

实验一 电力电子器件静态特性实验-实验报告

姓名: 吴晨聪 学号: 2022010311 实验日期: 2024 年 9 月 26 日 实验台号: 5

同组人: 张译文、张悦园

一. 实验目的

- (1) 掌握电力二极管、晶闸管、电力 MOSFET、IGBT 的导通条件。
- (2) 掌握电力二极管、晶闸管、电力 MOSFET、IGBT 的静态特性。
- (3) 理解电力二极管、晶闸管、电力 MOSFET、IGBT 的静态特性主要参数含义。

二. 实验原理

(1) 电力二极管伏安特性测试

电力二极管的静态特性主要是指伏安特性，如图 3-1-3 所示，当电力二极管承受的正向电压大到一定值（门槛电压 U_{T0} ），正向电流才开始明显增加，处于稳定导通状态。与正向电流对应的电力二极管两端的电压即为其正向电压降。当电力二极管承受反向电压时，只有很小的反向漏电流。

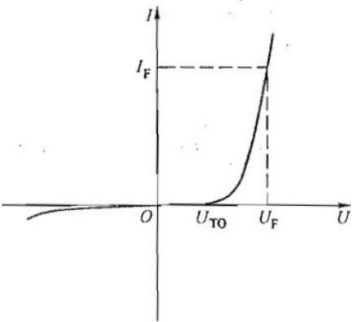


图 3-1-3 电力二极管的伏安特性

(2) 晶闸管伏安特性测试

晶闸管的伏安特性如图 3-1-5 所示，位于第 I 象限的是正向特性，位于第 III 象限的是反向特性。当门极电流 $I_G = 0$ 时，如果在晶闸管两端施加正向电压，则晶闸管处于正向阻断状态，只有很小的正向漏电流流过。如果正向电压超过临界极限即正向转折电压，则漏电流急剧增大，器件开通。当门极电流不为零时，随着门极电流的增大，正向转折电压下降。当门极电流增加超过某一临界值后，正向阻断区几乎消失，晶闸管正向伏安特性类似于二极管的正向伏安特性。

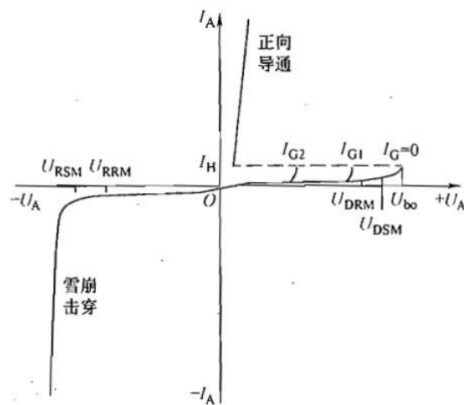


图 3-1-5 晶闸管的伏安特性

(3) 电力 MOSFET 转移特性与输出特性测试

电力 MOSFET 的静态特性如图 3-1-7 所示，包括转移特性和输出特性。转移特性是在一定的漏源极间电压 U_{DS} 下，漏极直流电流 I_D 和栅源间电压 U_{GS} 的关系，反映了输入电压和输出电流的关系。输出特性是在 U_{GS} 一定的条件下，其漏极电流 I_D 与漏源极间电压 U_{DS} 之间的关系曲线。

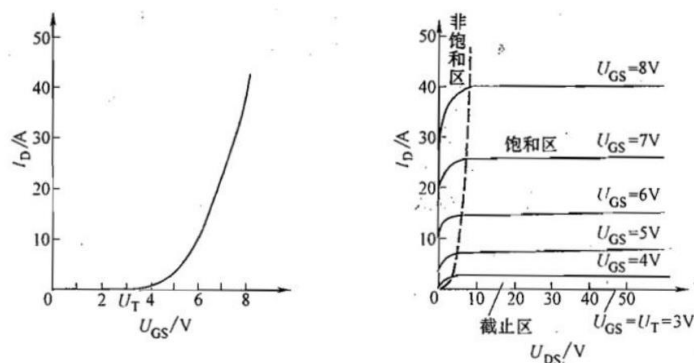


图 3-1-7 电力 MOSFET 的转移特性和输出特性

(4) IGBT 转移特性与输出特性测试

IGBT 的静态特性如图 3-1-9 所示，包括转移特性和输出特性。转移特性是在一定的集射极间电压 U_{CE} 下，集电极电流 I_D 和栅射极间电压 U_{GE} 的关系。输出特性是以栅射极间电压 U_{GE} 为参考变量（即在 U_{GE} 一定的条件下）时，其集电极电流 I_C 与集射极间电压 U_{CE} 之间的关系曲线。

