

纸晶体管 (10 分)

现代社会的电子技术建立在一种简单而强大的器件之上: 晶体管。晶体管可以作为开关和放大器。开关模式可用于存储和处理数字信息。

在此我们将分析两种场效应晶体管 (FETs): JFET(结型场效应晶体管) 和 TFT(薄膜场晶体管)。

我们将简要地解释一下 FET 是如何工作的。一个 FET 是一种非线性的 3 极器件 (三个极分别称作栅极 G; 源极 S; 漏极 D), 通过作用在栅极和源极间的电压来控制源极和漏极之间的电流。用一个简单的, 虽然不太完美的比喻, 一个 FET 的工作原理类似于水龙头, 旋钮相当于栅极, 用来控制水流。

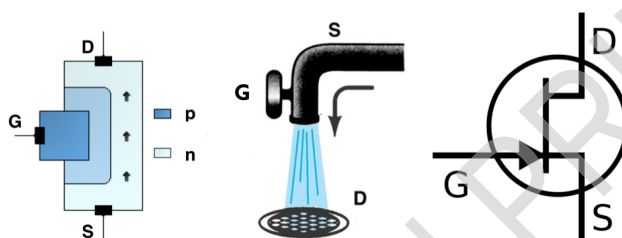


图 1. n-通道 JFET 的原理图 (左), 其流水控制类比模型 (中) 和电路符号 (右)。JFET 结构图中的箭头表示源极 (S) 和漏极 (D) 之间的电流流过窄的 n-通道 (或者沟道)。沟道的宽度取决于栅极 (G) 和源极 (S) 之间所施加的电压。

结型场效应晶体管 (JFET) 依赖于两种半导体材料 (比如 p 和 n 型掺杂硅) 之间的结的特性, 因此而得名。JFET 有一个狭窄的通道, 电流通过该通道在源极和漏极之间流动, 在 n 沟道 FET 中, 该沟道由 n 型半导体构成。沟道宽度可以通过在栅极和源极之间施加一个负电压 $V_{GS} = V_G - V_S$ 来精确控制。对于固定的 V_{GS} , 源极和漏极之间的电流与这两个极之间的电压 $V_{DS} = V_D - V_S$ 的关系不是线性的。然而, 对于小的 V_{DS} 电压, 可以认为电流与所施加的电压成线性关系, 因此 JFET 表现为欧姆行为。然而, 输出电阻 $R_{DS} = V_{DS}/I_{DS}$ 很大程度上取决于所施加的 V_{GS} 电压, 近似遵循以下规律:

$$R_{DS} = \frac{R_{DS}^0}{1 - V_{GS}/V_P}, \quad (1)$$

其中 R_{DS}^0 为 $V_{GS} = 0$ 时的输出电阻, $V_P < 0$ 是 JFET 的一个参数, 称为夹断电压。显然, 在夹断电压下, FET 会阻止电流流动。

对于任何固定的 $V_{GS} > V_P$ 时, 随着 V_{DS} 的增大, 源极和漏极之间的电流将开始偏离线性关系, 在某一时刻会趋于饱和, 从而达到一个几乎恒定的值。将 $V_{GS} = 0$ 时的饱和电流记为 I_{DSS} 。在饱和情况下 (施加大的 V_{DS}), 饱和电流将依赖于 V_{GS} , 公式如下:

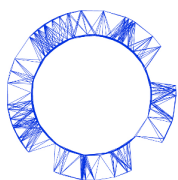
$$I_{DS} = I_{DSS} (1 - V_{GS}/V_P)^2. \quad (2)$$

我们应该强调 JFET 的两个非常重要的特征。虽然控制输出电压的电压可以很低, 但是其输入电阻 ($R_{GS} = V_{GS}/I_{GS}$) 却极其高, 通常大于 $10^9 \Omega$, 所以这个器件只需要很少的输入电流。此外, 小型 JFET 的电容非常低, 这使其成为非常快速的器件, 其开关速度大于 MHz。

现在我们继续介绍不同类型的 FET, TFT(薄膜晶体管) 的工作原理。

和其它 FET 一样, TFT 通过在第三个电极 (即栅极) 上所施加的电压来控制源极和漏极之间的电流。

栅极与半导体层在物理上被绝缘体分开, 它允许建立一个垂直的电场来控制半导体中存在的自由载流子 (场效应)。绝缘层可以被一种电解质膜所取代, 例如存在移动离子的纸张 (见图 2), 在这种情况下, 在栅极上施加的电压将会把带有相反电荷的离子推向半导体界面, 产生一层离子电荷, 这样就可以调节半导体材料中自由载流



子的浓度 (这称为电解质门控晶体管-EGTs)。里斯本诺瓦大学 (Universidade Nova) 的研究人员是 2008 年“纸晶体管”研究的前驱，也是国际上该领域的领跑者。

