量。

$$P_T = \sum C_i f_{Ci} (V_{OH} - V_{OL}) V_{CC} \quad (2)$$

P_A 是由于在交变时波形的上升沿和下降沿使得电路从 V_{CC} 到有直流通路而消耗的能量。

$$P_A \propto f_{Ci} \quad (3)$$

动态功耗是无法单独测试的，而对于 CMOS 电路由于 P_{DD} 很小，因此

$$P_W \approx P_A + P_T \quad (4)$$

在固定负载情况下它与工作频率成正比，在固定工作频率下，它与负载电容成正比。

5、延迟时间 t_d

延迟时间 t_d 反映电路某输出端对某输入端变化的响应速度，它的定义如图 1 所示。

$$t_d = \frac{1}{2} (t_{PLH} + t_{PHL}) \quad (5)$$

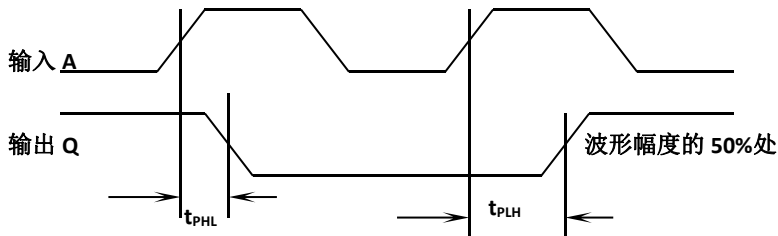


图 1 延迟时间定义

6、输出驱动能力

(1) 输出级对电容负载的驱动能力用 $\Delta t_d/1\text{pF}$ 表示，即单位负载电容的增加对输出级延迟时间的影响。这个值越小，说明电路容性负载能力越强。测试和计算用式

$$\Delta t_d/1\text{pF} = \frac{t_{d2} - t_{d1}}{C_{L2} - C_{L1}} \quad \Delta t_d/1\text{pF} = \frac{t_{d2} - t_{d1}}{C_{L2} - C_{L1}} I_{IN} \approx V_A / R_A \quad (6)$$

(2) 输出级对电流负载的驱动能力用拉、灌电流表示。

灌电流 I_{OH} --- 在满足输出端额定的最大输出低电平 V_{OLmax} 时，从输出端到 V_{SS} 向电路所灌电流的最大值。

拉电流 I_{OL} --- 在满足输出端额定的最小输出高电平 V_{OHmin} 时，从输出端到 V_{CC} 从电路拉出电流的最大值。

I_{OH} 和越大 I_{OL} ，说明电路的电流负载能力越强。

7、输入电流 I_{IN}

输入端接固定的 V_{CC} （或 V_{SS} ），从输入端至电路的 V_{SS} （或 V_{CC} ）端所通过的电流即为输入电流 I_{IN} 。MOSIC 的输入电流取决于栅的漏电和保护电路中 PN 结漏电等。因 I_{IN} 很小，无法用万用表直接测量，可以在输入端串联一个很小的采样电阻 R_A ，此时，通过 R_A 和万用表的输入电阻的电流相等。因此

$$I_{IN} \approx V_A / R_A \quad (7)$$

三、实验内容

- 1、测试室温下高速 CMOS 四异或门 74HC86 的静态功耗，并与相同功能的双极型电路 74LS86 静态功耗比较。
- 2、测量 74HC86 的输入高电平和低电平，输出高电平和低电平。
- 3、测量低速 CMOS 异或门 CD4030 的逻辑功能和负载电容为 15pF 时的最高工作频率。

- 4、用逻辑分析仪测试高速 CMOS 十进制可逆计数器 74HC193 的逻辑功能。
- 5、测量 CD4030 的工作功耗及其和频率的关系。
- 6、测量 CD4030 和 74HC86 的延迟时间，并进行比较。
- 7、测量 CD4030 输出级对电容的负载能力。

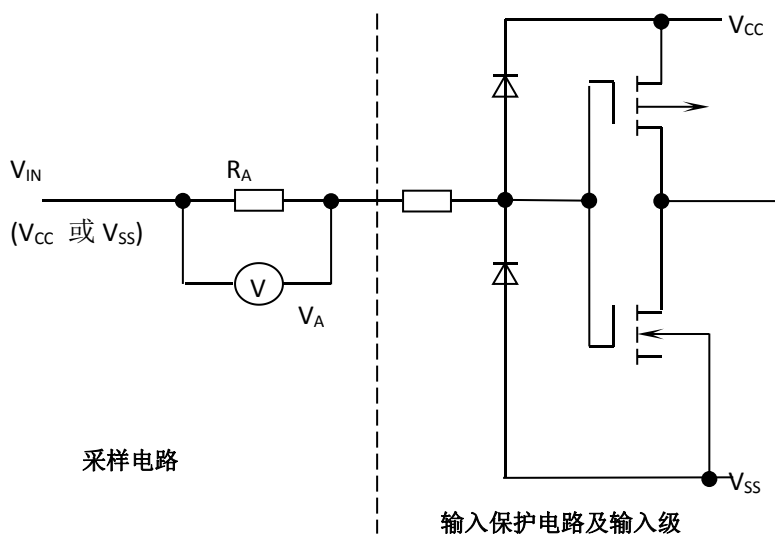


图 2 输入电流测试原理

四、实验步骤

1、MOSIC 静态功耗

- (1) 按图 3 连接测试线路，每个输入端必须接 V_{CC} 或 V_{SS} 。
- (2) 稳压源调至 5V，电流表置最小量程，记录稳定电流值。将 A_4 、 B_4 与 V_{SS} 断开，观测电流。
- (3) 用 74LS86 代替 74HC86 重复以上实验。

2、输入高电平和低电平，输出高电平和低电平

- (1) 将图 3 测试线路中 Q_4 端与 V_{SS} 之间并入一个电压表，测量 Q_4 端的输出低电平 V_{OL} 。
- (2) 上图中的 A_4 改接至 V_{CC} ，测量 Q_4 端的输出高电平 V_{OH} 。

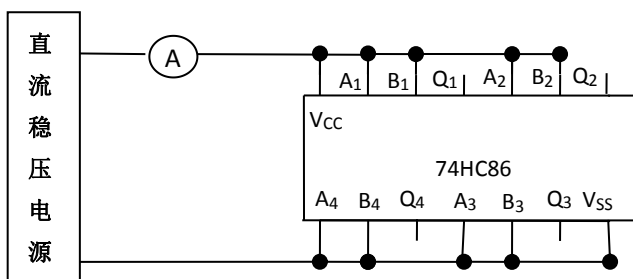


图 3 静态功耗测试电路

(3) 按图 4 连接测试线路。

(4) 电压源调至 5V，调节电位器使 V_I 从 V_{CC} 开始下降，直至输出电压从 V_{OL} 开始上升，此时 $V_I = V_{IH}$ 。

(5) 调节电位器使 V_I 从 V_{SS} 开始上升，直至输出 Q_4 端输出电压从 V_{OH} 开始下降，此时 $V_I = V_{IL}$ 。

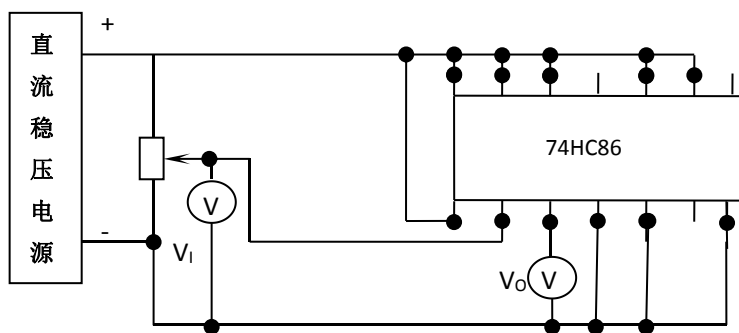


图 4 输入高(低)电平测试电路

3、最高工作频率

(1) 用双踪示波器对简单的逻辑电路 CD4030 测试

①按图 5 连接测试电路, $V_{CC} = 5V$, 选择 15pF 电容, 信号发生器作为 A_4 输入端信号。

②用双踪示波器 ch1、ch2 分别测量输入端 A_4 和 Q_4 的波形。

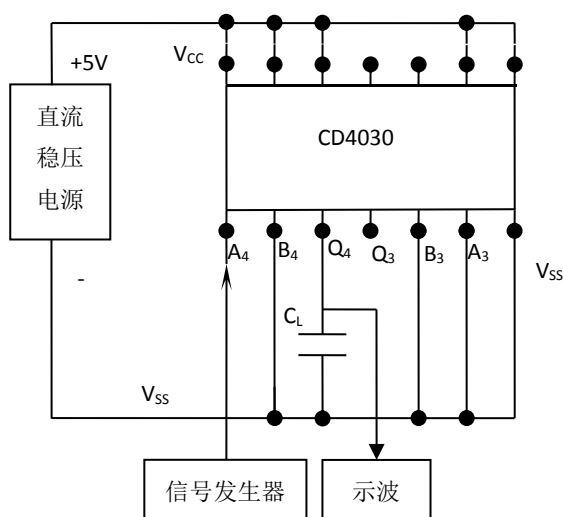


图 5 CD4030 逻辑功能测试电路

④提高信号发生器频率，同时调节时基旋钮，观察波形的变异，测试最高工作频率（CD4030 输入端 A_4 的频率）。

4、工作功耗

- （1）将图 5 中的电容调至 10pF 的电容。
- （2）调节信号发生器频率 f_c 从 1kHz 至前面测到的最高工作频率，每间隔读出相应电流，并分析功耗和频率的关系。
- （3）固定信号发生器频率 $f_c=100\text{kHz}$ ，分别测试当负载电容为 10pF、50pF、100pF 的电流，分析功耗和负载的关系。

5、延迟时间

- （1）将图 5 中电容调至 15pF， $f_c=10\text{kHz}$ 。
- （2）将双踪示波器 ch1、ch2 分别接至 A_4 、 Q_4 ，调节时基旋钮记录 CD4030 的 Q_4 相对 A_4 的延迟时间。
- （3）变化信号发生器频率 $f_c=100\text{kHz}$ ，重复上面操作。
- （4）用 74HC86 代替 CD4030 测试高速 CMOS 的延迟时间和前面测量结果对