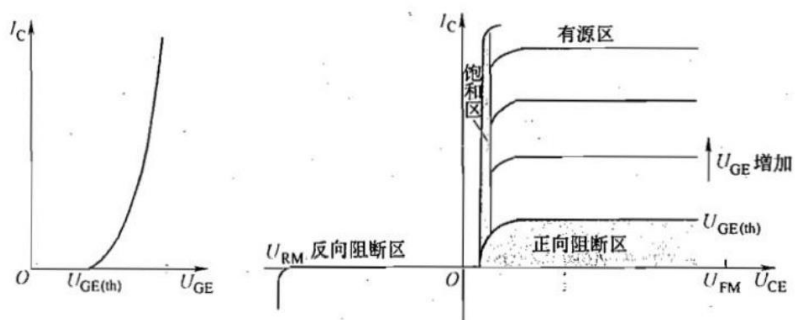


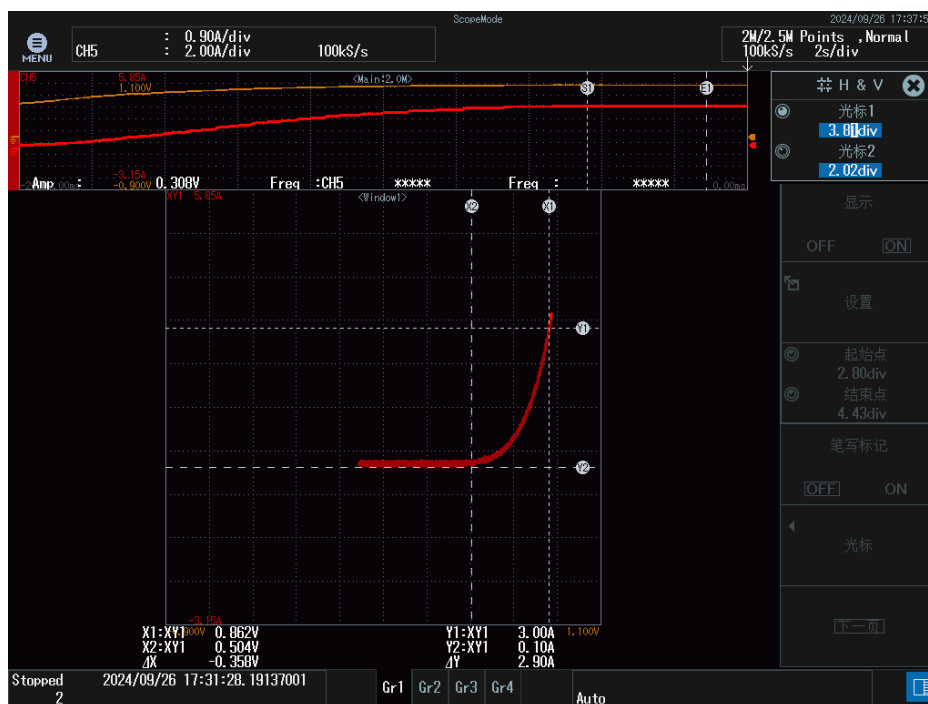
图 3-1-9 IGBT 的转移特性和输出特性

三. 数据整理

(1) 电力二极管伏安特性测试

表 3-1-2 电力二极管的主要参数实验结果

门槛电压 U_{TO} (V)	正向压降 U_F (3A 时) (V)	导通电阻 (3A 时) (Ω)
0.504	0.862	0.287

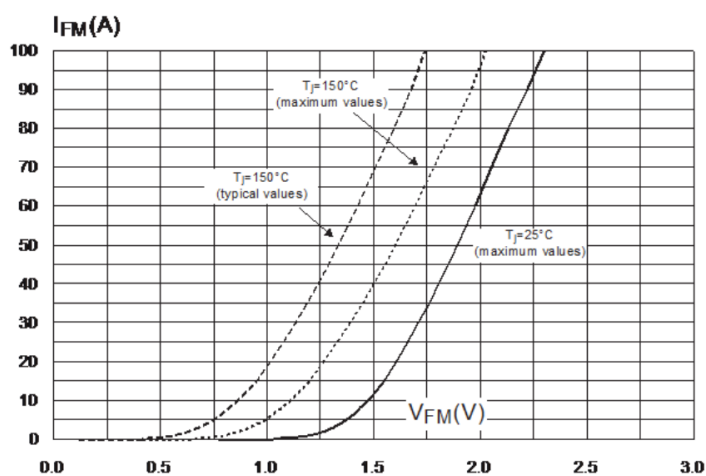


二极管伏安特性曲线

分析:

实验结果较好地符合理论分析。当二极管两端压降小于阈值电压 U_{TO} 时，二极管电流接近零，可视为不导通；当二极管两端压降大于阈值电压 U_{TO} 时，二极管导通，电流迅速增大，同时二极管电压维持在一定值。