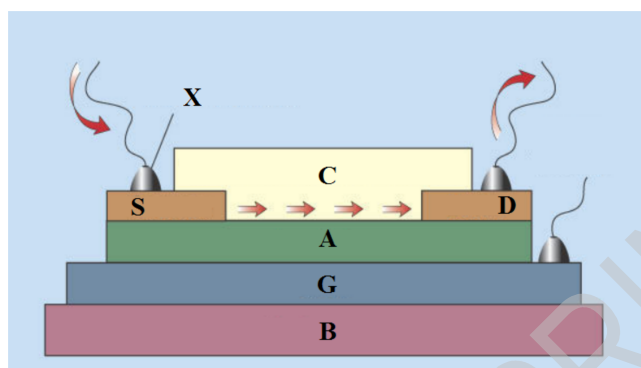


图 2. 在这个问题中要用到的纸薄膜晶体管 (TFT) 的原理图。S - 源极；D - 漏极；G - 栅极；A - 纸 (绝缘体)；B - 衬底；C - 半导体层 (镓-铟-氧化锌 (GIZO))；X - 金属触点。箭头表示电流流动方向。

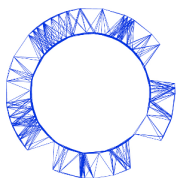
与 JFETs 类似，TFT 晶体管可以在两种基本的操作模式下工作，线性模式和饱和模式。与 JFET 相比，TFT 的固有电容是与设备性能有关的一个参数。

在本实验题中，你将研究 n 沟道 JFET 和纸薄膜晶体管 (TFT) 的工作原理。

你将通过在栅极 G 和漏极 D 分别施加不同的电压 (V_{GS}) 和 (V_{DS})，来测量 S 和 D 之间的电流 (I_{DS})，从而确定这些器件的特征曲线 (CCs)。

最重要的两个特征曲线是输出和转移曲线：

- **输出曲线：**在此曲线中，源极和漏极之间的电流 (I_{DS}) 将被测量，并绘出该电流随着源极和漏极之间电压 (V_{DS}) 变化的函数关系。测量时， V_{DS} 从 0 V 逐步增大到 +3V，同时保持 V_{GS} 恒定。
- **转移曲线：**对于这条曲线，要求测量 I_{DS} ，并绘制其随着 V_{GS} 变化的关系曲线。测量中， V_{DS} 保持为一个合适的值，使晶体管工作在**饱和模式**，且 V_{DS} 保持不变；而 V_{GS} 从 -3V 逐步增大到 0V。



装置

本实验题提供了以下一套实验装置 (图 3):

1. 万用表
2. JFET 晶体管 (放在贴有标签的塑料袋中)
3. 带有鳄鱼夹的导线 (图中编号 10)
4. 扁平鳄鱼夹 (编号 4, 装在塑料袋里)
5. 电池组 (4 节 1.5 V)
6. 电池座
7. 带支架的小面包板
8. 小型电路面包板中用于连接的跳线 (编号 3)
9. HB 铅笔
10. 银线笔 (电路划线笔)
- 11 计时器
- 12 带有印刷电路并嵌入 TFT 的纸张, 该 TFT 用纸作为绝缘层 (图 4)
- 13 用于书写的袋子 (内含一支水笔, 一支铅笔, 一块橡皮/卷笔刀, 一把尺)