比。

6、输出级驱动能力

(1) 对电容负载的驱动能力

①将图5中A₄、Q₄分别接示波器ch1、ch2。脉冲发生器频率调节为 $f_c=10\text{kHz}$ 。

②将可变电容调节为10pF、55pF、100pF分别测试Q₄对A₄的延迟时间。

(2) 对电流负载的驱动能力

①按图6连接测试电路。稳压源 $V_{CC}=5\text{V}$ 。

②调节电位器，当 $V_I=4.6\text{V}$ 时（此时输出低电平 $V_{OL}=V_{CC}-V_I=0.4\text{V}$ ）记录电流。

③按图7连接测试电路， $V_{CC}=5\text{V}$ 。

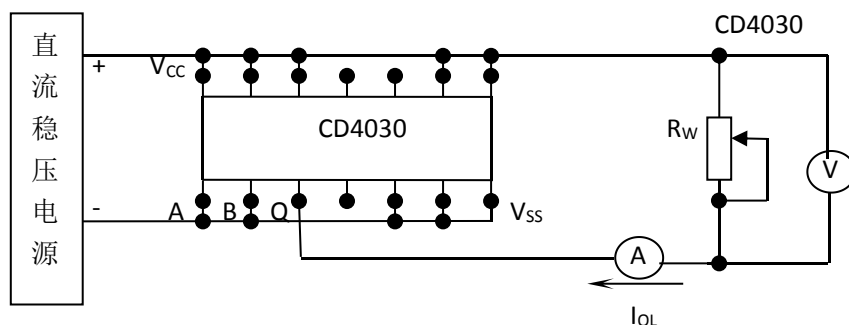


图6 灌电流 I_{OL} 测试电路

④调节电位器，当 $V_I=4.6\text{V}$ 时（此时输出高电平 $V_{OH}=4.6\text{V}$ ）记录电流。

⑤测定在一定灌电流 I_{OL} ，输入电压 V_{IN} 接 V_{CC} 或 V_{SS} 时，输出低电平的最大值即为额定负载电流下最大输出低电平。同理可以测得在一定的拉电流 I_{OH} ，输入电压 V_{IN} 接 V_{CC} 或 V_{SS} 时，输出高电平的最小值即为在额定负载电流下的最小输出高电平 V_{OH} 。测试电路如图8和图9所示，测定当 $V_{IN}=V_{CC}$ 或 V_{SS} 时， $I_{OL}=4\text{mA}$ 和 $I_{OH}=20\mu\text{A}$ 时输出级的 V_{OL} 和 V_{OH} 。

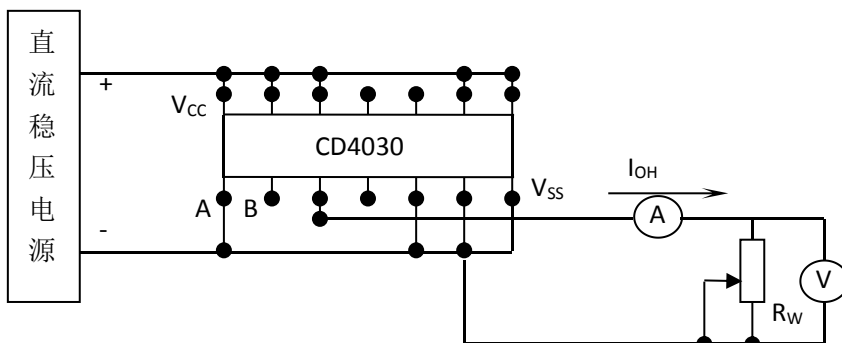


图 7 拉电流 I_{OH} 测试电路

7、输入电流

- (1) 按图 8 连接输入电流测试电路。
- (2) 采样电阻输入端接正电压，使 $V_{IN}=V_{CC}$ ，测量采样电压 V_A 。
- (3) 采样电阻输入端接地，读出采样电压 V_A 。

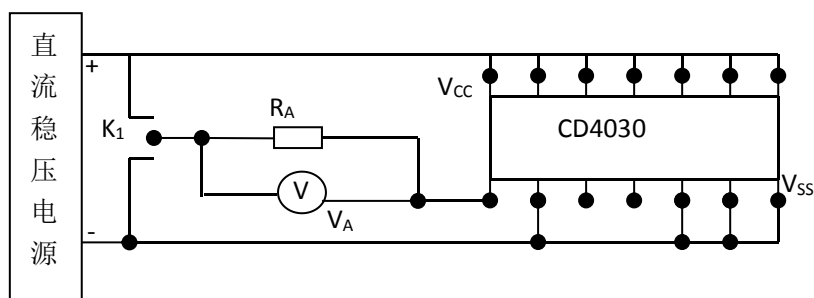


图 8 输入电流测试电路

五、数据处理和分析

- 1、计算 74HC86 和 74LS86 的静态功耗，并比较之。
- 2、整理 CD4030 的逻辑功能图，验证 Q_4 和 A_4 、 B_4 的逻辑关系。
- 3、CD4030 $P_W \sim f_c$ 关系列表，并作关系曲线进行分析。
- 4、CD4030 $P_W \sim C_L$ 关系列表，并作关系曲线进行分析。
- 5、CD4030 Q_4 对 A_4 的延迟时间，并分析工作频率对延迟有无影响。

6、CD4030 输出级对电容的负载能力 $t_d \sim C_L$ 列表，计算单位负载电容对延迟的变化值 $\Delta t_d/1\text{pF}$ 。

六、思考题

1、在测量静态功耗时，若某输入端悬浮有何问题？为什么？不用的输入端应如何处理？

实验九、数字 MOSIC 逻辑功能测试

数字芯片的功能测试通常需要借助逻辑分析仪，逻辑分析仪是数字设计验证与调试过程中公认最出色的工具，它能够检验数字电路是否正常工作，并帮助用户查找并排除故障。它每次可捕获并显示多个信号，分析这些信号的时间关系和逻辑关系；对于调试难以捕获的、间断性故障，某些逻辑分析仪可以检测低频瞬态干扰，以及是否违反建立、保持时间。

一、实验目的

- 1、掌握 MOSIC 功能测试方法；
- 2、熟悉逻辑分析仪软硬件的使用方法；

二、实验内容

- 1、根据数字芯片的功能，制定相应的测试方案，完成其测试电路图的设计；
- 2、根据设计的测试方案，利用逻辑分析仪完成芯片的功能测试。

三、实验原理

- 1、测试之前准备工作
 - (1) 清楚芯片设计时希望达到的逻辑功能；
 - (2) 芯片封装和各个管脚分布和功能以及信号电压；
 - (3) 根据芯片封装和管脚分布以及功能，设计相应的测试电路；
 - (4) 针对需要测试的芯片功能，根据测试信号或者是输入激励。
- 2、测试原理

数字芯片逻辑功能测试原理如图 1 所示。

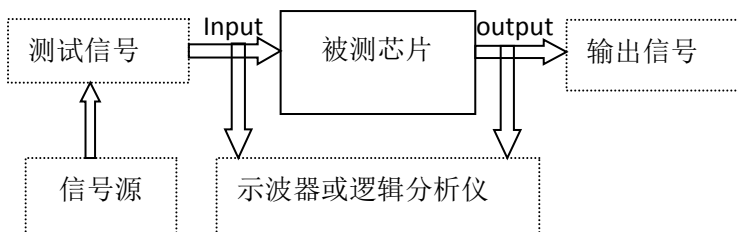


图 1

通过信号源产生的输入激励被送到被测芯片的输入端，芯片工作产生输出信号，然后将芯片的输入信号和被测的输出信号一块送入示波器或逻辑分析仪进行观察，通过被测芯片设计时的仿真波形进行比对，分析该芯片功能是否正确。

3、输入激励产生方法

信号源产生的输入激励要能够对被测芯片所有想要测试的功能进行覆盖。如果被测芯片功能简单，管脚少，输入信号较少，用信号发生器即可满足要求；如果被测芯片功能复杂或者输入管脚多，需要使用单片机或 FPGA 等可编程芯片通过编程产生输入激励。

4、测试设备简介

（1）逻辑分析仪测试原理

逻辑分析仪是利用时钟从测试设备上采集和显示数字信号的仪器，最主要作用在于时序判定。

由于逻辑分析仪不像示波器那样有许多电压等级，通常只显示两个电压（逻辑 1 和 0），因此设定了参考电压后，逻辑分析仪将被测信号通过比较器进行判定，高于参考电压者为 High，低于参考电压者为 Low，在 High 与 Low 之间形成数字波形。例如：一个待测信号使用 200Hz 采样率的逻辑分析仪，当参考电压设定为 1.5V 时，在测量时逻辑分析仪就会平均每 5ms 采取一个点，超过 1.5V 者为 High(逻辑 1)，低于 1.5V 者为 Low（逻辑 0），而后的逻辑 1 和 0 可连接成一个简单波形，工程师便可在连续波形中找出异常错误（bug）之处。

整体而言，逻辑分析仪测量被测信号时，并不会显示出电压值，只是 High 跟 Low 的差别；如果要测量电压就一定需要使用示波器。除了电压值

的显示不同外，逻辑分析仪与示波器的另一个差别在于通道数量。一般的示波器只有 2 个通道或 4 个通道，而逻辑分析仪可以拥有从 16 个通道、32 个通道、64 个通道和上百个通道数不等，因此逻辑分析仪具备同时进行多通道测试的优势。

逻辑分析仪的工作过程就是数据采集、存储、触发、显示的过逻辑分析仪由于它采用数字存储技术，可将数据采集工作和显示工作分开进行，也可同时进行，必要时，对存储的数据可以反复进行显示，以利于对问题的分析和研究。

因此，将被测系统接入逻辑分析仪，使用逻辑分析仪的探头（逻辑分析仪的探头是将若干个探极集中起来，其触针细小，以便于探测高密度集成电路）监测被测系统的数据流，形成并行数据送至比较器，输入信号在比较器中与外部设定的门限电平进行比较，大于门限电平值的信号在相应的线上输出高电平，反之输出低电平时对输入波形进行整形。经比较整形后的信号送至采样器，在时钟脉冲控制下进行采样。被采样的信号按顺序存储在存储器中。采样信息以“先进先出”的原则组织在存储器中，得到显示命令后，按照先后顺序逐一读出信息，按设定的显示方式进行被测量的显示。

（2）示波器和逻辑分析仪的区别

从电压等级显示来看，逻辑分析仪只能观察信号的高低电平（逻辑电平），而示波器能观察到信号的具体电压大小；从输入通道数来看，逻辑分析仪可轻易实现多通道（16 或个呢更多）同时测量，方便对并行信号进行分析。而示波器最多也就实现 4 通道同时测量；

相对来说，逻辑分析仪的应用更偏向于数字电路的时序逻辑分析，并不关注信号本身的波形结构；而示波器虽能测量整个信号的波形，从中分析出信号的异常和干扰，但无法长时间、多通道记录信号的时序逻辑，在分析时序逻辑方面能力较弱。

四、实验步骤

1、设计 74HC193 逻辑功能测试方案，其逻辑功能和管脚分布分别如图 2 和图 3 所示。

FUNCTION TABLE

Inputs				Mode
MR	$\overline{PL}$	CP_U	CP_D	
H	X	X	X	Reset(Asyn.)
L	L	X	X	Preset(Asyn.)
L	H		H	No Count
L	H		H	Count Up
L	H	H		Count Down
L	H	H		No Count

X = don't care

The IN74HC193 is an UP/DOWN MODULO-16 Binary Counter.