Figure 2: Forward voltage drop versus forward current (per diode)



比较：

根据实验数据可得门槛电压 $U_{T0} = 0.504V$ ，正向压降 $U_F = 0.862V$ （3A 时），导通电阻 $R = 0.287\Omega$ （3A 时）。

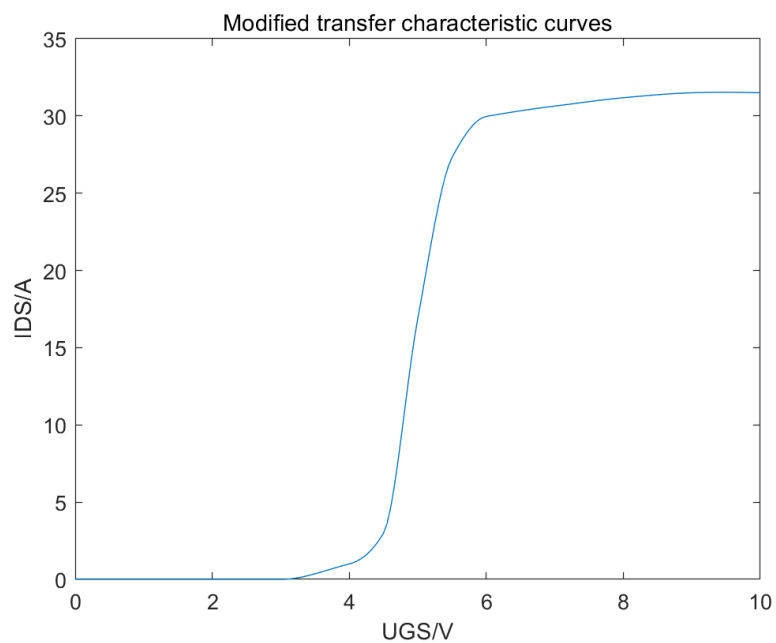
数据手册上， 25°C 时， $U_{T0} = 0.95V$ ， $U_F = 1.25V$ （3A 时）， $R = 0.461\Omega$ （3A 时）。由于手册上只有特性曲线可得出数据，且包含的电压电流较大，不易读数，误差较大。

