

纸上铅笔痕迹的电学特性

答辩人：汪一帆
指导老师：陈永虎

2019.12.30

一. 介绍

- 基于日常生活中常见的铅笔和纸张，探究手画的铅笔痕迹的相关电学特性和落于实地应用的可能性。

二. 实验与探究

电学特性探究：

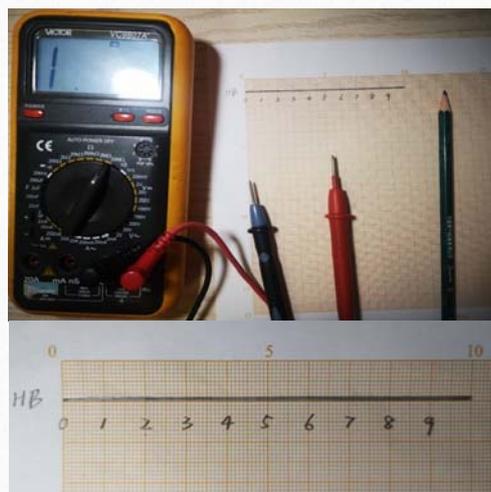
- Part1: 电阻和长度、侧面积关系 (实验一、二)
- Part2: U-I关系 (实验三)
- Part3: 电阻与温度关系
- Part4: 进一步探究电导率特点和以此构造压阻传感器 (实验四)

Part1: 电阻和长度、侧面积关系

实验一：
铅笔轨迹的长度与电阻的关系

实验过程：

用万用表测量不同长度的铅笔痕迹相应的电阻

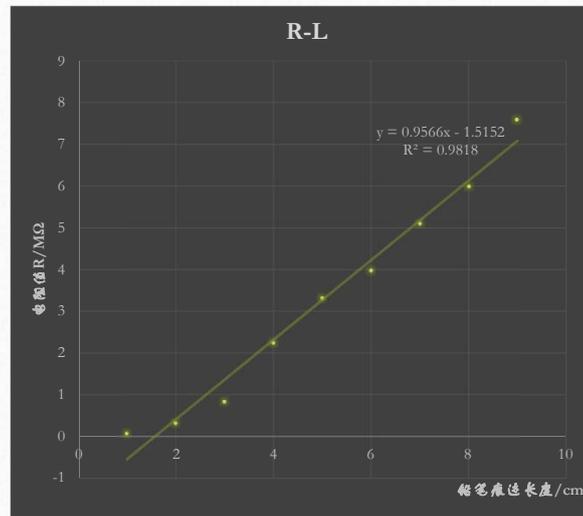


Part1: 电阻和长度、侧面积关系

实验结论

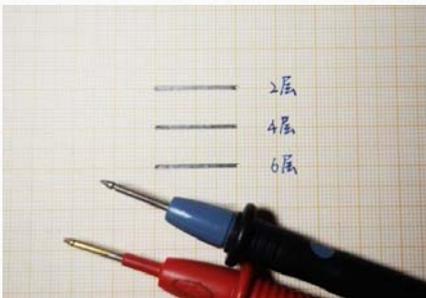
用excel作图如下，线性拟合的 $R^2 = 0.9818$

我们在误差允许的范围内可以认为R与L有一定的线性关系，这也验证了砂床的均匀性。



Part1: 电阻和长度、侧面积关系

实验二： 铅笔痕迹的侧面积S与R值的关系



由 $R = \frac{\rho l}{S}$ ，理论上R会随S的增大而减小，R与S成反比例关系

实验过程：由于铅笔痕迹的厚度非常之小，在没有显微镜的条件下是很难得到其侧面积的大小，所以笔者进行了一个定性实验：画不同层数的铅笔痕迹，尽量保持每次的角度力量相差不大，即不断增加铅笔痕迹的厚度以观察电阻值的变化。