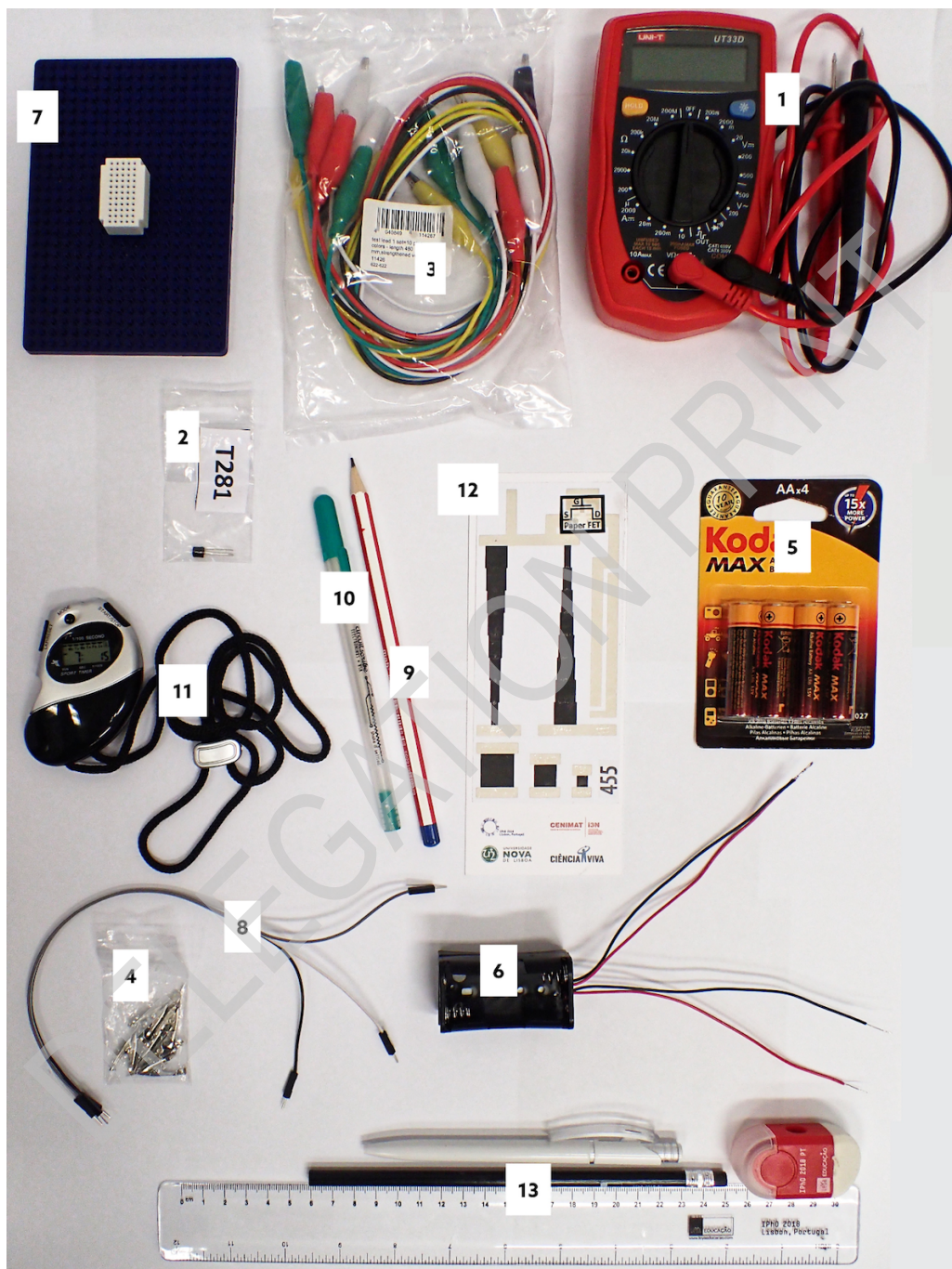
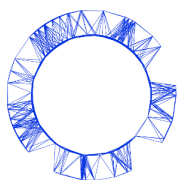


图 3 实验装置

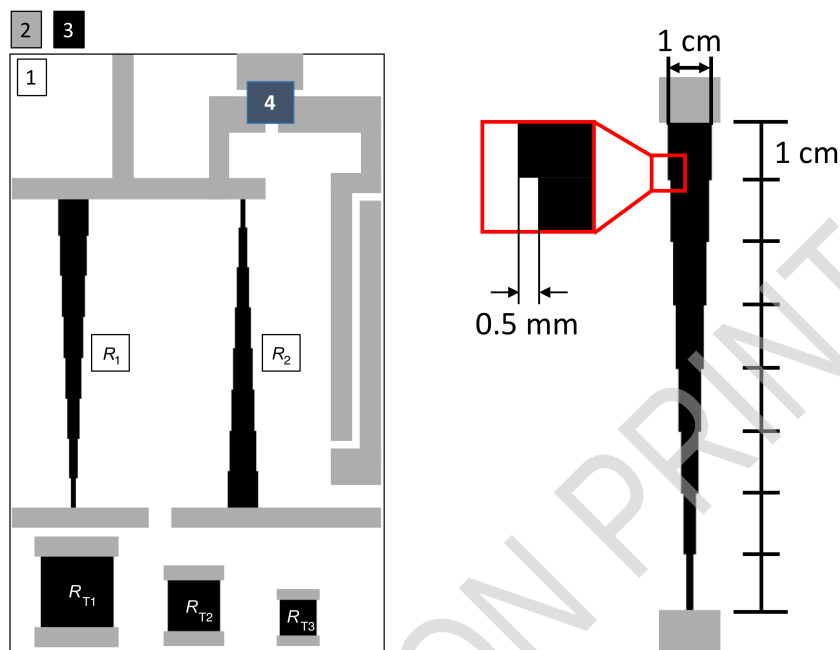
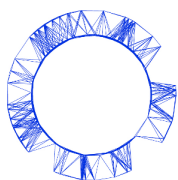
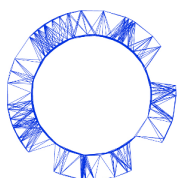