实验测得的静态参数值均低于手册中的数值，可能当电压较大时，由于发热较多，会导致实验曲线与理论结果出现一些误差。

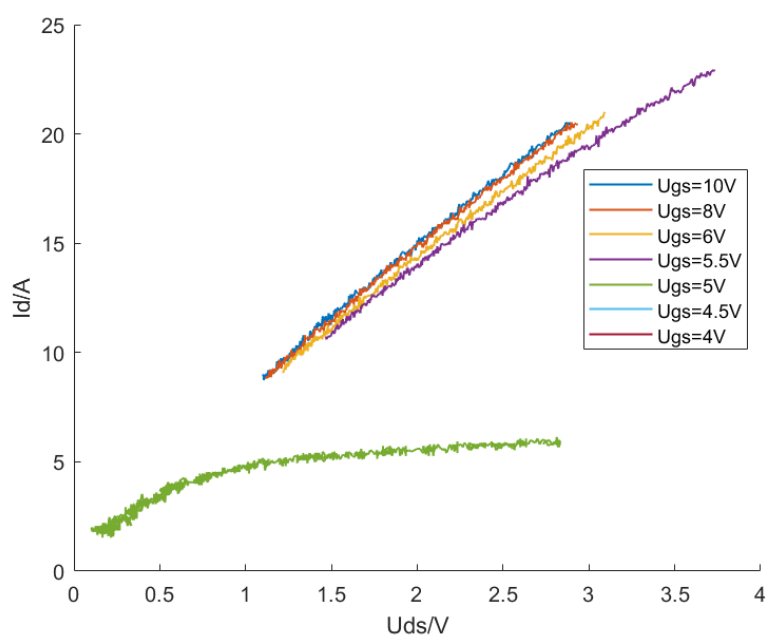
(3) 电力 MOSFET 转移特性与输出特性测试

表 3-1-6 电力 MOSFET 转移特性测量结果（ $U_{DS}=5V$ 时）

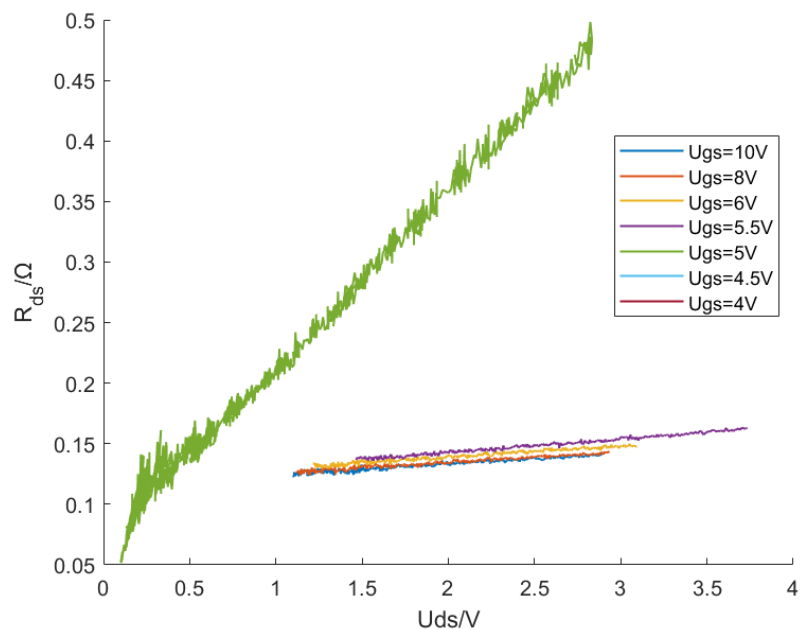
U_{GS} (V)	3	4	4.5	5.0	5.5	6.0	7	8	9	10
I_D (A)	0	/	/	16.29	27.31	29.97	30.64	31.18	31.50	31.50



MOSFET 的转移特性曲线



MOSFET 的输出特性曲线



MOSFET 的源漏极通态电阻曲线

分析：

转换特性曲线整体符合理分析， U_{GS} 在大于阈值电压后 MOSFET 导通。但输出特性曲线因收集数据时采样点设置不足，导致曲线不完整，不过仍能看出当 U_{GS} 降低时，对应的 I_D 也会降低，其大体趋势符合理论分析。

($T_{CASE} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified)

Table 5: On/off states

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{(BR)DSS}$	Drain-source breakdown voltage	$I_D = 1\text{ mA}$, $V_{GS} = 0\text{ V}$	600			V
I_{DSS}	Zero gate voltage drain current	$V_{GS} = 0\text{ V}$, $V_{DS} = 600\text{ V}$			1	μA
		$V_{GS} = 0\text{ V}$, $V_{DS} = 600\text{ V}$, $T_C = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ⁽¹⁾			100	
I_{GSS}	Gate-body leakage current	$V_{DS} = 0\text{ V}$, $V_{GS} = \pm 25\text{ V}$			± 0.1	μA
$V_{GS(th)}$	Gate threshold voltage	$V_{DS} = V_{GS}$, $I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	2	3	4	V
$R_{DS(on)}$	Static drain-source on-resistance	$V_{GS} = 10\text{ V}$, $I_D = 10\text{ A}$		0.135	0.165	Ω