Logic equations

For Terminal Count:

$$\overline{TC_U} = Q_0 \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 \cdot \overline{CP_U}$$

$$\overline{TC_D} = Q_0 \cdot Q_1 \cdot \overline{Q_2} \cdot \overline{Q_3} \cdot \overline{CP_D}$$

图 2 74HC193 逻辑功能表

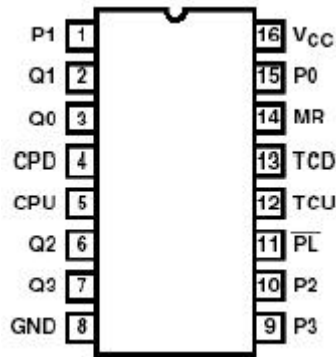


图 3

- 其中 ， 各管脚的功能如下：
- VCC 和 GND 为电压和地；
 - MR 为全局复位端；
 - P0~P3（或 D0~D3）为置计数初值端；
 - Q0~Q3 为计数输出端；
 - CPU 为加计数时钟脉冲输入端，此时 TCU 输出进位信号；

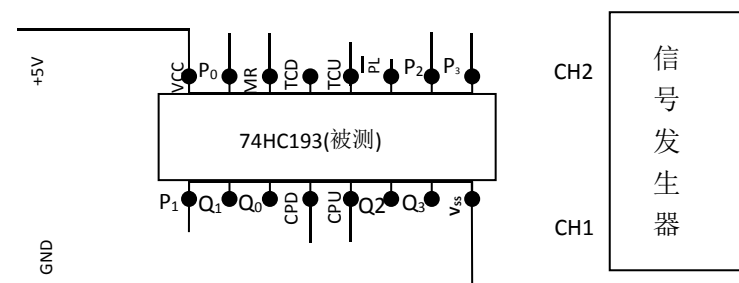
CPD 为减计数时钟脉冲输入端，此时 TCD 输出借位信号；

$\overline{\text{PL}}$ 为置初值控制端。

通过对 74HC193 逻辑功能的分析，得出主要的测试功能，如加 1 计数和减 1 计数等。确认输入测试激励的产生有两种方式，一种是采用信号源产生激励信号，测试 74HC193 的功能。另外一种是采用单片机产生测试激励信号，来进行测试。本次实验采用第一种方法，测试信号通过信号发生器。

设计测试电路，如加 1 置初值电路如图 4 所示。

- (1) VCC 和 GND 分别电压和地；
- (2) MR（或 CR）为全局复位端接地；
- (3) 因测试加计数，所以将 CPD 减计数端接 VCC 屏蔽；
- (4) 将 CPU 接 1K~100KHZ 的中频时钟脉冲。
- (5) $\overline{\text{PL}}$ 为置初值控制端接 10~100HZ 的低频信号。
- (6) 将 74HC193 各数据输入端 DA、Cb、DC、Dd 置 0000 或 1111，（1010 或 0101 也可），即置计数器初值。



2、测试输入输出信号

- (1) 用双踪示波器 ch1、ch2 组合检查信号发生器产生的输入波形。
- (2) 将输入信号 TCD、 $\overline{\text{PL}}$ 和输出信号 Q0~Q3 与逻辑分析仪探头盒接线勾相接，注意要将测试盒和芯片地共地，如表 1 所示。
- (3) 在 PC 机上运行逻辑分析仪图形采集存储程序采集波形，并打印

所测的时序图。

表 1 连线表

探头盒通道号	电路入出端
A - 8	CPU
A - 7	$\overline{\text{PL}}$
A - 6	TCU
A - 5	Q_A
A - 4	Q_B
A - 3	Q_C
A - 2	Q_D

(4) 排除电路连接错误，并分析测试芯片的功能是否正确。

五、 数据处理和分析

整理分析 74HC193 的逻辑功能图，验证其所有逻辑关系。

六、 思考题

如何用单片机或 FPGA 产生 74HC193 的测试信号，给出测试电流图和具体测试信号产生的代码。

实验十、双极型运算放大器参数的测试

运算放大器（简称运放）是一种直接耦合的高效增益放大器，在外接不同反馈网络后，可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的应用。

为了更好的使用运算放大器，必须对它的各种参数有一个较为全面地了解。运算放大器结构十分复杂，参数很多，测试方法各异。

一、实验目的：

- 1、熟悉运算放大器主要参数的测试原理。
- 2、掌握这些参数的测试方法。

二、实验原理：

- 1、输入失调电压 V_{IO} 的定义及测试原理：

输入失调电压，就是为使输出保持零电平，而须在两个输入端所加的补偿电压。本仪器测输入失调电压的电原理图如图 1 所示，利用辅助运算放大器（简称运放） N_2 产生足够的电压经 R_2 电阻反馈到被测运放 N_1 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 V_{IO} 。

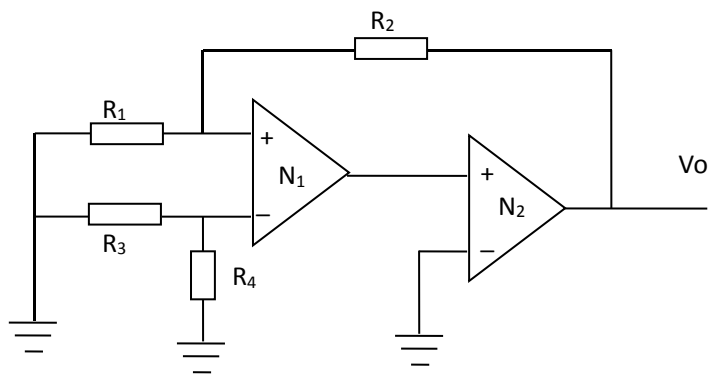


图 1

根据等效电路数学推倒的方法得到公式（1）：

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

$$V_O=1+ (R_2/R_1) V_{IO}+I_{IO} \times R_2 \quad (1)$$

$$I_{IO1} \times R_2 << (1+R_2/R_1)V_{IO1}$$

$$\dots V_O=(1+R_2/R_1)V_{IO1} \quad (2)$$

整理公式（2）得：

$$V_o = (1 + R_2 / R_1) \quad (3)$$

V_{IO1} 就是被测运放 N_1 的输入失调电压。

2. 输入失调电流 I_{IO} 的定义及测试原理。

输入失调电流就是运放两个输入端基极注入电流的偏差 即：

$I_{IO}=I_{B1}-I_{B2}$ ，测试电原理图如图 2 所示，为求差，本仪器利用辅助运放 N_s 将

被测试运放 N_1 的正输入端的注入电流 I_{B2} 换算成 V_{O2} 输出。而负载输入端的

注入电流 I_{B1} 由自身换算成 V_{O1} 输出由辅助运放 N_s 将这两个电压求差放大，

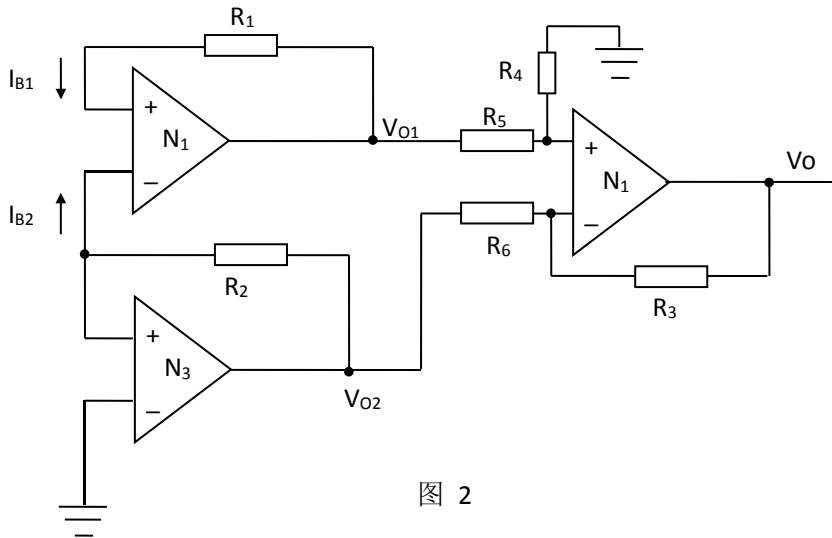


图 2

竟换算使得到输入失调电流的公式（4）

$$V_{B1} = I_{R1} \times R_1 \quad V_{B2} = I_{R2} \times R_2$$

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

$$V_0 = (V_{01} - V_{02})(R_3 / R_5)$$

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

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

$$I_{IO} = V_0 / (R_1 \times R_3 / R_5) \dots \dots \dots (4)$$

仪器用琴键变换 R_1 和 R_2 的阻值的方法，来变换测试量程。

3. 输入基极电流 I_B 的定义及测试原理：

输入基极电流 I_B ：就是运放两个输入端基极注入电流的平均值：

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

与输入失调电流 I_{ro} 的测法基本相同，不同点是辅助运放 N_2 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：

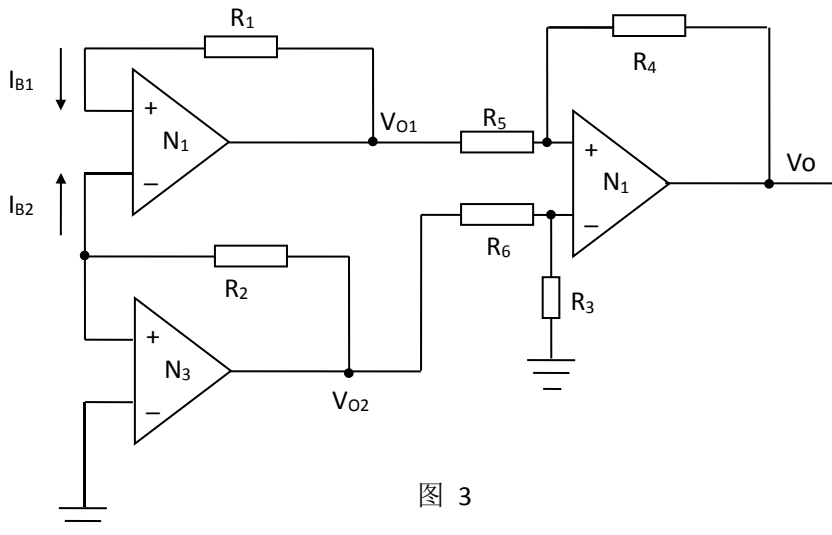


图 3

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

与公式（4）的推导方法相同得到：

$$V_0 = (V_{01} + V_{02})R3 / R5 = (I_{b1} + I_{b2})R1 \times R3 / R5$$

$$I_{IB} = (I_{b1} + I_{b2}) / 2$$

所以整理上式得：

$$I_{IB} = V_0 / (2R1 \times R3 / R5) \dots\dots\dots(5)$$

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。

4. 开环电压增益 A_{VD} 的定义及测试原理：

运放在不加反馈时，输出电压增量与输入差值电压增量之比定义为开环

电压增益 A_{VD} 即： $A_{VD} = \Delta V_0 / \Delta V_i$

分贝表示 $A_{VD}(db) = 20Lg(\Delta V_0 / \Delta V_i)$

如图 4、图 5 所示测试方框图与测试原理图：

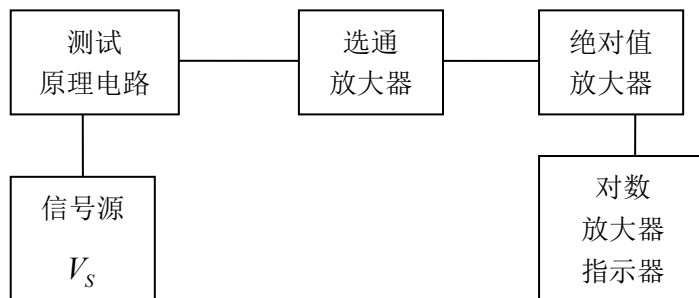


图 4

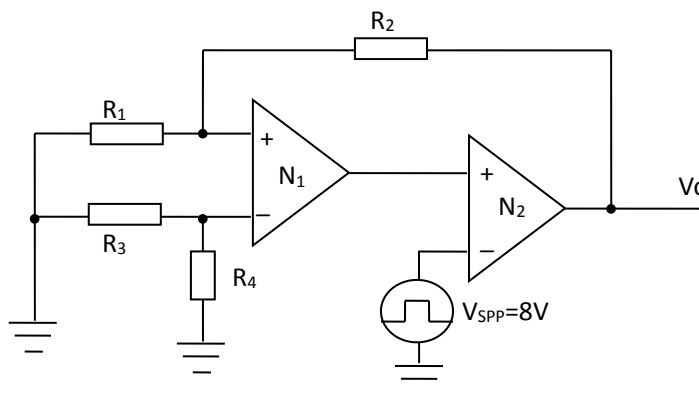


图 5

根据等效电路数学推倒，可得到公式（1）。而当辅助运放 **N2** 负输入端加入信号 V_S 时，环路的输入电压： V_0 就为两部分电压的迭加：

$$V_{01} = (1 + R_2 / R_1)V_{r0} + I_{r0} \times R_2$$

$$V_{02} = V_S(-A_2) + V_{02} \times (R_1 / (R_1 + R_2))(-A_1)(A_2)$$

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

$$\therefore V_{02} = -(V_S / A_1)(1 + R_2 / R_1)$$

$$\text{这时：} V_O = (V_S / A_1)(1 + R_2 / R_1) + (1 + R_2 / R_1)V_{IO} + I_{IO} \times R_2$$

