

Research on Photo-Varistor Based on Lateral Bipolar Photoresistance Effect

Gao Mingjun

Abstract: At present, there has been research on the lateral bipolar photoresistance effect of various semiconductor materials, which suggests that some semiconductor materials have the potential to be used to prepare a new type of photo-varistor based on the lateral bipolar photoresistance effect. However, further research and optimization of the production process of this type of photo-varistor have not been conducted. This project conducted in-depth research on the production process of this type of photo-varistor. Firstly, I conducted a series of experiments and selected two semiconductor materials with good linearity: one was Ag/SiO₂/Si P-type silicon corroded for 10 minutes, and the other was Ag/SiO₂/Si N-type silicon corroded for 5 minutes. Subsequently, I combine these silicon chips with 3D printing components to create two photo-varistors. Furthermore, I will use the Arduino circuit to monitor the voltage of photo-varistors sensor. This project contributes to the application and commercialization of the photo-varistor based on lateral bipolar photoresistance effect.

Keywords: lateral bipolar photoresistance effect, photo-varistor, sensor

基于双极性电阻效应的光控变阻器的研究

高铭骏

摘要:

目前已有工作对于多种半导体材料的双极性电阻效应进行过研究, 这些研究提示基于双极性电阻效应, 某些半导体材料具有用于制备一种新型的光控变阻器的潜力, 但尚未进一步对该种光控变阻器制作过程进行研究以及优化。本项目展开了对该种光控变阻器的制作过程的深入研究。首先, 我进行了一系列实验, 筛选出了两种线性度较好的半导体材料: 一种是腐蚀了 10 分钟的 Ag/SiO₂/Si P-型硅, 另一种是腐蚀了 5 分钟的 Ag/SiO₂/Si N-型硅。随后, 我使用 3D 打印技术制作了其他组成部件, 并将这些部件分别与两种筛选出来的硅片一起制作成了两种不同灵敏度的变阻器。进一步地, 我采用 Arduino 电路将其制作成为传感器, 并将其应用于微小位移的监测任务。本项目有助于半导体材料的双极性电阻效应在工业界应用以及商业化。

关键词: 双极性电阻效应 变阻器 光控 Ag/SiO₂/Si 位移传感器

目录

一、双极性电阻效应的概念.....	4
二、双极性电阻效应的原理分析（参考文献[2]）.....	4
三、研究的发现与成果.....	5
3.1 通过对制成的14块硅片进行测试，筛选出线性度良好的用于变阻器核心部件的硅片样品.....	5
3.2 制成了线性度好、灵敏度高的变阻器样品雏形.....	6
3.3 制成了微小位移监控器样品雏形。.....	6
四、相关实验与制作的过程.....	6
4.1 半导体材料样品的制作.....	6
4.1.1 清洗半导体材料.....	7
4.1.2 对半导体表面腐蚀.....	7
4.1.3 使用磁控溅射技术进行镀膜.....	8
4.2 半导体样品电阻效应的测试.....	10
4.2.1 第一组测试.....	11
4.2.2 第二组测试.....	12
4.2.4 第四组测试.....	13
4.2.5 第五组测试.....	14
4.2.6 第六组测试.....	14
4.2.7 第七组测试.....	15
4.2.8 第八组测试.....	15
4.2.9 第九组测试.....	16
五、制作半导体变阻器件.....	19
5.1 变阻器件的制作.....	19
5.2 对变阻器的测试：.....	21
5.2.1 将12号样品重新测试后得到了一个较小量程较低灵敏度的变阻器.....	21
5.2.2 将13号样品重新测试后得到了一个大量程高灵敏度的变阻器.....	22
六、应用-基于新型半导体光控变阻器的位移监测传感器.....	24
七、对有关问题的反思与进一步的研究.....	28
7.1 某些细节处理不当.....	28
7.2 需要进一步做细化实验.....	29
7.3 对新发现的现象进行分析.....	29
参考文献.....	30
致谢.....	31

一、双极性电阻效应的概念（参考文献[2]）

光控双极性电阻效应是一种存在于特殊的半导体材料中的独特现象。当激光光点从一段电极沿同一线段移动至另一段电极时，半导体的电阻会随光点位置变化而呈现显著的线性变化。

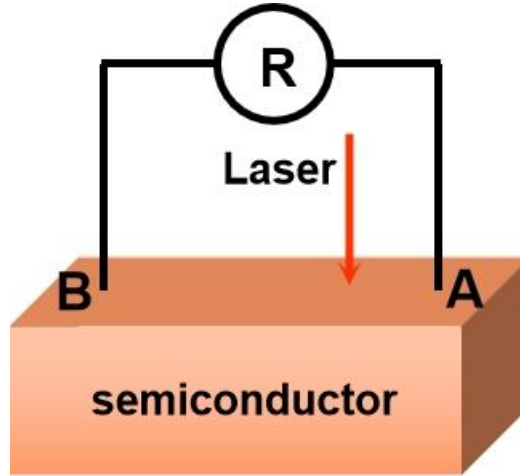


图 1、双极性电阻效应示意图，参考文献[2]