Figure 4: Output characteristics

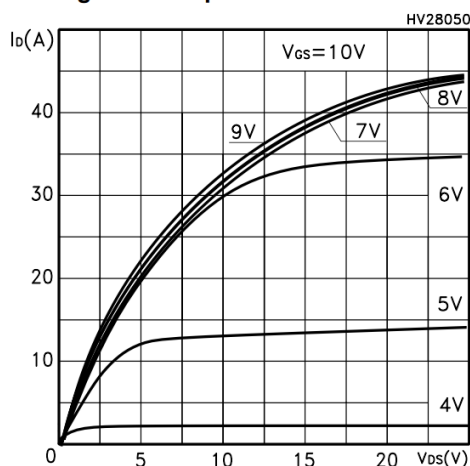
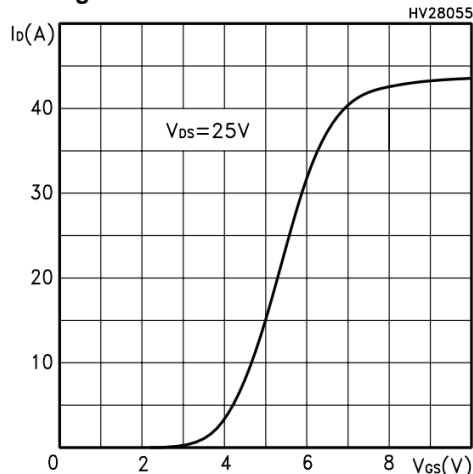


Figure 5: Transfer characteristics



比较:

根据实验数据可得阈值电压 $U_{GS} = 3.15V$ 左右, 导通电阻 $R_{ds(on)} = 0.13 \sim 0.16\Omega$ 。

数据手册上, $25^{\circ}C$ 时, $U_{GS} = 3V$, $R_{ds(on)} = 0.13$ 。

实验测得的静态参数值均与手册中的数值相近, 同时实验数据画出的图像也都大致符合手册中的图例。

四. 预习问题

1. 如何利用录波仪 DL950 校准电压探头 700929 以及电流探头 E3N?

将输出与电压探头相连, 观察波形以校准。

具体操作为在波形画面的 MENU 上, 轻触 SETUP > CAL > execute calibration。

2. 测量 I-V 特性电压噪声过大, 如何通过录波仪 DL950 的设置消除?

选择合适的采样率: 在波形画面的 MENU 上, 轻触 VERTICAL > CH, 或按下 CH。

显示通道设置菜单 > CHx > SampleRate。

测量信号波形变化较慢时, 可以选择较低的采样率, 以减少噪声。

设置合适的带宽限制或滤波器: 显示通道设置菜单 > CHx > Filter/BandWidth。

3. MOSFET 静态特性测试的时候, 如何设置单次触发, 怎样选择触发电平和触发通道?

在波形画面的, 轻触 TRIGGER > MENU > Trigger Mode > Single

在相同菜单 MENU 上, 可以设置触发电平 LEVEL 和触发通道 Source

触发电平可设在 $-2.5 \sim 2.5V$ 间, 触发通道为 MOSFET 的驱动信号输入端

4. 为什么要分别在 $U_{GS} < 4.5V$ 和 $U_{GS} \geq 4.5V$ 设置 $U_{DS} = 5V$ 以及 $U_{DS} = 15V$?

让 MOSFET 处于饱和区, 当电容放电时, U_{DS} 逐渐减小, 可以观测到完整的静态特性曲线。

注意事项:

1. 如何保存 XY 图的波形?

长时间尺度数据存储需要将DL950切换为录波仪模式。

2. 测试中尽量将一个电压探头和一个电流探头分别接在 CH5 和 CH6 上。
3. 记录 XY 图的时候，在阈值电压/转折电压附近时，电压旋钮速度慢一些，速度尽量均匀，以使得 XY 图描点均匀。
4. MOSFET 静态特性测试过程是给电容充电后，利用电容对 MOSFET 放电的过程。

五. 分析思考

(3) 通过驱动电流和维持电流的测量，说明晶闸管导通与关断的特点。

当门极施加一定的电流（电压）时，如果晶闸管两端电压大于转折电压，晶闸管迅速导通，电流增加到一定值，两端电压下降为导通电压。此时撤去门极电流（电压），晶闸管依然导通，此时减小晶闸管两端电压，当电流减小到维持电流时，晶闸管关断。