因为层数过大时可能会划破纸层且注意到石墨的粘附有饱和性，层数为1时电阻过大，故而以每两层作为改变量测量了2-6层相对应的三组长长度为2cm的铅笔痕迹电阻值

Part1: 电阻和长度、侧面积关系

实验结论

当我们研究结果时，发现R不出意外地随铅笔痕迹厚度的增加而减小。

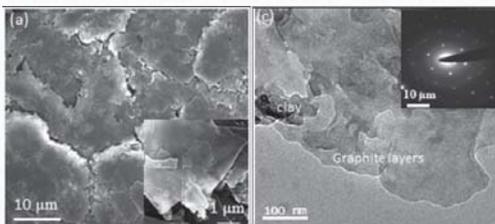
但是我们会发现电阻下降的非常快，（特别是2-4层时）远快于反比例函数，由

$R = \frac{\rho l}{s}$ ，我们可以合理推测是铅笔轨迹的电阻率发生了变化，故笔者继而探究其中原因：

铅笔痕迹层数	R/MΩ
2	12.901
4	2.014
6	1.462

Part1: 电阻和长度、侧面积关系

实验二中R快速减小的原因探究



电子显微镜下铅笔轨迹的图片

- 由图可以看出纸上的铅笔痕迹包含许多边界和边界相互连接的石墨域，域的层性很明显。
- 铅笔迹线的较高电阻率可归因子插入的粘土颗粒对电荷载流子的散射，以及相互连接的石墨域的边缘和边界。

Part1: 电阻和长度、侧面积关系

原因1:

由于粘土颗粒的不均匀散落和石墨域的边界问题使得铅笔轨迹的电阻变化并不特别稳定，这在作者的几轮实验里也有所体现，也可能是电阻突变的部分原因。

原因2:

由所查文章指出：“使用不同压力压制的石墨块中体积密度越高（对应压制压力越大）相应的块状石墨具有更高的导电率。”

故而在这个实验中，我们可以看出重复画线不仅仅改变了铅笔痕迹的厚度，而且由于不断施加压力，使得画线次数多的铅笔痕迹的密度更大，从而提高了其电导率，也就是电阻会比反比例函数下降的更快的部分原因。