二、双极性电阻效应的原理分析（参考文献[2]）

在激光照射下，激光能够激发半导体中的电子，并有概率使这些电子跃迁至金属层，然后金属层进行扩散。同时，金属层中本身存在的漂移电子也在移动，故在照射点左侧的扩散电子与漂移电子移动方向相反，致使强烈的散射，进而电阻增大，形成高电阻区域。而在照射点右侧，扩散电子与漂移电子移动方向相同，所以能够保持较小电阻。因此，通过计算左侧每点的电阻率与右侧每点的电阻率，并进行定积分即可得到在相应位置的电阻。在激光照射情况下半导体结构的阻值为：

$$R(x) = R_0(1 + Kx) \quad (-L < x < L) \quad (1)$$

此处 K 为半导体结构本身的比例系数，为：

$$K = \frac{n_0 e^{-L/l}}{N_0 L} \quad (2)$$

其中： N_0 为漂移电子浓度， L 为中点至一端电极的距离， l 是电子扩散长度， n_0 为激光照射处电子浓度。这里也体现了电阻的变化是遵守线性变化趋势的。

三、研究的发现与成果

上海交通大学王辉教授实验室等已对多种半导体材料的双极型电阻效应进行过研究，且提到可以据此制成一种新型的光控的变阻器，但尚未进一步对该种光控变阻器制作过程进行研究。本文首先复现了不同半导体材料中的双极性电阻效应，并且在此基础上得出了最适合制备光控变阻器的材料，最后由此展开了对光控变阻器制作过程的研究。

3.1 通过对制成的 14 块硅片进行测试，筛选出线性度良好的用于变阻器核心部件的硅片样品

为了研究各种半导体材料对于其电阻效应的影响（主要类型为裸硅、多孔硅、Ag/Si 型表面镀银半导体、以及 Ag/SiO₂/Si 的 MOS 半导体材料），制备了如下 14 种硅片进行测试，包括：

- （1）P 型裸硅
- （2）N 型裸硅
- （3）腐蚀 5 分钟的 P 型多孔硅
- （4）腐蚀 10 分钟的 P 型多孔硅
- （5）腐蚀 5 分钟的 N 型多孔硅
- （6）腐蚀 10 分钟的 N 型多孔硅
- （7）腐蚀 5 分钟的 Ag/Si P 型
- （8）腐蚀 5 分钟的 Ag/Si N 型
- （9）腐蚀 10 分钟的 Ag/Si P 型
- （10）腐蚀 10 分钟的 Ag/Si N 型
- （11）腐蚀 5 分钟的 Ag/SiO₂/Si P 型
- （12）腐蚀 5 分钟的 Ag/SiO₂/Si N 型

(13) 腐蚀 10 分钟的 Ag/SiO₂/Si P 型

(14) 腐蚀 10 分钟的 Ag/SiO₂/Si N 型

检测发现，有 3 块样品两极间呈现良好的线性度，其中具有最佳线性度的是 13 号样品，即腐蚀 10 分钟的 Ag/SiO₂/Si P-型硅，其灵敏度可达每毫米 3.08KΩ。

有 2 块样品损坏，其余样品两极间电阻的变化并不体现显著的线性关系，甚至是非线性的。

3.2 制成了线性度好、灵敏度高的变阻器样品雏形

从上述 3 块线性度比较好的样品中选了2块作为制作变阻器的核心部件。然后我设计了变阻器的其他部件，将其用 3D 打印机打印出来，且将这些部件和硅片样品组装在了一起，并进行了测试，成功制得了两种光控的变阻器样品雏形。一种是较小量程较低灵敏度变阻器（腐蚀 10 分钟的 Ag/SiO₂/Si P-型硅结构的变阻器，量程在 1.3331KΩ-1.95KΩ，灵敏度为 0.4429 KΩ/mm）。另一种是大量程高灵敏度变阻器（腐蚀 10 分钟的 Ag/SiO₂/Si P-型硅结构电阻变阻器，量程在 133.31KΩ-149.03KΩ，灵敏度为 8.274 KΩ/mm）。

3.3 制成了微小位移监控器样品雏形。

基于制备出的光控变阻器，依据光控电阻变化呈线性化的特征，我增加了模数转换电路和转换算法，并采用 Arduino 制作完成了完整的位移监测传感器样品。由于整个装置体积小，后续如果采用工业封装，可以进一步提高集成度。