图 4。左边：实验装置中带有印刷电路的纸张：纸 (1)，银导线 (2)，碳电阻轨道 (3)，纸晶体管 (4)，分压电阻 (R_1 和 R_2)。右边：分压电阻的几何尺寸示意图（段与段之间的宽度之差恒定为 0.5 毫米）

重要的预防措施：不要折叠带有印刷电路并嵌入晶体管的纸张，因为这样很容易损坏它。在测量过程中让它尽可能地保持平整，以便达到最好的测量结果。

测量时，必须考虑以下**重要信息**。



- 万用表应始终在**直流模式**下操作。
- 万用表不能自动转换量程，你应该仔细为测量值选择最适合的量程。如果发生超量程现象，万用表将显示“1”或“-1”（显示为左对齐），分别对应正值和负值，为此，你应该将测量值调到更低的范围。
- 低电流范围由一根 315mA 的保险丝保护。**必须避免在电池和万用表之间造成短路**，因为短路时的高电流会把保险丝烧断！
- 在电压模式下工作时，万用表的内阻为 $10\text{ M}\Omega$ 。
- 当用作安培计时，不同电流时万用表的内阻见下表所示。

量程	R_{int}/Ω
200 mA	1.0
20 mA	10
2 mA	100

表 1. 当万用表作为电流表使用时，不同电流时的万用表内阻。

因此，当万用表用作直流电流表模式时，对于三个可用的直流量程的任何一个量程，在满量程时，万用表的接线端之间都会有高达 200 mV 的压降。

A 部分 确定电路

为了获取所需的 V_{DS} 和 V_{GS} 电压，需要使用打印在纸上的两个碳电阻 (R_1 和 R_2 ，见图 4) 和分压电路来测量正确的电压降。 R_1 和 R_2 是电压分压电路的总电阻 (R_{tot})。当在 R_1 上施加一个恒定电压 (在本例中为 3 V 的电池)，电阻 R_1 上将有一个从约 3V (V_{in} ，电池的正极电压) 到地 (0 V，从现在开始，我们指定两个电池组的共同接触点为接地点) 的电压降。为了得到想要的电压 V_{out} ，可以将 R_{tot} 分为两个电阻 (R_x , R_y) (图 5)。

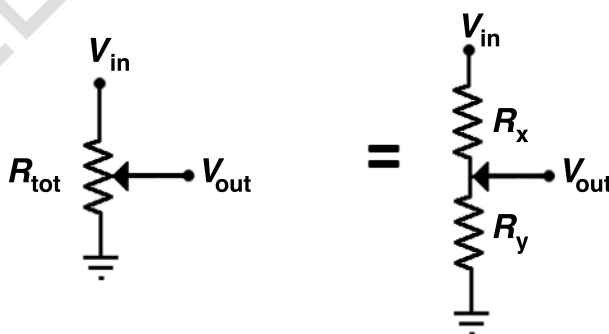
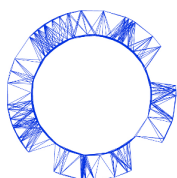


图 5. 分压电路。

A.1 推导输出电压 V_{out} 的表达式，它是关于 V_{in} 和“电阻 R_x 和 R_y ”的函数。

0.2pt

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q1-7

CHN (China)

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.2 | 用万用表测量纸张底部的三个测试电阻 (R_{T2} , R_{T2} 和 R_{T3}) 的阻值。在银触点的不同位置上, 进行多次测量。将测量值填入到答题卡中。对于每个测试电阻, 计算其平均值并估计不确定度。 | 0.5pt |
| A.3 | 证明一个电阻率为 ρ 的正方形薄膜的电阻与它的边长无关。这种与边长无关的电阻称为薄膜电阻, 用 $R_{\square}$ 来表示。 | 0.3pt |
| A.4 | 从 A.2 的数据中计算出碳膜电阻的平均值, 并计算得到碳膜的电阻率 ρ , 并估计其不确定度 (认为碳膜厚度 t 为 $20 \pm 1 \mu\text{m}$)。 | 0.4pt |
| A.5 | 证明电阻 R_1 、 R_2 的理论值为 $R_1 = R_2 = \kappa R_{\square}$, $\kappa \sim 14.2897$ 。测定 R_1 和 R_2 , 并将值记录在答题卡中。确定 κ 的实验值, 并与理论值进行比较。 | 0.5pt |