当 V 为一变化量时测得输出讯号的变量得到被测放大器 **N1** 的开环电压增益

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

用分贝表示：

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

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，经蒸馏滤波后，送对数放大器就可算出分贝值。

6. 共模抑制比 K_{CMR} 的测试方法与开环电压增益 A_{VD} 的测法大致相同。因为共模抑制比为差模增益 A_{VD} 与共模电压增益 A_{VC} 之比即：

$$K_{CMR} = A_{VD} / A_{VC}$$

用分贝表示

$$K_{CMR}(dB) = 20Lg(A_{VD} / A_{VC})$$

这样只要把测试电路稍加变化一下如图 6 所示：

根据等效电路的数学推倒，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

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

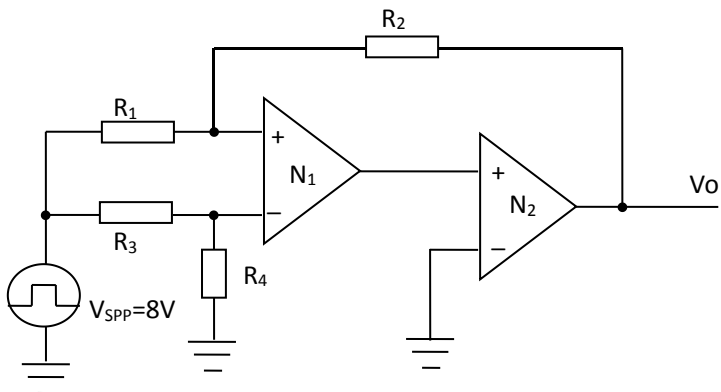


图 6

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，放大器的功耗总电量：

$$P_w = I_{CC}(V_{CC} + V_{ee})$$

本仪器测试量为静态功耗电流 I_{PC} 。测量电原理电路见图 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。

$$I_{CC} - I_{ee} - I_0 + I_{D1} + I_{D2} = 0$$

$$I_{B1} = I_{B2} = 0 \quad I_0 = 0$$

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

只要 I_{CC} 或 I_{ee} 其中一个便定出静态功耗：

$$P_w = I_{PC}(V_{CC} + V_{ee}) \dots\dots\dots(9)$$

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

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

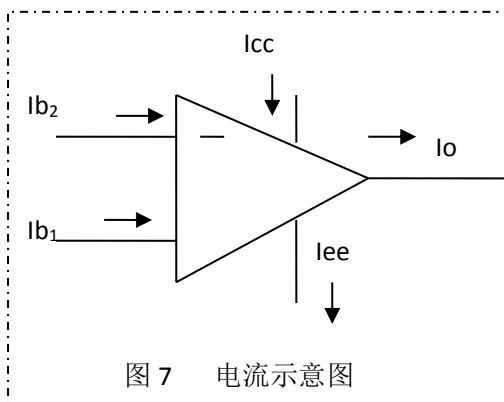


图 7 电流示意图

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 $\pm V_{OP}$

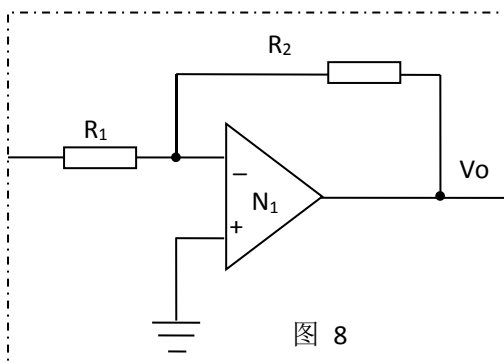


图 8

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

测试原理电路如图 9 所示:

当测 $+V_{OP}$ 时, 继电器 k1 接通。被测运放 N1 输出为 $+V_{OP}$ 通过电阻分压送运算放大器, 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 $-V_{OP}$ 。

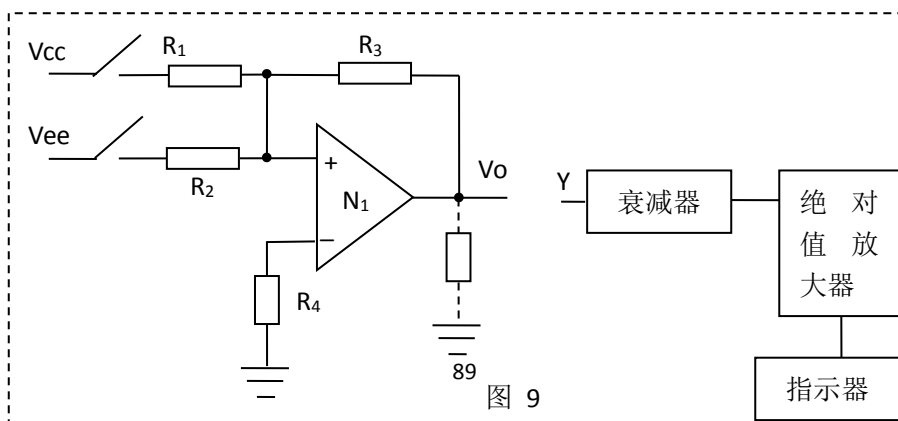


图 9

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：

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。

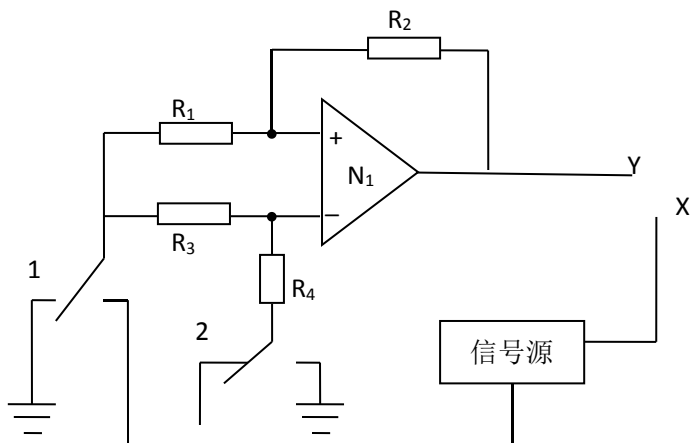


图 10

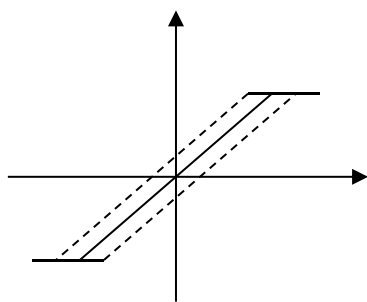


图 11-1 差模特性波形

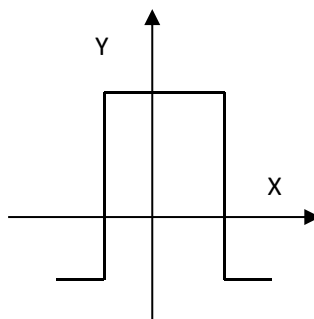


图 11-2 共模特性波形

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。如图 12 所示。可见转换速率与运放的频响，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，这里的电原理如图 13 所示：

$$SR = |dV_o / dt|_{\max}$$

被测运放 N1 接成电压比较器形式，通过电压正反馈，使其振荡输出方波波形，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 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，还受到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 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。

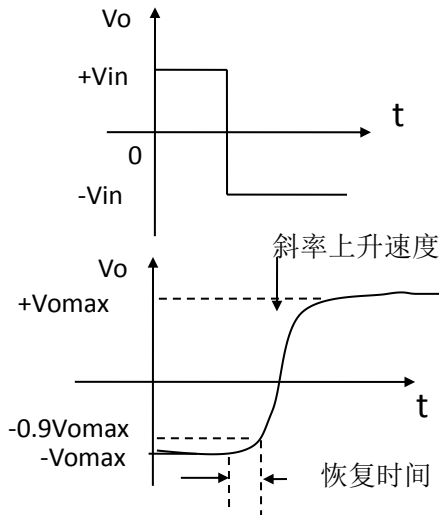


图 12

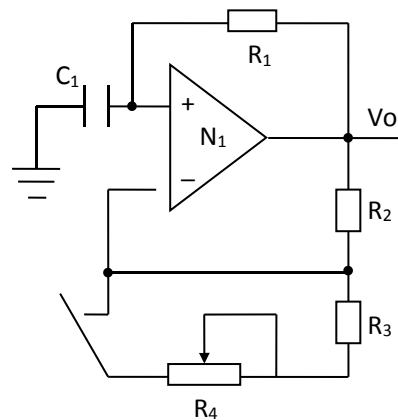


图 13

三、实验内容

测试运算放大器各个参数，并画出其传输特性和转换速率的曲线

四、实验步骤

开机前准备：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。

1. 打开一起电源开关，电源指示灯亮，按动复位琴键，电表有被测期间电源电压知识。 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），按键释放电表指示 V_{CC} 、 V_{ee} ，并调好被测器件的电源电压。这时需要预热 15 分钟。
2. 按下单项琴键“5” I_{rB} 项，同时按下其 0.1uA 量程琴键，调节面板“ I_{rB} 调零”旋钮，使电表指示为零。（0.1uA 档校好后，其他几档也随即为零）。
3. 按下单项琴键“8”键， A_{VD} 项，同时按下“ A_{VD} 校准琴键和 A_{VD} 的档位键”（S8 如 120dB 档键），调节“ A_{VD} 满度”旋钮使电表知识满度。再按以下“ A_{VD} 校准”琴键，使其弹起复原。
4. 这时可插上测试盒和被测试器件。这时可根据所测旗舰，选择测试盒，单运放测试盒、多运放测试盒、（如测不同测试盒上标出器件的出脚，可进行改变测试盒插座到被测器件的连线）：按下参数所需范围的各档琴键并予置好被测器件的电源电压。（ $\pm V_{0P}$ 加 R_L 是在 Y 插孔与地插孔间）。按入面板测量开关， V_0 灯闪亮，这时选择“自动”或“手动”测试，选择“手动”测试时，S10 各琴键为单一项目。选择“自动”测量时，S10 各琴键群部弹起复原，按下“自动”琴键，选择好测试项目，启动测试盒上微动开关，将进行“自动”换项测试，时间长短由电位器 R7 决定。这时未选项将被自动跳过。如果进行多运放测试，只能选用自动测试项。将琴键 S21 “单、多”按入，琴键 S15 根据不同组件任选，“1”必须选测，“1”测多运放组件时要选用。 注意：“自动”测试项时，单项测试各按键（S10）均应释放。
5. 当全部予置好和插上被测器件，按下面板测量开关时，指示灯“0”灯