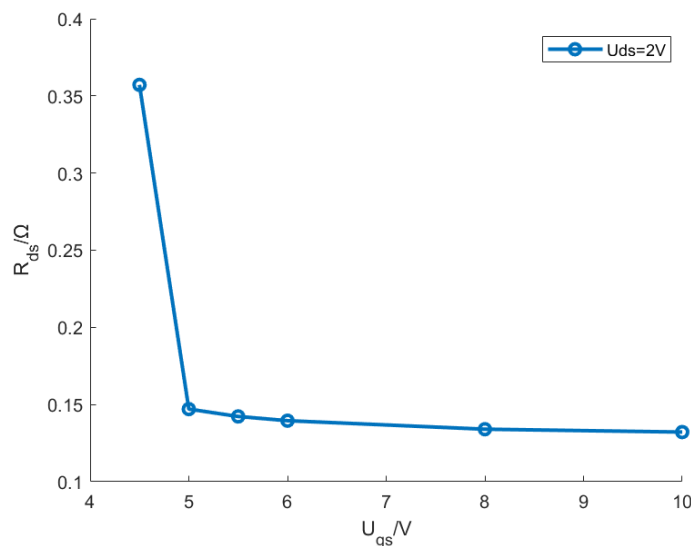
导通：门极施加正向电流，晶闸管两端施加一定电压（大于转折电压）；

关断：晶闸管电流足够小（小于维持电流）。

(4) 根据晶闸管与电力 MOSFET、IGBT 驱动电流的大小比较，说明不同类型器件在驱动要求方面的差异性。

晶闸管的驱动电流较大，需要更高的电流触发导通，并且关断较复杂。相比之下，电力 MOSFET 具有较低的驱动电流需求，主要由栅极电压控制，速度快。而 IGBT 的驱动电流介于两者之间，导通电压较高，尤其在开关速度和能耗之间有很好的平衡。

(5) 根据转移特性实验结果，计算并绘制电力 MOSFET 的源漏极通态电阻 $R_{DS(on)}$ 与栅极驱动电压 U_{GS} 的关系，说明设计 MOSFET 的驱动时，驱动电平的选择主要考虑的因素是什么？