使用所提供的银线笔, 沿所提供的每个电阻器绘制 7 条等距的导电线路 (如图 6 所示)。这些独立的线将作为分压器的接触点。

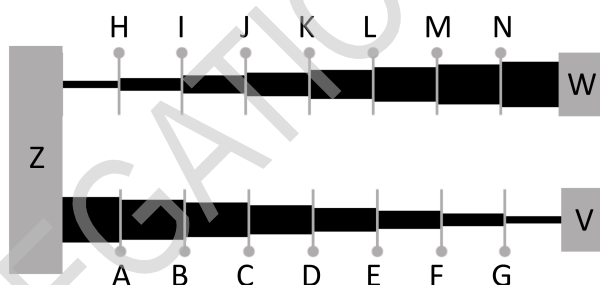


图 6. 接触点的画线示例和命名。

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.6 | 测定所有接触点的电阻 R_x 和 R_y 。 R_x 定义为接触点与点 V(电阻 1) 或 W(电阻 2) 之间的电阻, R_y 定义为接触点与点 Z 之间的电阻。将测量值填入答题卡的表格中。 | 0.3pt |
|------------|--|-------|

将 4AA 电池插入电池盒中。请仔细观察正确的电池极性并且确保没有短路。然后, 按图 7 中所示, 连接好电池。确保不要用鳄鱼夹损坏银导线。

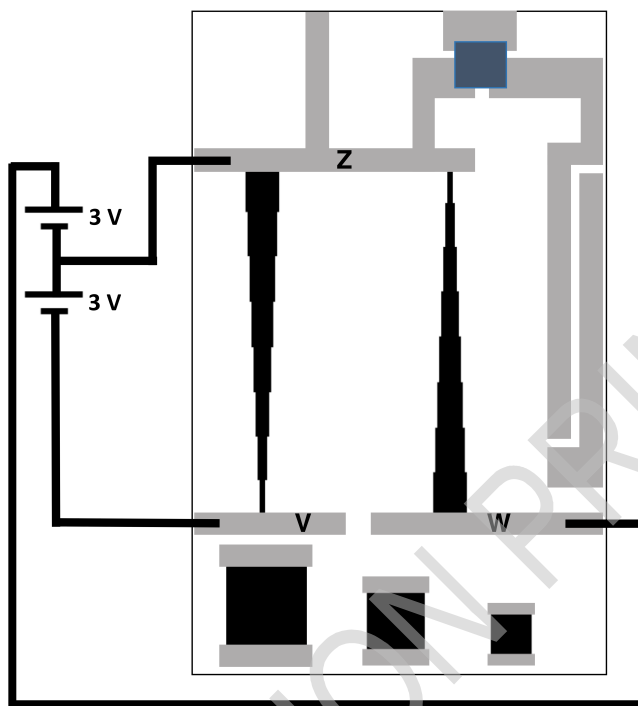
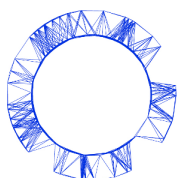


图 7. 电池连接

A.7 测定每个接触点的输出电压 V_{out} , V_{out} 为相对于 Z 点的电压测量值, 将数值填入答题卡的表格中。 0.3pt

电路的测量到此结束, 下面你可以开始测量 JFET 晶体管的特征曲线了。

B 部分. 描述 JFET 晶体管的特征曲线。

为描述 JFET 晶体管的特征, 要用到如图 8 所示的装置。首先, 在提供的 JFET 晶体管上识别 S, D 和 G 三个电极——**注意要正确识别这三个电极, 因为器件并不是对称的!** 你可以使用所提供的小面包板安装 JFET 晶体管。提供的跳线将与小面包板一起使用。

使用提供的导线将晶体管的栅极和源极连接到地 (电路中的点 Z 为 0 V)。在整个 B 部分的实验过程中, JFET 的源极应该始终与地面保持连接。

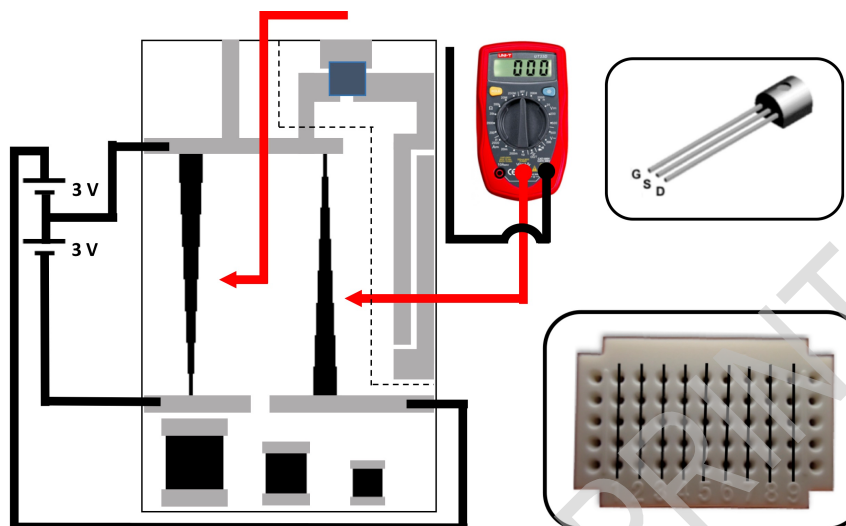
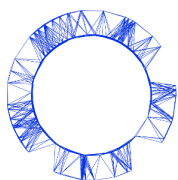