亮。指示灯“0”闪亮，说明器件为好并插好了，否则说明没有插好或是损害，不能进行测试。

6. 当按下“反换”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、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。

7. 对不同管脚组件的测试方法是：按其要测组件和出厂规定的补偿电容和偏置电阻在测试盒内接好方可。测试盒插头的线路见总框图中的测试盒部分。

五、注意事项：

1. 单项测试琴键 S10 均应弹起。
2. 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。
3. 接好测试盒，选择测试方法，“自动”或“手动”、“自动”测试，如设置测试项时，知识灯亮，请按下一下复位键。
4. 测试盒：单运放测试按下 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，接成您所需要的形式。

六、实验数据处理

根据实验内容和要求，将有关输入输出波形描绘下来，详细记录各个测

试数据，并作相应的计算。

七、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. 运放在小信号下工作和大信号下工作，状态有何不同？

实验十一、半导体材料或器件参数精密测量

一、 实验目的：

- 1、学会使用精密半导体参数测试仪 Agilent 4155C；
- 2、熟练掌握晶体管反向特性的测试方法；

二、 实验内容：

- 1、学习使用精密半导体参数测试仪 Agilent 4155C；
- 2、测量晶体管反向击穿电压 BV_{EBO} 、 BV_{CBO} 、 BV_{CEO} 。
- 3、测量晶体管饱和漏电流 I_{EBO} 、 I_{CBO} 、 I_{CEO} 。
- 4、测量晶体管输入输出特性。
- 5、对比特性图示仪 XJ4810 和 Agilent 4155C 测得的实验数据，分析 XJ4810A 的测量误差。

三、 Agilent 4155C 技术指标

- 1、SMU 数量：4-6 个
- 2、最大电流 100mA,可扩展至 1A；
- 3、电流分辨率：10fA
- 4、电压分辨率：0.2uV

四、 仪器基本使用简介：

- 1、将 Agilent 16442 测试台打开，将晶体管插入夹具，测试中每个用到的管脚与一个 SMU（信道）相连，需要与“地”相连的管脚，与测试盒上的“地”连接。
- 2、接好后将测试盒盖上，如在测试过程中不盖上盒子，当测试电压超过 40V 时，仪器将自动进入保护状态。（因为超过了人体能承受的电压范围）。
- 3、打开 Agilent 4155C 电源，仪器内的软件自行启动，进入测试变量设置界面。
- 6、首先按下仪器面板上 page control 区的 Chan 按钮，对用到的通道 SMU 进行设置，其中有五项参数：

- 1) Unit:显示所有 SMU，并可以对 SMU 进行添加或删除；
 - 2) Vname:对 SMU 接入点的电压进行名称定义；
 - 3) Iname: 对流过该 SMU 的电流名称定义；
 - 4) Mode: 对该点测定的电压或电流模式进行指定；
 - 5) FCTN: 函数定义，对该点的电压或电流是常量或是变量，或变量表达式进行指定。如电源或地是常量，扫描电压为变量。
- 7、对通道定义好后，按下 page control 区的 Meas 按钮，对用到的进行在前面 Chan 中设定的变量进行定义，其中有七项参数：
- 1) VARIABLE: 选择要定义的是第几个变量；
 - 2) UNIT: 指定变量所用到的 SMU；
 - 3) LIN/LOG: 指定所用到的变量是线性还是指数变化；
 - 4) START: 指定变量变化的起始点；
 - 5) STOP: 指定变量变化的终止点；
 - 6) STEP: 指定从起始点到终止点变量变化的步长，注意此值的设定要使测试点不大于 40 个。
 - 7) No of STEP: 根据起始点和终止点以及步长，该值自动产生。
 - 8) COMPLIANCE: 电流保护值设定，超过此值，电路进入保护状态。
- 8、对变量定义好后，就可以对图形显示在进行定义，此时按下 page control 区的 Display 按钮，对图形显示中的 X、Y 轴的变量的显示进行定义。屏幕显示为一个表格，分别对 X、Y 轴的变量的四个参数进行定义：
- 1) NAME: 选择要显示的变量名；
 - 2) SCALE: 选择图形显示的方式是线性还是其他方式。
 - 3) MIN: 变量在图形中显示的起始点，即最小值。注意，可以不从零点开始。
 - 4) MAX: 变量在图形中显示的终止点，即最大值。注意，它和最小值一起来影响显示精度。
- 9、对这些常用的选项定义完后，一般我们就可以开始，进行测试了，测试分为单次或

多次重复测试，如单次，按下面板上 MEASUREMENT 区的 single 按钮，如多次重复，按下 repeat 即可。

- 10、这样图形就会在屏幕上显示出来，其他功能在此不再详细说明，如有用到可以进行自行查阅一起使用手册。

五、实验步骤:

下面以测试 3DG6B 为例，来讲述个参数的设定：首先我们根据手册或前面用图示仪测定的 V_{EB0} 的大概值，对其进行设定。

- (1) 首先将管子插入测试盒，将 E 脚与 SMU3 相连，B 脚与 SMU2 相连，并接地。
- (2) Chan 参数设定

Measurement mode: sweep;

Channels:

unit	Vname	Iname	mode	FCTN
SMU1				
SMU2	GND	I	V	CONST
SMU3	VEB	IEB	V	VAR1
SMU4				

- (3) Meas:

VARIABLE	VAR1
UNIT	SMU3: MP
NAME	VEB
LIN/LOG	LINER
START	0V
STOP	8V
STEP	50mV
No of STEP	(自动生成)

COMPLIANCE	1mA (*一定要设置该值)
------------	-----------------------

(4) Display:

	Xaxis	Yaxis
NAME	VEB	IEB
SCALE	LINEAR	LINEAR
MIN	0V	0A
MAX	10V	1mA

(5) 按下 single 键，即可看到一个电流图。

六、 注意事项:

- (1) 测试过程中一定要关闭测试盒，以免对人身造成伤害。
- (2) 本仪器为大型贵重仪器，测试过程中一定要注意保护和爱护仪器。

七、 思考题:

如何用本仪器对集成电路电路芯片上的配片的 I-V 参数进行测量？

实验十二、模数转换芯片（ADC）性能测试

模拟量转换成数字量的过程被称为模数转换，简称 A/D(Analog to Digital)转换；完成模数转换的电路被称为 A/D 转换器，简称 ADC(Analog to Digital Converter)。数字量转换成模拟量的过程称为数模转换，简称 D/A(Digital to Analog)转换；完成数模转换的电路称为 D/A 转换器，简称 DAC(Digital to Analog Converter)。模拟信号由传感器转换为电信号，经放大送入 AD 转换器转换为数字量，由数字电路进行处理，再由 DA 转换器还原为模拟量，去驱动执行部件。为了保证数据处理结果的准确性，AD 转换器和 DA 转换器必须有足够的转换精度。同时，为了适应快速过程的控制和检测的需要，AD 转换器和 DA 转换器还必须要有足够快的转换速度。因此，转换精度和转换速度乃是衡量 AD 转换器和 DA 转换器性能优劣的主要标志。

一、实验目的：

- 1、熟悉 AD 转换器的主要性能参数的测试意义。
- 2、掌握这些参数的计算方法。
- 3、熟悉混合信号示波器的操作。

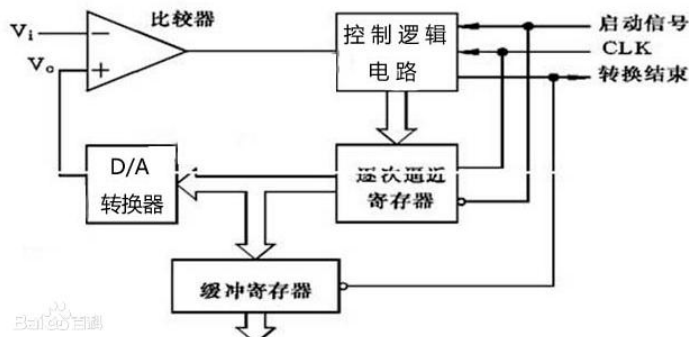
二、实验原理：

本次实验测试对象为常见的 AD 转换器 0809，该转换器为逐次逼近型，下面首先介绍逐次逼近型 ADC 的工作原理，然后介绍 AD0809 的逻辑电路结构，在此基础上给出其主要性能参数及其测试意义。

1、逐次逼近式 A/D 的工作原理

逐次逼近式 A/D 是比较常见的一种 A/D 转换电路，转换的时间为微秒级。

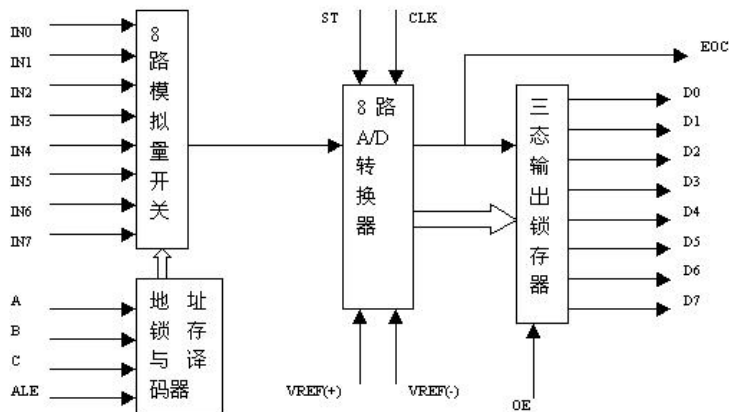
采用逐次逼近法的 A/D 转换器是由一个比较器、D/A 转换器、缓冲寄存器及控制逻辑电路组成，如下图所示。



基本原理是从高位到低位逐位试探比较，好像用天平称物体，从重到轻逐级增减砝码进行试探。逐次逼近法的转换过程是：初始化时将逐次逼近寄存器各位清零；转换开始时，先将逐次逼近寄存器最高位置 1，送入 D/A 转换器，经 D/A 转换后生成的模拟量送入比较器，称为 V_o ，与送入比较器的待转换的模拟量 V_i 进行比较，若 $V_o < V_i$ ，该位 1 被保留，否则被清除。然后再置逐次逼近寄存器次高位为 1，将寄存器中的新数字量送 D/A 转换器，输出的 V_o 再与 V_i 比较，若 $V_o < V_i$ ，该位 1 被保留，否则被清除。重复此过程，直至逼近寄存器最低位。转换结束后，将逐次逼近寄存器中的数字量送入缓冲寄存器，得到数字量的输出。逐次逼近的操作过程是在一个控制电路的控制下进行的。

2、AD0809 的电路逻辑结构

ADC0809 是 8 位逐次逼近型 A/D 转换器。它由一个 8 路模拟开关、一个地址锁存译码器、一个 A/D 转换器和一个三态输出锁存器组成（见图 1）。多路开关可选通 8 个模拟通道，允许 8 路模拟量分时输入，共用 A/D 转换器进行转换。三态输出锁器用于锁存



图（1）AD0809内部结构图

A/D 转换完的数字量，当 OE 端为高电平时，才可以从三态输出锁存器取走转换完的数据。

3、AD0809 的工作原理

AD0809 的芯片管脚分配如下：

1	IN3	IN2	28
2	IN4	IN1	27
3	IN5	IN0	26
4	IN6	A	25
5	IN7	B	24
6	ST	C	23
7	EOC	ALE	22
8	D3	D7	21
9	OE	D6	20
10	CLK	D5	19
11	VCC	D4	18
12	VREF+	D0	17
13	GND	VREF-	16
14			15