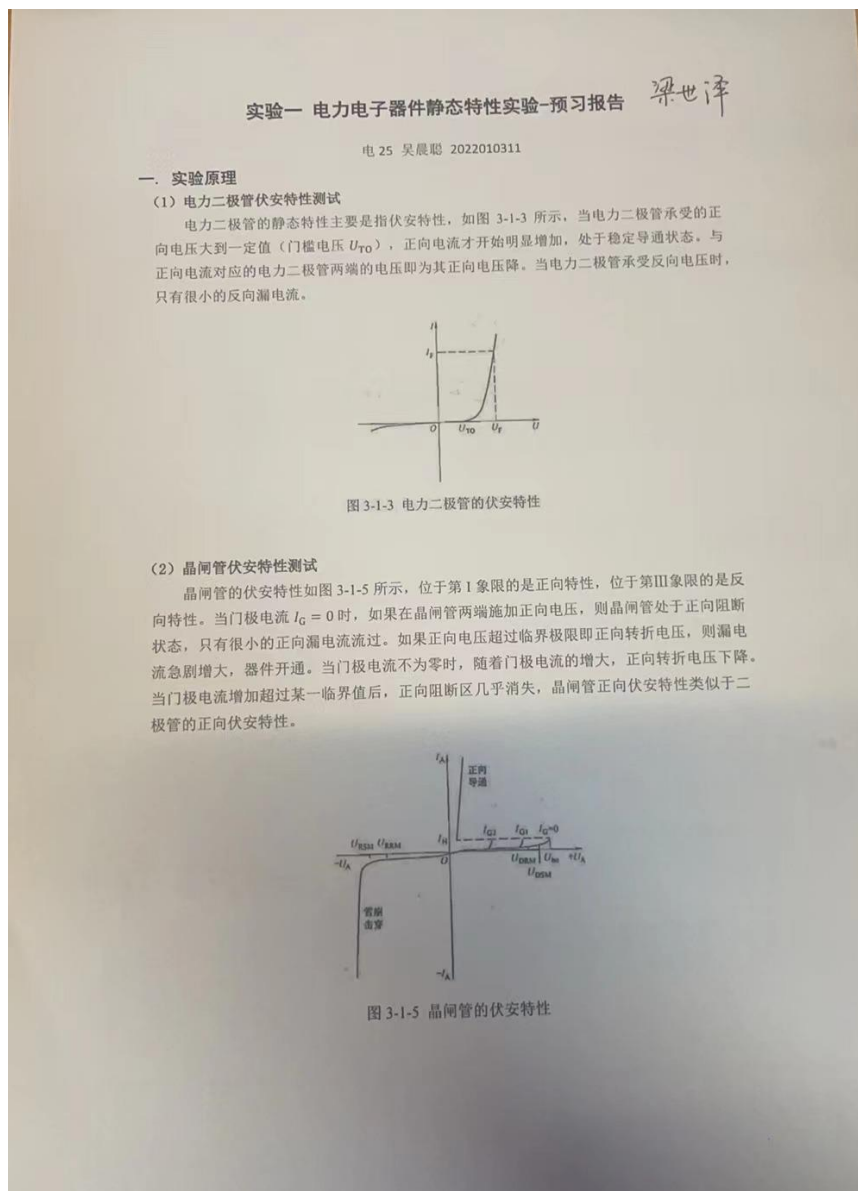


随着 U_{GS} 的增大，MOSFET 逐渐进入饱和区，导通能力增强， $R_{DS(on)}$ 减小。栅极驱动电压越小，源漏级通态电阻会越大，MOSFET 导通时的损耗就会越大，所以应当适当提高栅极驱动电压以减小源漏级导通电阻。

(6) MOSFET、IGBT 静态特性测试时，为什么采用脉冲测试？若采用持续导通方式，对测量结果有什么影响？

采用脉冲测试是为了避免器件因长时间持续导通产生的自热效应。持续导通会导致器件温度升高，从而影响电流、电压特性，导致测试结果偏差，尤其在高功率条件下。

六. 预习报告



七. 原始数据

表 3-1-2 电力二极管的主要参数实验结果

门槛电压 U_{TO} (V)	正向压降 U_F (3A 时) (V)	导通电阻 (3A 时) (Ω)
0.504	0.862	0.287

2. 晶闸管伏安特性测试

表 3-1-3 晶闸管的触发参数实验结果

触发电流 I_G (A)	触发电压 U_G (V)
0.027	3.50

表 3-1-4 晶闸管的维持电流测量结果

维持电流 I_H (A)
0.702

表 3-1-5 晶闸管转折电压测量结果

工况	触发电流 (A)	转折电压 (V)	通态电压 U_T ($I_A=3A$ 时) (V)
工况 1			
工况 2			

3. 电力 MOSFET 转移特性与输出特性测试

表 3-1-6 电力 MOSFET 转移特性测量结果 ($U_{DS}=5V$ 时)

U_{GS} (V)	3	4	4.5	5.0	5.5	6.0	7	8	9	10
I_D (A)	0	/	/	16.29	27.31	29.97	30.64	31.48	31.50	31.50

31.50

4. IGBT 转移特性与输出特性测试

表 3-1-7 IGBT 转移特性测量结果 ($U_{CE} = 2V$ 时)

U_{GE} (V)	3	4	4.5	5.0	5.5	6.0	7	8
I_C (A)								

三、预习问题回答

1. 如何利用录波仪 DL950 校准电压探头 700929 以及电流探头 E3N?

将电压探头和电流探头连接在示波器上，电流探头不接电流，电压探头接内置参考电压，运行示波器；调整电压探头的旋钮，使示波器上的波形是方波；调整电流探头的旋钮，使电流值为 0。

2. 测量 I-V 特性电压噪声过大，如何通过录波仪 DL950 的设置消除？

电压探头的带宽调小。

3. MOSFET 静态特性测试的时候，如何设置单次触发，怎样选择触发电平和触发通道？

在 TRIGGER 栏按 MENU，右侧出现菜单栏；在菜单栏中，点击触发模式选择单词触发，点击触发电平输入需要的电平，点击源选择出发通道。

4. 为什么要分别在 $U_{GS} < 4.5V$ 和 $U_{GS} \geq 4.5V$ 设置 $U_{DS} = 5V$ 以及 $U_{DS} = 15V$?