图 8. 用于确定 JFET 特征曲线的实验装置。包含 TFT 在内的虚线区域内的电路部分不会在实验题的 B 部分中使用。右上插图显示了如何识别 JFET 晶体管的栅极 G、源极 S 和漏极 D。右下的插图显示了迷你面包板的孔是如何连接的。在同一编号的列上的所有孔都是在内部相连接的，而与其他列的孔则是隔绝开的。图中万用表仅仅是说明：使用万用表旋转档位，以选择合适的测量模式和范围。

B.1 将晶体管的栅极 G 连接到地 ($V_{GS} = 0$)。然后在直流电流模式下, 将万用表的一个表笔 0.2pt
 连接到晶体管的漏极, 而另一根表笔则连接分压器的最高电压处。在答题纸卡上记录
 电流 I_{DS} 的值。

B.2 保持 $V_{GS} = 0$, 在漏极加上不同的正电压, 测定相应的电流 I_{DS} 。然后改变电路, 在晶 0.8pt
 体管的栅极和源极之间施加一个负电压 ($V_{GS} < 0$), 并重复电流 I_{DS} 的测量, I_{DS} 是
 漏极和源极之间所施加的正电压的函数。在答题卡的表格中填入你的测量值。

当分压电路连接到低电阻负载时 (图 9), 电压分压器所提供的电压值 V_{out}^L 与负载为高电阻时所测量到的标称值 V_{out} 不同, 比如高阻抗电压表的情况。

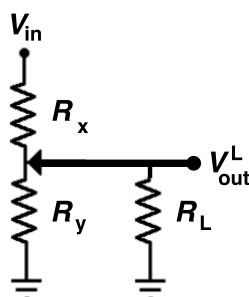
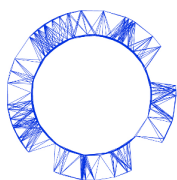


图 9. 带负载的分压器

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q1-10

CHN (China)

- B.3** 考虑将电压分压器连接到负载 R_L 的情况。推导校正因子 $f = V_{out}^L / V_{out}$ 的表达式，它是 R_L 、 R_x 和 R_y 的函数。 0.2pt

当 $V_{GS} = 0$ 时，JFET 晶体管具有很小的输出电阻 $R_{DS}^0 \sim 50 \Omega$ 。然而，当栅极相对源极的极性为负时，这个输出电阻会显著增加。对于 $V_{GS} < 0$ ，输出电阻与方程 (1) 给出的规律非常符合。

- B.4** 使用适当的校正因子，测定所有在 B.2 中测量点的 V_{DS} ，即漏极和源极之间的电压降。该问中所用的 JFET 的标称数据参考如下： $R_{DS}^0 = 50 \Omega$ ， $V_p = -1.4 V$ 1.2pt

- B.5** 绘制 JFET 晶体管的输出曲线 $I_{DS}(V_{DS})$ 0.5pt

- B.6** 考虑晶体管在小 V_{DS} 时的工作特性。对于不同的 V_{GS} ，测量 JFET 的 R_{DS} 的值，并依据数据画出 V_{GS} 关于 R_{DS} 的关系图。 0.5pt

- B.7** 取 $V_{DS} \sim +3 V$ ，绘制 JFET 晶体管的转移曲线 ($I_{DS}(V_{GS})$)。 0.3pt

当 JFET 晶体管处于饱和状态时，电流 I_{DS} 与方程 (2) 给出的规律非常符合。

- B.8** 从测量的数据中，确定 I_{DSS} 和夹断电压 V_p 。将该 V_p 与其标称值相比较。 0.4pt

JFET 晶体管的一个重要参数，特别是当在放大器中使用它时，就是所谓的晶体管转导率 g ，其定义为

$$g = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}. \quad (3)$$

对于两个变量的函数 $f(x, y)$ ，符号 $\frac{\partial f}{\partial x}$ 表示 f 对 x 的偏导，此时 y 保持不变。

- B.9** 依据测量的转移曲线，计算 $V_{GS} = -0.50 V$ 时的转导率。将其与从模型方程 (2) 中获得的计算值进行比较。 0.4pt

C 部分. 纸质薄膜晶体管 (2.0 分)