(1) IN0—IN7：8 条模拟量输入通道 ADC0809 对输入模拟量要求：信号单极性，电压范围是 0—5V，若信号太小，必须进行放大；输入的模拟量在转换过程中应该保持不变，如若模拟量变化太快，则需在输入前增加采样保持电路。

(2) 地址输入和控制线 4 条：ALE 为地址锁存允许输入线，高电平有效。当 ALE 线为高电平时，地址锁存与译码器将 A，B，C 三条地址线的地址信号进行锁存，经译码后被选中的通道的模拟量进转换器进行转换。A，B 和 C 为地址输入线，用于选通 IN0—IN7 上的一路模拟量输数字量输出。通道选择表如下表所示。

(3) 数字量输出及控制线：11 条

C	B	A	选择的通道
0	0	0	IN0
0	0	1	IN1
0	1	0	IN2
0	1	1	IN3
1	0	0	IN4
1	0	1	IN5
1	1	0	IN6
1	1	1	IN7

ST 为转换启动信号。当 ST 上跳沿时，所有内部寄存器清零；下跳沿时，开始进行 A/D

转换；在转换期间，ST 应保持低电平。EOC 为转换结束信号。当 EOC 为高电平时，表明转换结束；否则，表明正在进行 A/D 转换。OE 为输出允许信号，用于控制三条输出锁存器向单片机输出转换得到的数据。OE=1，输出转换得到的数据；OE=0，输出数据线呈高阻状态。D7—D0 为数字量输出线。

CLK 为时钟输入信号线。因 ADC0809 的内部没有时钟电路，所需时钟信号必须由外界提供，通常使用频率为 500KHZ，VREF（+），VREF（-）为参考电压输入。

4、A/D 转换器的主要技术参数

（1）转换精度

分辨率：A/D 转换器的分辨率以输出二进制（或十进制）数的位数来表示。它说明 A/D 转换器对输入信号的分辨能力。从理论上讲，n 位输出的 A/D 转换器能区分 2 个不同等级的输入模拟电压，能区分输入电压的最小值为满量程输入的 $1/2^n$ 。在最大输入电压一定时，输出位数愈多，分辨率愈高。例如 A/D 转换器输出为 8 位二进制数，输入信号最大值为 5V，那么这个转换器应能区分出输入信号的最小电压为 9.53mV。

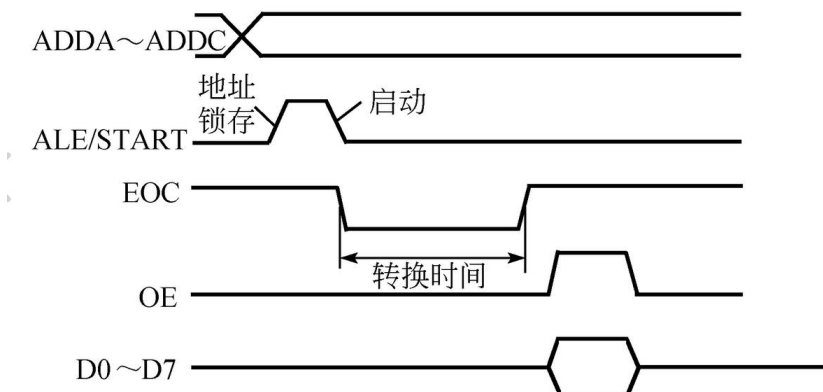
转换误差：转换误差通常是以输出误差的最大值形式给出。它表示 A/D 转换器实际输出的数字量和理论上的输出数字量之间的差别。常用最低有效位的倍数表示。例如给出相对误差 $\leq \pm \text{LSB}/2$ ，这就表明实际输出的数字量和理论上应得到的输出数字量之间的误差小于最低位的半个字。

（2）转换时间

转换时间是指 A/D 转换器从转换控制信号到来开始，到输出端得到稳定的数字信号所经过的时间。A/D 转换器的转换时间与转换电路的类型有关。不同类型的转换器转换速度相差甚远。其中并行比较 A/D 转换器的转换速度最高，8 位二进制输出的单片集成 A/D 转换器转换时间可达到 50ns 以内，逐次比较型 A/D 转换器次之，它们多数转换时间在 10~50s 以内，间接 A/D 转换器的速度最慢，如双积分 A/D 转换器的转换时间大都在几十毫秒至几百毫秒之间。在实际应用中，应从系统数据总的位数、精度要求、输入模拟信号的范围以及输入信号极性等方面综合考虑 A/D 转换器的选用。

三、实验内容

AD0809 的工作时序如图所示，按时序波形施加测试信号，记录并计算各个测试参数，AD0809 实际波形数据，并对其性能进行评价。



四、实验步骤

AD0809 的工作时序如图所示，按时序波形施加测试信号，记录并计算各个测试参数，AD0809 实际波形数据，并对其性能进行评价。

五、测试数据处理

计算 AD0809 主要性能参数，分析其性能。

六、思考题

我们在做一个单片机系统时，常常会遇到这样那样的数据采集，在这些被采集的数据中，大部分可以通过我们的 I/O 口扩展接口电路直接得到，由于 51 单片机大部分不带 AD 转换器，所以模拟量的采集就必须靠 A/D 或 V/F 实现。那么如何设计 AD0809 与 51 单片机的接口及其程序设计？

实验十三、晶体管 $C_c \cdot r_{bb}'$ 乘积的测量

$C_c \cdot r_{bb}'$ 是一个时间参数，其数值的大小表明器件的反应速度及最高振荡频率。此参数在广播电视、各种高频电路的试验和应用领域越来越被人们所重视。

一、实验目的：

- 1、了解高频小功率晶体管 $C_c \cdot r_{bb}'$ 的测量原理；
- 2、掌握测量高频小功率晶体管 $C_c \cdot r_{bb}'$ 的测试方法。

二、实验内容：

- 1、依照“晶体管手册”中所规定的测试条件下测试 $C_c \cdot r_{bb}'$ 的值。
- 2、在不同注入下 (I_e) 测量 $C_c \cdot r_{bb}'$ 值，绘制 $C_c \cdot r_{bb}'$ —— I_e 曲线，并对曲线的变化规律进行分析。

三、实验原理：

$C_c \cdot r_{bb}'$ 的测量原理是根据测量该器件的电压反馈率 h_{rb}

$$\because |h_{rb}| = \left| \frac{V_e}{V_c} \right|$$

$$\frac{V_e}{V_c} = \frac{r_{bb}'}{1 - j\omega C_c \cdot r_{bb}'}$$

$$\therefore \left| \frac{V_e}{V_c} \right| = \omega C_c \cdot r_{bb}'$$

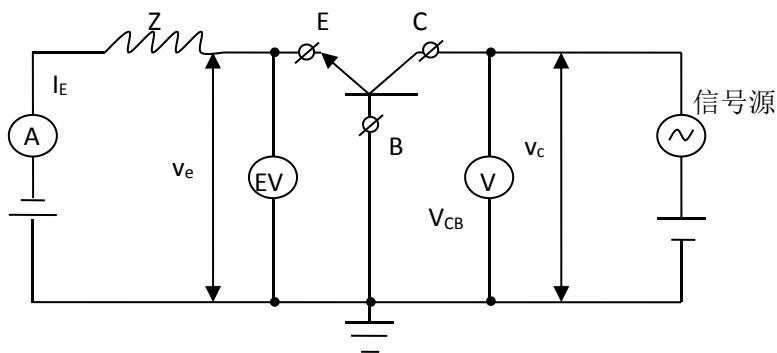
$$C_c \cdot r_{bb}' = \frac{1}{\omega} \left| \frac{V_e}{V_c} \right|$$

测量要满足以下两个条件：

$$1) |Z| \gg h_{ib}$$

$$2) \omega \ll \frac{1}{C_c \cdot r_{bb'}}$$

测试电路图



四、实验步骤:

1、使用前的准备

接通电源，电源指示灯亮，仪器须预热 30 分钟，同时为了正确使用仪器对晶体管进行准确的测量，必须熟悉以下各旋钮，开关等的功能：

(1) “量程选择”：由琴键控制，有 10ps、50ps、100ps、500ps、校准共五档。测量校准时一定要预先按下“校准”档，其他任意一档都将由于输送给测量放大器的信号太大，使测量放大器处于不正常状态。测量时量程选择要合理，测量的数值一定要落在有效的测量范围内，否则测量误差不能保证。

(2) “极性选择”：此开关控制偏置电压源、偏置电流源的极性，以适应 NPN 和 PNP 极性的需要。使用时要根据被测管的极性预先设置好。

(3) “电压调解”：黑色套钮用来控制被测管的偏置电压量程，共分三档：0~3V，0~10V，0~30V。红色旋钮用来调节其具体输出电压的大小。

(4) “电流调节”与“电压调解”作用相同。

(5) “电表指示”被测晶体管的偏置工作电压和工作电流指示共用一只电表，通过此开关选择“V A”指示。一般在使用时调好偏置电压后，即可不再继

续指示，而放在电流“A”位置使用。

(6)“电平调节”是控制测量放大器增益的，他与短路校准器配合，完成测量校准。测量过程中不得在旋转此钮。

(7)测量盒插孔，仪器面板上的五个插孔是供测试盒的插入孔，一旦插入测试盒便固定在仪器面板上，且接通了偏置回路，和信号回路。

(8)短路校准器：所有校准器都是C和E短接，不同的测试盒使用不同的校准器，“ECB”和“BEC”排列的S型测试盒公用一种校准器。

(9)调零电位器：此电位器在仪器的后盖板上，不需要经常调节。但仪器初次通电使用，由于运输等外界环境的影响，零点可能要变化，此时需要进行调节。方法是“量程选择”置“校准”档，在测试盒上插上短路校准器，“电平调节”旋钮不动，调节调零电位器，是参数指示为0.00。

2、测量校准：

在仪器面板上的插孔，插入相应的测试盒。“极性选择”开关置“断”的位置（否则校准时将偏置电压源短路）“量程选择”置“校准”档，在测试盒上插入校准器，通过调节“电平调节”旋钮，是参数表指示为100.0（允许误差 ± 0.3 ）。这样便完成了测量校准，拿下校准器。

3、测量

电表指示置“V”根据被测管的偏置电压要求将电压调好。此后将“电表”指示置“A”，“电流调节”的黑色套钮调到要求的档位，将被测管插入测试盒“极性选择”置到与被测管相同的极性，调整“电流调节”红色旋钮，将偏置电流调到所要求的数值，将“量程选择”置在相应的PS档，由参数表得到被测管的 $C_c \cdot r_{bb'}$ 数值，测量完毕后，将极性选择置到“断”拔下管子。

五、注意事项：

(1) 测试过程中所用测试条件，按“半导体器件手册”中所规定的

I_{CM} 、 BV_{CBO} 、 P_{CM} ，使 $I_C < I_{CM}$, $V_C < V_{CBO}$, $P < P_{CM}$ 。

(2) 管脚、极性开关一定要放正确。

六、实验报告内容

(1) 写出某被测管的 $C_c \cdot r_{bb}'$ 参数的测试结果。

(2) 将所测某管的 $C_c \cdot r_{bb}'$ 随 I_e 变化的原始数据整理列成表格，
绘制成曲线，并对曲线加以分析。

七、思考题：

1、测量晶体管参数 $C_c \cdot r_{bb}'$ 的作用是什么？

实验十四 双极集成电路工艺和版图电路网 表提取

双极型集成电路主要以硅材料为衬底，在平面工艺基础上采用埋层工艺和隔离技术，以双极型晶体管为基础元件。按功能可分为数字集成电路和模拟集成电路两类。在数字集成电路的发展过程中，曾出现了多种不同类型的电路形式，典型的双极型数字集成电路主要有晶体管-晶体管逻辑电路(TTL)，发射极耦合逻辑电路(ECL)，集成注入逻辑电路(I²L)。TTL 电路形式发展较早，工艺比较成熟。ECL 电路速度快，但功耗大。I²L 电路速度较慢，但集成密度高。