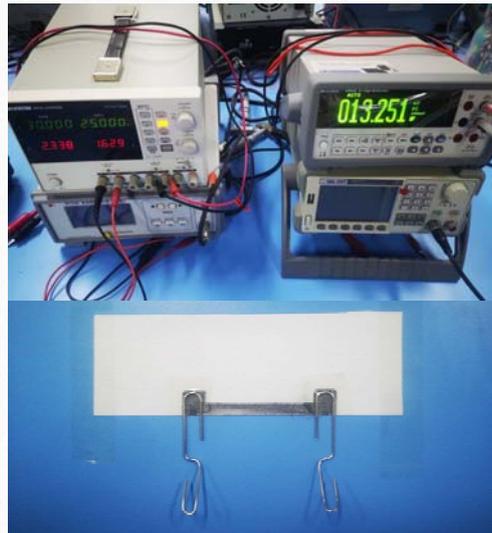
Part2: U-I关系

实验三： 测量铅笔痕迹电阻的U-I曲线

器材：直流电源，数字万用表，6B铅笔，纸片，回形针

实验过程：

固定纸张，为方便测量用回形针引出，改变电压，读出相应电流值

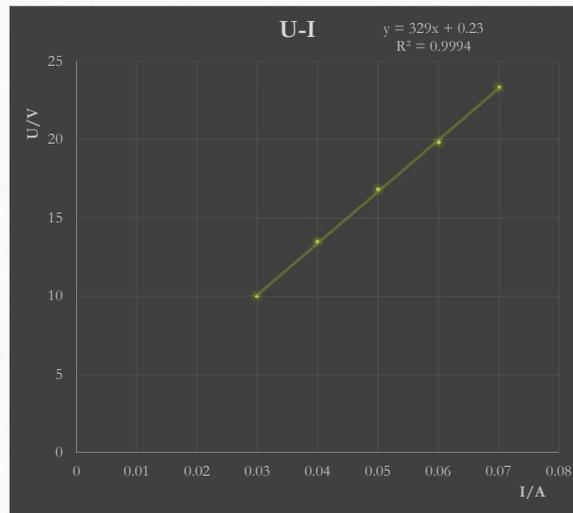


Part2: U-I关系

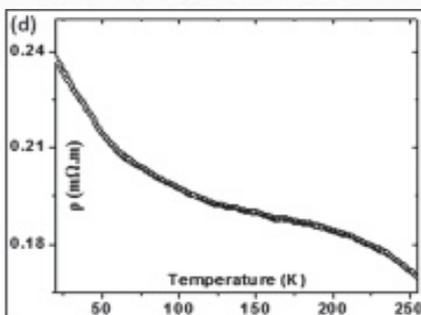
实验结论

用Excel做图如下， $R^2 = 0.9994$

在误差允许的范围我们可以得到：
铅笔痕迹的电阻（常温下）的U和I成
线性关系



Part3: 电阻与温度关系



电阻随温度变化图像

在所查资料中采用物性测量系统(PPMS)进行温度相关电阻率测量

随着温度从20到250k的升高，铅笔痕迹的电阻率从0.24降低到0.17 $m\Omega \cdot m$ ，说明其具有半导体特性。

低温下的I-V数据 displays 了欧姆行为，在较高的温度下(超过100k)，电阻率呈指数下降，这是一个活化运输行为的特征。

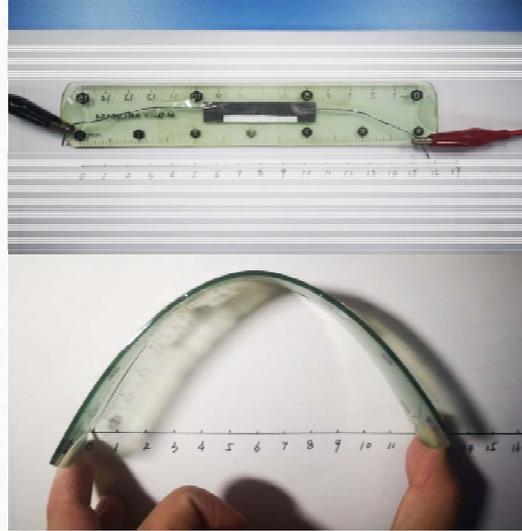
Part4: 进一步探究电导率特点以此构造压阻传感器

实验四： 探究纸上铅笔痕迹受应力时的电阻变化

实验操作：

将涂有铅笔痕迹的纸片平贴在尺子上，两边用金属丝引出便于测量电阻变化。

先测量平铺时铅笔痕迹的电阻大小，然后弯曲尺子使纸片受到一个拉伸的力，读出此时的电阻值，重复这两个步骤，以检验这种电阻改变是否具有可重复性（注：通过控制弯曲后的尺长来控制每次的弯曲程度相同）



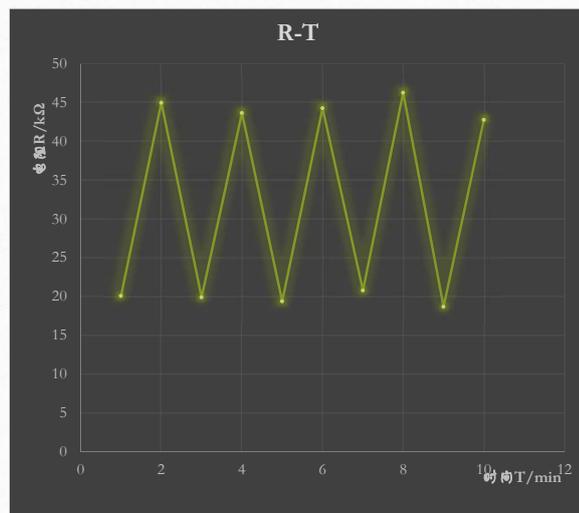
Part4: 进一步探究电导率特点以此构造压阻传感器

实验结论

由图我们可以发现，当施加拉伸应力时，铅笔痕迹显示出电阻峰值，然后在去除应力时迅速恢复至基本电阻。

并且数次弯曲循环后观察到完全可逆的响应。（具有可重复性）

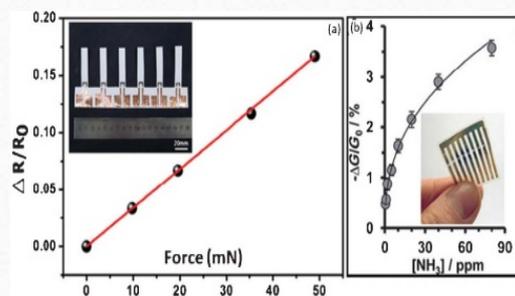
由此我们也就构造出压阻传感器



三. 应用

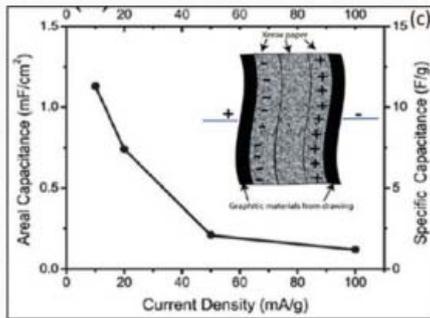
- Part1: 传感元件: 压阻传感器
- Part2: 储能元件: 超级电容器
- Part3: RC滤波器