从现在开始，不再考虑 JFET，所有的任务和问题都与位于印刷电路右上角的纸质薄膜晶体管 (TFT) 有关。TFT 栅极、源极和漏极都在图 10 中标出了。将 TFT 栅极和源极接地。在这部分问题中，薄膜 TFT 的源极应该始终与电池组的公用端相连接，该端电压为 $0 V$ ，如图 10 所示。通过分压器 (图 10)，将晶体管极性调整为 $V_{DS} > 0$ 。检查安培表有电流通过。

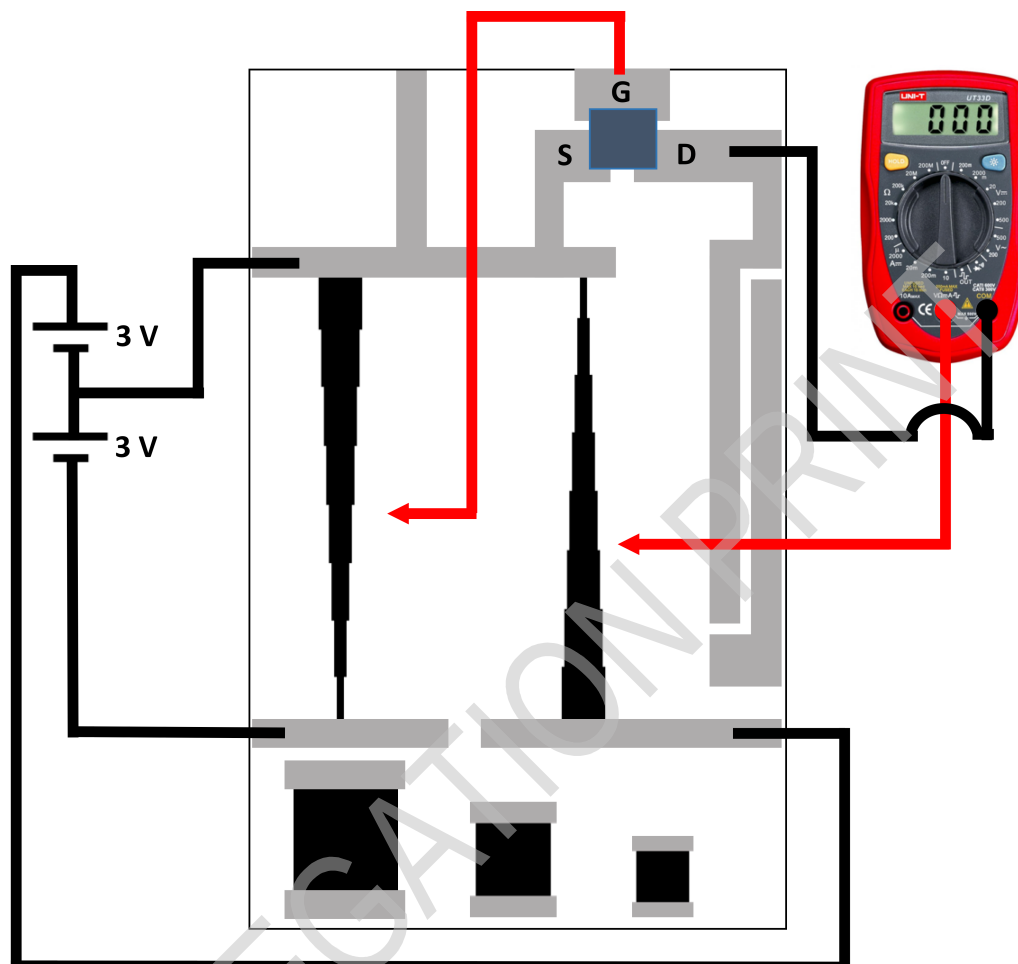
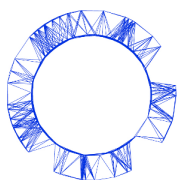


图 10. 纸质 TFT 的测量装置。万用表的图片仅仅是为了定性说明: 在万用表的旋转档位中必须选择合适的测量方式和范围。

C.1 设定 $V_{DS} = +3.0\text{ V}$. 通过加上电压 $V_{GS} = -3.0\text{ V}$ 来关断晶体管。等待 1 分钟, 这样晶体管就会关断。在答题纸上写下关断时的电流值 (称为电流剩余值) I_{closed} 。然后, 使得 $V_{GS} = 0$, 开通晶体管, 同时保持 $V_{DS} = +3.0\text{ V}$ 。从打开晶体管的瞬间开始到至少 5 分钟, 测量数据 $I_{DS}(t)$, 它是随着时间而变化的函数, 并记录在答题卡上。 0.8pt