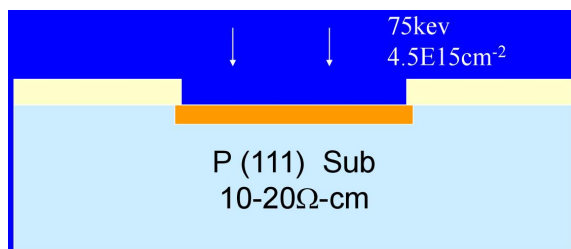
一、实验目的：

1. 重点掌握数码显微镜的使用方法。
2. 掌握双极型集成运放电路芯片的制造工艺。
3. 了解光刻版图与电路图剖图的对应关系。

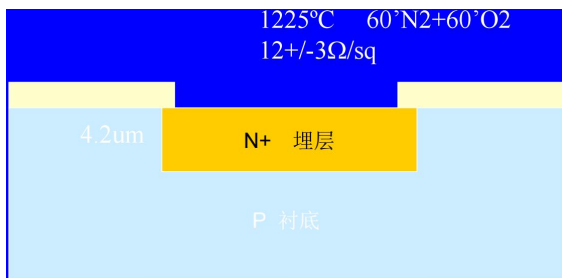
二、实验原理：

PN 结隔离双极工艺流程（2 μ m 18V）

（1）N+埋层光刻和 Sb+注入，



（2）N+埋层扩散



(3) P 埋层光刻和 B⁺离子注入

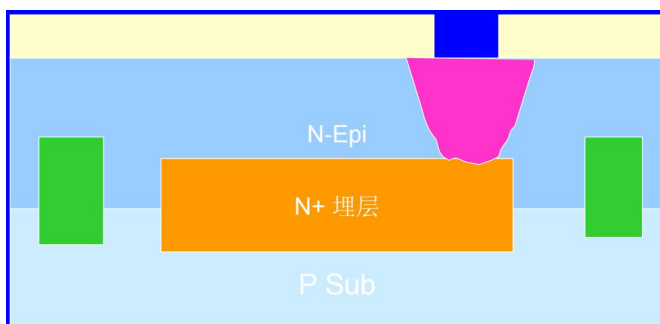
(4) 外延

36V $13.5 \pm 0.8 \mu\text{m}$ $4.3 \pm 0.43 \text{ cm}$

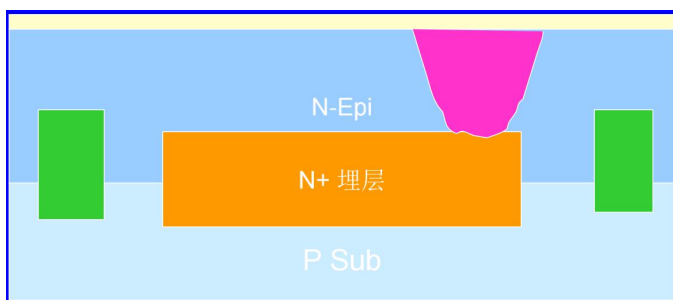
18V $8.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$ $1.7 \pm 0.2 \text{ cm}$



(5) 外延后氧化—DN 光刻—磷予淀积($5.4 \pm 0.5 \text{ /sq}$)—磷扩散

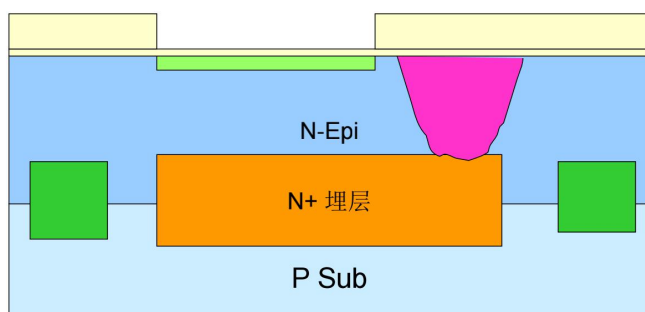


(6) 去除全部氧化层，重新生长 PAD 氧化层

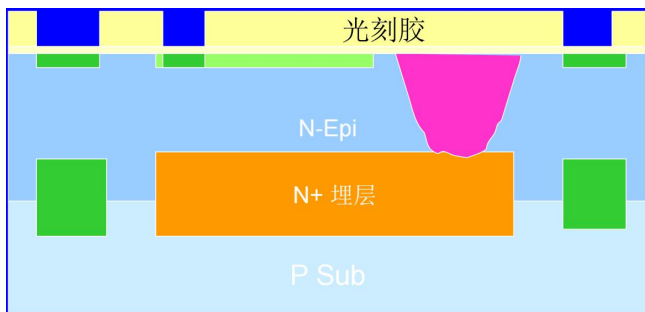


(7) 基区(PBAS)光刻和 B+注入

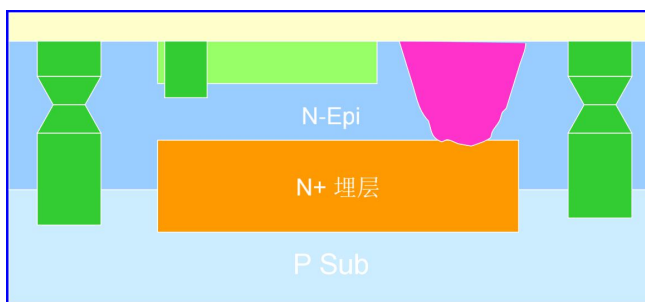
80kev 4.1E14cm-2



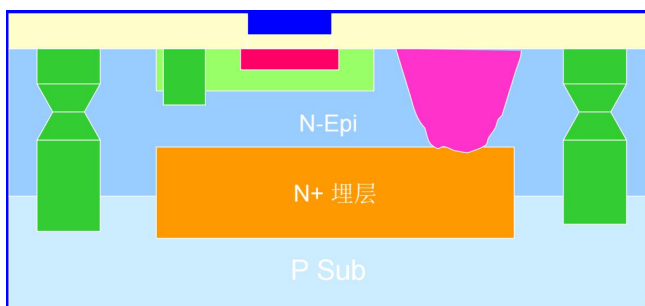
(8) 外基区(XBAS) (隔离) 光刻 B+注入 80kev4.1E14cm



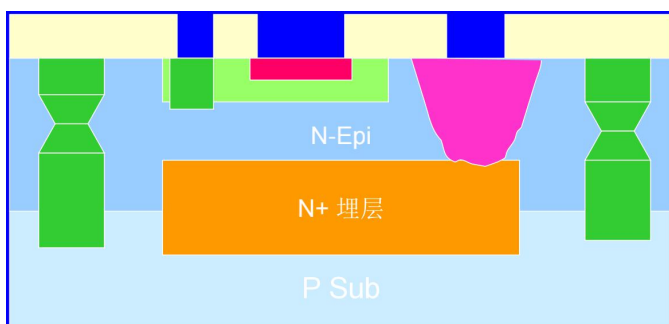
(9) 基区 (隔离) 推进 $R_s=223 \pm 8$ /sq $X_j=1.5\mu m$



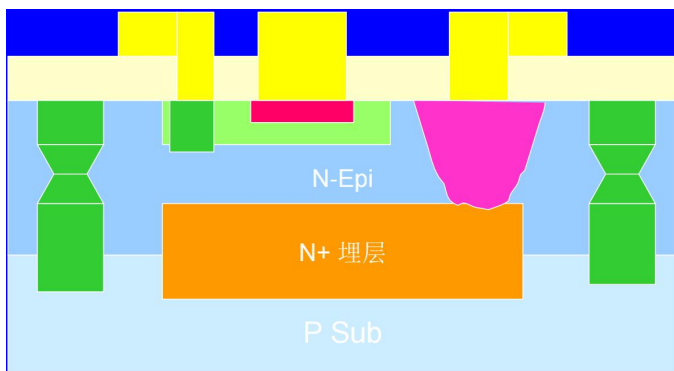
(10) 发射区光刻—磷注入—扩散 $R_s=7.9\pm0.8/\text{sq}$ $X_j=1.0\mu\text{m}$



(11) 接触孔光刻



(12) 金属连线



(13) 压焊点

三、实验内容：

- 1、分析所测芯片的制作工艺流程；
- 2、从版图提取出基本晶体管单元。

3、给出对应的版图和器件剖面图，并根据所测芯片的工艺分层照片，完成芯片的电路图提取，分析芯片的功能，并给出芯片管脚图，完成版图分析和教材上的思考题。

四、实验步骤

- 1、将金相显微镜电源打开，同时调整好其显示效果。
- 2、将光刻后的晶圆逐片放到显微镜下观察，并拍摄相应芯片的照片保存。
- 3、根据拍摄的芯片照片将芯片的光刻顺序确定下来，并拍好。
- 4、根据光刻过程，分析芯片上采用的具体双极集成电路工艺；
- 5、分析芯片上电路和晶体管尺寸。

五、思考题

- 1、分析芯片的电路功能。

附录

第一部分 晶闸管准备知识

晶闸管（Thyristor）是一种开关元件，能在高电压、大电流条件下工作，并且其工作过程可以控制、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，是典型的小电流控制大电流的设备。

1. 晶闸管的电学符号和器件结构

如图 1-1，它是由一个 P-N-P-N 四层 (4 layers) 半导体构成的，中间形成了三个 PN 结。

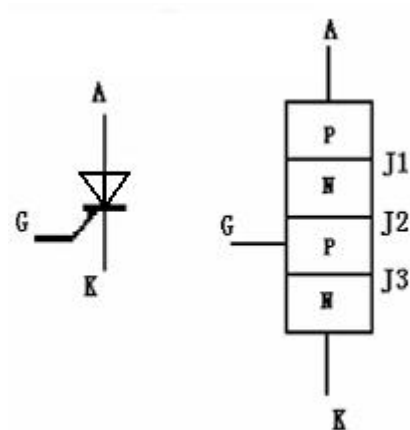


图 1-1 晶闸管符号和器件结构

2. 工作原理

晶闸管在工作过程中，它的阳极（A）和阴极（K）与电源和负载连接，组成晶闸管的主电路，晶闸管的门极 G 和阴极 K 与控制晶闸管的装置连接，组成晶闸管的控制电路。晶闸管为半控型电力电子器件，它的工作条件如下：

- 1) 晶闸管承受反向阳极电压时，不管门极承受何种电压，晶闸管都处于反向阻断状态。
- 2) 晶闸管承受正向阳极电压时，仅在门极承受正向电压的情况下晶闸管

才导通。这时晶闸管处于正向导通状态，这就是晶闸管的闸流特性，即可控特性。

3) 晶闸管在导通情况下，只要有一定的正向阳极电压，不论门极电压如何，晶闸管保持导通，即晶闸管导通后，门极失去作用。门极只起触发作用。

4) 晶闸管在导通情况下，当主回路电压（或电流）减小到接近于零时，晶闸管关断。

3. 工作过程

晶闸管是四层三端器件，它有 J1、J2、J3 三个 PN 结，可以把它中间的 NP 分成两部分，构成一个 PNP 型三极管和一个 NPN 型三极管的复合管，结构如图 1-2。