1. 传感元件: 压阻传感器



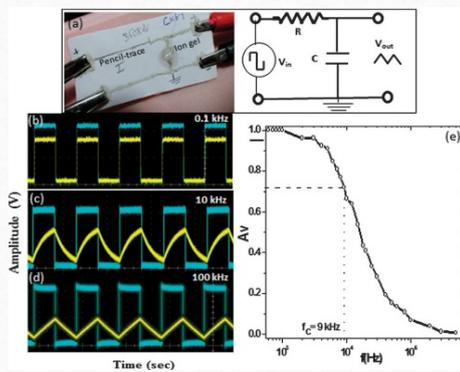
- 将纸剪成悬臂梁状，然后用铅笔在其根部绘图。这条轨迹可以作为一种传感材料，其电阻随悬臂梁上施加的机械应变/应力的变化而变化。
- 该石墨压阻传感器的灵敏度可达50 mN，因此利用这一原理设计了一种基于石墨标记的纸张称重天平。这种简单的纸基压阻器件可以在其他日常环境中应用于力的传感。

2. 储能元件：超级电容器



- 石墨是一种优良的电极材料，可方便地形成电化学双层。纸基板是一种高效的介电分离器，由于多孔性，允许离子种类的快速扩散。在给定的超级电容器的例子中，凝胶电解质被夹在纸上铅笔绘图的两个电极之间。
- 电化学测试结果表明，超级电容器具有高的面积电容(2.3 mF cm)和良好的长期循环性能。结果表明，与普通碳基超级电容器相比，纸制超级电容器的比能和功率密度较为合理。

3. RC滤波器：



- 用铅笔轨迹作为电阻器，用离子凝胶作为电介质
- 电路性能符合RC滤波器的要求：输入频率越高，由于电容电抗的减小，输出幅值越低

四. 研究展望和现存问题

事实上，纸可能并不是一个非常良好的衬底，但鉴于纸张在日常生活中的使用广泛性，纸笔装置的制作不需要任何复杂的设施(无尘室)和高端的制作设备，便利且可回收。

纸面较大的粗糙度、空隙度可以通过涂料来满足。控制铅笔在纸上的剥落是困难的，但也可以通过可调气动控制的绘图仪来实现均匀沉积。

以纸为基础的纸制电子产品可能不是一个遥远的梦想

五. 收获与感悟

整个小论文的探究过程基本上都是以实验的方式展开，大部分的时间也都花在做各种小实验上，在构想中比较简单的实验在实地实现的时候却遇到了很多困难：

从如何得到铅笔痕迹厚度、接触电阻不稳定波动诡异、纸张过于光滑石墨黏附不佳，到找不到合适的实验设备加热、所需测量的数据经常超量程、引出使用从夹子到回形针再到金属丝，一步步更换方式和器材以减少波动误差，也因为选题的开放性做了很多其他方向的实验探索，虽然有一些并没有成功而没被写进小论文里，但在探索的过程中也收获了很多的乐趣。。。

从中我也更感受到了物理是一门实验的科学

六. 参考文献

- [1] Kurra N , Dutta D , Kulkarni G U . Field effect transistors and RC filters from pencil-trace on paper[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2013, 15(21):8367.
- [2] Kurra N , Kulkarni G U . Pencil-on-paper: electronic devices[J]. Lab on a Chip, 2013, 13(15):2866.
- [3] Rattanaweeranon S , Limsuwan P , Thongpool V , et al. Influence of Bulk Graphite Density on Electrical Conductivity[J]. Procedia Engineering, 2012, 32(none):1100-1106.
- [4] Zhang W, Ren Z, Nguyen V, et al. Highly sensitive and flexible strain sensors based on vertical zinc oxide nanowire arrays[J]. 2014, 205(2):164-169.
- [5] Lin C W , Zhao Z , Kim J , et al. Pencil Drawn Strain Gauges and Chemiresistors on Paper[J]. Scientific Reports, 2014, 4.

感谢聆听