C.2 作图 $I_{DS}(t)$ 。 $I_{DS}(t)$ 是两个随时间变化的 e 指数过程的叠加, 其中一个 RC 电路的时间常数 (τ_2) 比另一个 RC 电路的时间常数 (τ_1) 大很多, 确定较短的时间常数 τ_1 。 1.2pt

D 部分. 反转电路

在微电子电路中, 最重要的电路之一是反转器, 它能够对输入的数字进行反转。例如, 如果 $V_{\text{in}} = \text{high}$, 那么 $V_{\text{out}} = \text{low}$, 反之亦然。晶体管再次被用在这样的电路中, 最简单的设计之一是所谓的公用源 (即源极接地) 放大器, 如图 11 所示, 使用了晶体管和负载电阻 (R_L)。在这种情况下, $V_{\text{in}} = V_{GS}$ 并且 V_{out} 是晶体管的漏极电压。因此, 在这一部分中, 我们将监测 V_{GS} 从 -3 到 0 V 变化的情况下 V_{out} 发生的变化。

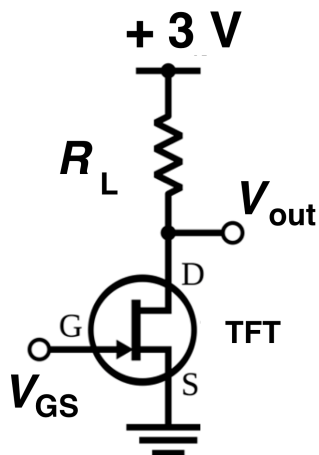
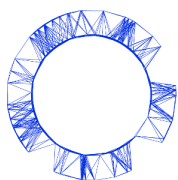


图 11. 公用源 (源极接地) 放大器和反转电路。

在图 11 的装置中，晶体管是纸质 TFT， R_L 是你现在要手工添加的负载电阻，通过将晶体管的漏极与 i_n 极用铅笔划线连接起来，如图 12 所示。当你在纸张上划线时，实际上在纸上沉积了薄薄的导电石墨层，所以你在纸上描的层越多，电阻就会越低。在用铅笔画电阻 R_L 时，一定要持续地监控它的电阻值。为了使 v_{out} 尽可能接近于 0 V，负载电阻应该足够大。因此，在画电阻时，你可以用铅笔画得更重些来减少 R_L 或橡皮擦除来增加它。你的目标应该是获得一个与目标值相差不超过 10

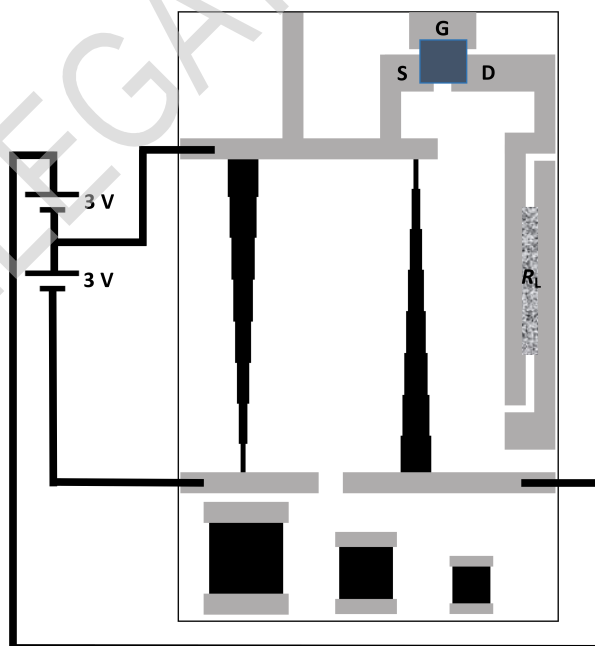
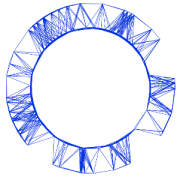


图 12. 用于反转的公用源（源极接地）放大器装置。

使用 HB 铅笔，手工绘制一个具有 $R_L \simeq 200 \text{ k}\Omega$ 的碳电阻器，作为纸薄膜 TFT 的负载电阻，来构建反转电路（见图 12）。

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q1-13

CHN (China)

D.1 在答题卡上写下你测定的 R_L 值。使用碳迹电阻和纸薄膜 TFT 搭建反转电路 (图 12)。 0.5pt
在测量之前, 请记住, 必须通过应用 $V_{GS} = -3\text{ V}$ 来完全关闭晶体管, 并等待大约 1 分钟。然后让 V_{GS} 从 -3 伏到 0V 变化, 测量对应的 V_{out} , 对每一个测量点, 稳定时间大于 100s, 然后读出 V_{out} 。在答题卡上写下测量值。

D.2 绘制出 V_{out} (V_{in}) 电压转移曲线, 并通过数据点画出平滑的趋势。 0.5pt

DELEGATION PRINT