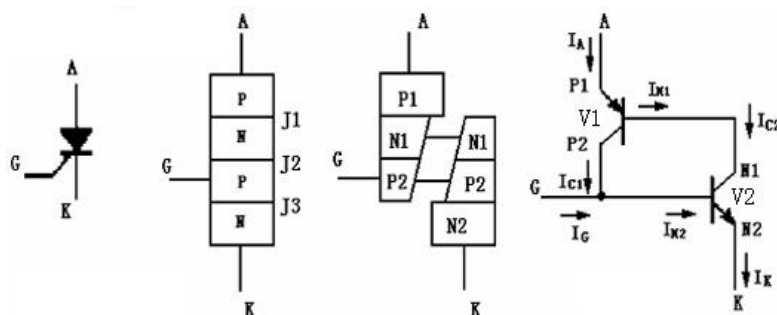


图 1-2 晶闸管等效电路

当晶闸管承受正向阳极电压时，为使晶闸管导通，必须使承受反向电压的 PN 结 J2 失去阻挡作用。图 1-2 中每个晶体管的集电极电流同时就是另一个晶体管的基极电流。因此，两个互相复合的晶体管电路，当有足够的门极电流 I_g 流入时，就会形成强烈的正反馈，造成两晶体管饱和导通，晶体管饱和导通。

设 PNP 管和 NPN 管的集电极电流相应为 I_{c1} 和 I_{c2} ；发射极电流相应为 I_a 和 I_k ；电流放大系数相应为 $a_1 = I_{c1}/I_a$ 和 $a_2 = I_{c2}/I_k$ ，设流过 J2 结的反相漏电电流为 I_{c0} ，

晶闸管的阳极电流等于两管的集电极电流和漏电流的总和：

$$I_a = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \text{ 或 } I_a = a_1 I_a + a_2 I_k + I_{c0}$$

若门极电流为 I_g ，则晶闸管阴极电流为 $I_k = I_a + I_g$

从而可以得出晶闸管阳极电流为：

$$I = (I_{c0} + I_g a_2) / (1 - (a_1 + a_2)) \quad (1-1)$$

硅 PNP 管和硅 NPN 管相应的电流放大系数 a_1 和 a_2 随其发射极电流的改变而急剧变化。

当晶闸管承受正向阳极电压，而门极未受电压的情况下，式（1—1）中， $I_g = 0$ ， $(a_1 + a_2)$ 很小，故晶闸管的阳极电流 $I_a \approx I_{c0}$ 晶闸管处于正向阻断状态。当晶闸管在正向阳极电压下，从门极 G 流入电流 I_g ，由于足够大的 I_g 流经 NPN 管的发射结，从而提高其电流放大系数 a_2 ，产生足够大的极电极电流 I_{c2} 流过 PNP 管的发射结，并提高了 PNP 管的电流放大系数 a_1 ，产生更大的极电极电流 I_{c1} 流经 NPN 管的发射结。这样强烈的正反馈过程迅速进行。从图 3，当 a_1 和 a_2 随发射极电流增加而 $(a_1 + a_2) \approx 1$ 时，式（1—1）中的分母 $1 - (a_1 + a_2) \approx 0$ ，因此提高了晶闸管的阳极电流 I_a 。这时，流过晶闸管的电流完全由主回路的电压和回路电阻决定。晶闸管已处于正向导通状态。

式（1—1）中，在晶闸管导通后， $1 - (a_1 + a_2) \approx 0$ ，即使此时门极电流 $I_g = 0$ ，晶闸管仍能保持原来的阳极电流 I_a 而继续导通。晶闸管在导通后，门极已失去作用。

在晶闸管导通后，如果不断的减小电源电压或增大回路电阻，使阳极电流 I_a 减小到维持电流 I_H 以下时，由于 a_1 和 a_2 迅速下降，当 $1 - (a_1 + a_2) \approx 0$ 时，晶闸管恢复阻断状态。

4. 晶闸管特性

晶闸管的阳极电压与阳极电流的关系，称为晶闸管的伏安特性，如图 1-3 所示。

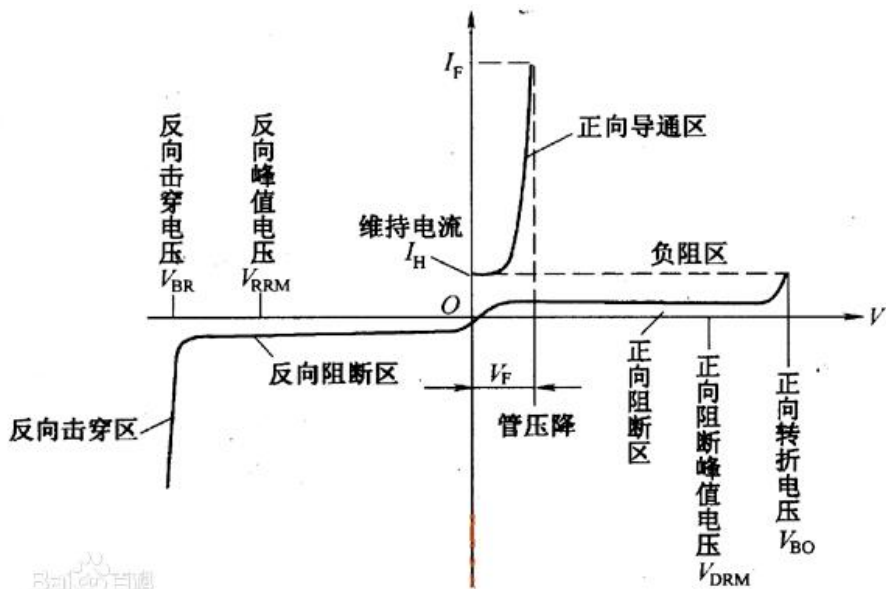


图 1-3 晶闸管正反向伏安特性曲线

晶闸管的阳极与阴极间加上正向电压时，在晶闸管控制极开路($I_g=0$)情况下，开始元件中有很小的电流(称为正向漏电流)流过，晶闸管阳极与阴极间表现出很大的电阻，处于截止状态(称为正向阻断状态)，简称断态。

当阳极电压上升到某一数值时，晶闸管突然由阻断状态转化为导通状态，简称通态。阳极这时的电压称为断态不重复峰值电压(V_{DSM})，或称正向转折电压(V_{BO})。导通后，元件中流过较大的电流，其值主要由限流电阻(使用时由负载)决定。在减小阳极电源电压或增加负载电阻时，阳极电流随之减小，当阳极电流小于维持电流 I_H 时，晶闸管便从导通状态转化为阻断状态。由图可看出，当晶闸管控制极流过正向电流 I_g 时，晶闸管的正向转折电压降低， I_g 越大，转折电压越小，当 I_g 足够大时，晶闸管正向转折电压很小，一加上正向阳极电压，晶闸管就导通。实际规定，当晶闸管元件阳极与阴极之间加上 6V 直流电压时，能使元件导通的控制极最小电流(电压)称为触发电流(电压)。

在晶闸管阳极与阴极间加上反向电压时，开始晶闸管处于反向阻断状态，

只有很小的反向漏电流流过。当反向电压增大到某一数值时，反向漏电流急剧增大，这时，所对应的电压称为反向不重复峰值电压(V_{RSM})，或称反向转折(击穿)电压(V_{BR})。

可见，晶闸管的反向伏安特性与二极管反向特性类似。

晶闸管的开通和关断的动态过程的物理过程较为复杂，图 1-4 简单地给出了晶闸管开通和关断过程的电压与电流波形。

图 1-4 中开通过程描述的是晶闸管门极在坐标原点时刻开始受到理想阶跃触发电流触发的情况；而关断过程描述的是对已导通的晶闸管，在外电路所施加的电压在某一时刻突然由正向变为反向的情况(如图中点划线波形)。

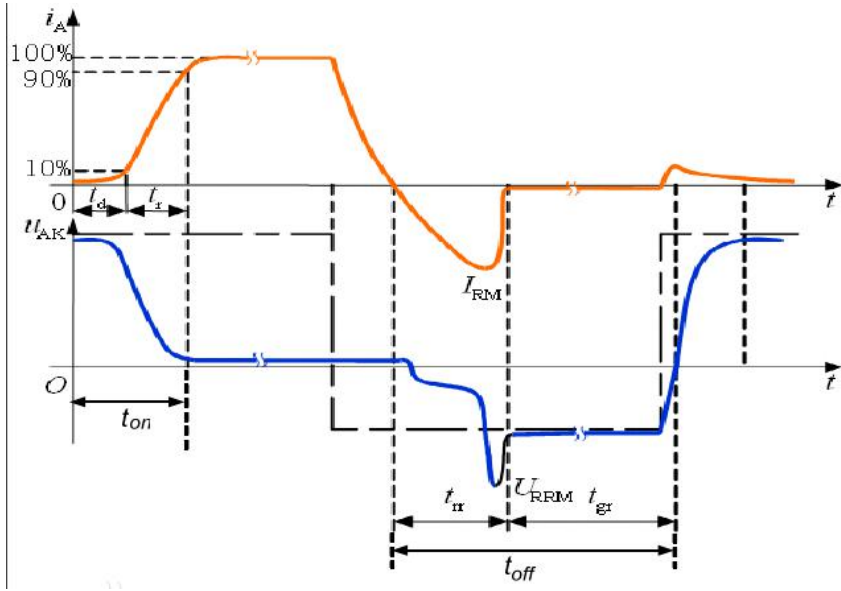


图 1-4 晶闸管开通和关断的电压与电流波形

5. 晶闸管主要参数

为了正确选用晶闸管元件，必须要了解它的主要参数，一般在产品的目录上都给出了参数的平均值或极限值，产品合格证上标有元件的实测数据。

(1)断态重复峰值电压 V_{DRM} 在控制极断路和晶闸管正向阻断的条件下，可以重复加在晶闸管两端的正向峰值电压，其数值比正向转折电压小

100V。

(2)反向重复峰值电压 V_{RRM} 在控制极断路时，可以重复加在晶闸管元件上的反向峰值电压，此电压数值规定比反向击穿电压小 100V。

通常把 V_{DRM} 与 V_{RRM} 中较小的一个数值标作器件型号上的额定电压。由于瞬时过电压也会使晶闸管遭到破坏，因而在选用的时候，额定电压一个应该为正常工作峰值电压的 2~3 倍，作为安全系数。

(3)额定通态平均电流(额定正向平均电流) I_T 在环境温度不大于 40°C 和标准散热即全导通的条件下，晶闸管元件可以连续通过的工频正弦半波电流(在一个周期内)的平均值，称为额定通态平均电流 I_T ，简称额定电流。

(4)维持电流 I_H

在规定的环境温度和控制极断路的条件下，维持元件继续导通的最小电流称为维持电流 I_H 。一般为几十毫安~一百多毫安，其数值与元件的温度成反比，在 120 摄氏度时维持电流约为 25 摄氏度时的一半。当晶闸管的正向电流小于这个电流时，晶闸管将自动关断。

(5)擎住电流 I_L

除去门极触发信号，能继续维持器件导通所必须的最小阳极电流，即使撤除门极触发信号元件仍处于导通状态而不会自行过渡到阻断状态，则此临界的阳极电流值称为擎住电流。