四、相关实验与制作的过程

4.1 半导体材料样品的制作（可跳过）

实验的第一步是准备好测试的样品，拟制备多孔硅作为基础材料，并涂覆金属膜（Ag），具体的样品制作流程如下：

4.1.1 清洗半导体材料

需要首先对硅片进行预处理，用镊子夹住棉花并且沾上丙酮擦洗硅片表面，去除工业胶水和一些表面氧化层。预处理之后，便开始正式清理。

首先便是清洗硅片，具体操作的时候，清洗步骤是：

- 1) 用棉花和乙醇对硅片表面进行预处理；
- 2) 将处理好的硅片放入烧杯，加丙酮，进行 20 分钟超声波清洗；
- 3) 倒掉丙酮，倒入乙醇，并且进行 20 分钟超声波清洗。

该操作也可以很好地清洗硅片，于是我便依此顺序将 14 片硅片进行了清洗。



图 2、硅片放置在乙醇中

4.1.2 对半导体表面腐蚀



图 3、制作多孔硅的腐蚀装置

清洗之后，是对半导体表面的腐蚀环节。与之前参考文献有所不同，这次首先调配试剂。试剂由 4g 氟化铵、30mL 等离子水、80mL 乙醇、70mL 磷酸组成。首先将氟化铵从冰柜中拿出，并用勺子将固体状氟化铵取出，再加入 30mL

的等离子水进行溶解（加入等离子水能有效加速溶解速度）。溶解后再倒入乙醇进行溶解，溶解后再倒入磷酸进行溶解，充分溶解后即制得到了一瓶无色的测试试剂。

接下来，在制备过程中，我需要将试剂倒入如图 3 所示的槽中。一端插上石墨片并连接导线，用作阴极。在另一端，使用带导线的金属夹夹住半导体样品，并将样品的 1/3 插入试剂中，作为阳极。这个步骤旨在通过电离过程来腐蚀硅片表面，制成多孔硅结构。在电离过程中，我可以控制输出电压，此实验通过调节电压将电流控制在 0.1A，并且成功制成腐蚀 5 分钟和腐蚀 10 分钟两种硅片。有趣的是，我观察到 P 型硅通常需要更长的时间才能使装置达到 0.1A 的电流输出，而 N 型硅通常在刚施加电压时就能激发出 0.1A 的电流输出。这个发现非常引人注目，可能与材料性质有关。

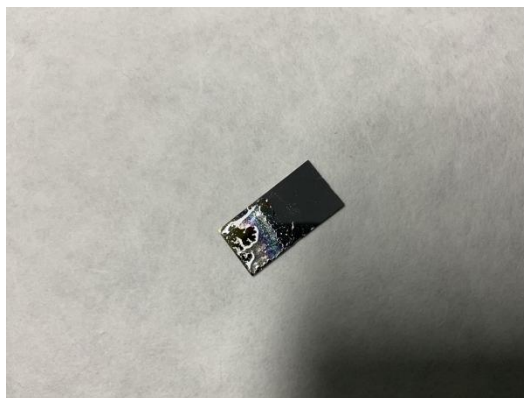


图 4、腐蚀后未吹干的半导体硅片

4.1.3 使用磁控溅射技术进行镀膜

接下来的镀膜采用直流磁控溅射，这是目前在半导体表面镀金属薄膜的一种较为先进的技术之一。该技术具有多项优点，包括底座表面温度低、制膜效率高以及薄膜厚度均匀等。其主要镀膜原理是通过惰性气体阳离子将金属原材料氩气阳离子向目标材料加速运动，轰击负极处的靶材，在高速碰撞下使靶材的原子飞出其表面，形成溅射。镀膜步骤如下：

开机：

- (1) 打开总电源。
- (2) 打开水泵电源。

- (3) 打开机械泵和低真空计。
- (4) 缓慢开启 V6, 压力降到 20pa 后关闭 V6。
- (5) 开启电磁阀, 开启分子泵。
- (6) 打开闸板阀。

溅射:

- (1) 关闭电离规。
- (2) 开进气阀(V4,V5)。
- (3) 抽到 9×10^{-4} pa 时, 关闭闸板阀。
- (4) 开启瓶处减压阀, 然后开启体流量计。
- (5) 调节闸板阀, 使气压恒定为 0.7pa。
- (6) 开直流电源溅射。
- (7) 转动基片与靶材对应位置, 控制时间。

靶子的外壳与靶材的距离为 2-3mm, 绝对不能接触, 否则短路。

分子泵开启顺序: 先开 on/off 按钮, 按键 FUNC DATA 置零, 然后按钮 START。

溅射的详细步骤:

压力降到 5×10^{-4} pa 后关闭气瓶处减压阀。

对气体流量计供电。

关闭高真空计后打开氩气进气阀。

气体流量计打到除气(清洗)档。

压力降到 10^{-1} pa 后, 打开高真空计。

压力降到 10^{-4} pa 后, 气体流量计打到关闭档(关闭高真空计)。

调节气瓶处减压阀(0.1-0.15Mpa)。

气体流量计打到阀控档, 调节流速(10-13)。

关闭闸板阀到一定程度。

此外, 还需要控制溅射的时间, 在此次实验中, Ag 薄膜溅射时间为 8 秒, 而 Si O₂ 氧化层溅射时间为一分钟左右, 这些是经验值, 是向实验室其他成员请教得来的。最后, 在溅射过程中, 通过电脑程序移动标靶进行溅射。

本项目中准备了 14 片半导体硅片，第一步，对 1 号~14 号硅片进行清洗，其中 1 号和 2 号样品用于对照基准。第二步，对 3 号~14 号共 12 片硅进行 5 分钟或 10 分钟的腐蚀操作。第三步，对 7 号~14 号共 8 片硅镀上不同的金属薄膜。于是便制备得到了之前列出的 14 片不同结构的半导体。

4.2 半导体样品电阻效应的测试

在制备好全部 14 片半导体结构后，我便开始搭建装置准备测量这 14 片硅分别的双极性电阻效应。使用特定波长的激光在一片样品上测试不同功率对于样品的灵敏度的影响。实验方法如下：精密滑台移动激光，记录每一片样品的电子扩散长度和电阻的变化。

实验操作首先需要将半导体样品接上电极，这里我选择使用钢进行操作。在已有的钢丝上切下一小块钢点，使用牙签将钢点粘在半导体样品上，并且保持两钢点距离不过远。然后将头部刮好其能够导电的铜线压在钢点上。之后再切下两块钢点，并将钢点压在铜线之上，相当于是夹住了两铜线，制成两电极。最后将铜线连到测量电阻的万用表仪器电路中，便能完成测量操作，如图 5 所示。

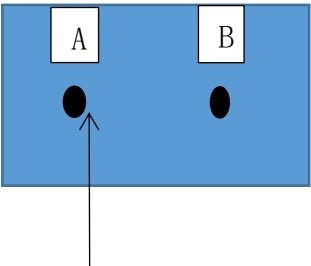


图 5、测试实验示意图

这里，蓝色矩形代半导体样品，箭头代表激光器的光束，而两个圆点则是分别代表两个电极。而激光则是在 AB 线段上自 A 向 B 移动，并且记录下电阻变化的数值。

此外，整体装置如图 6 所示：

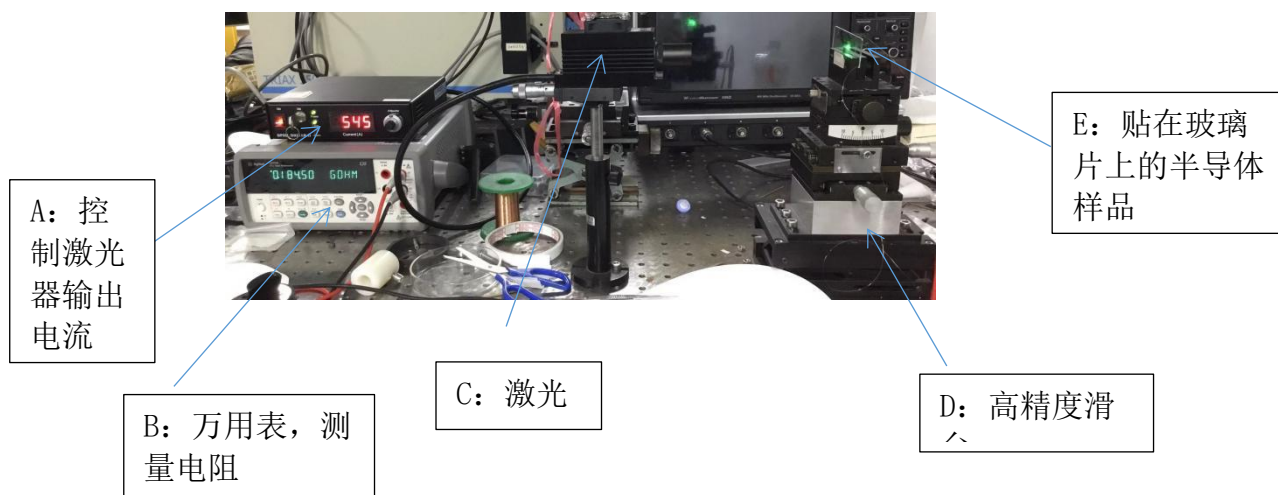


图 6、实验设备实物图

而后, 我在一些得到特殊规律的材料后进行了简要概述, 从中得出的主要规律和结论则主要在第九组实验分析中。最后, 我对所有测试在表中进行了总结。

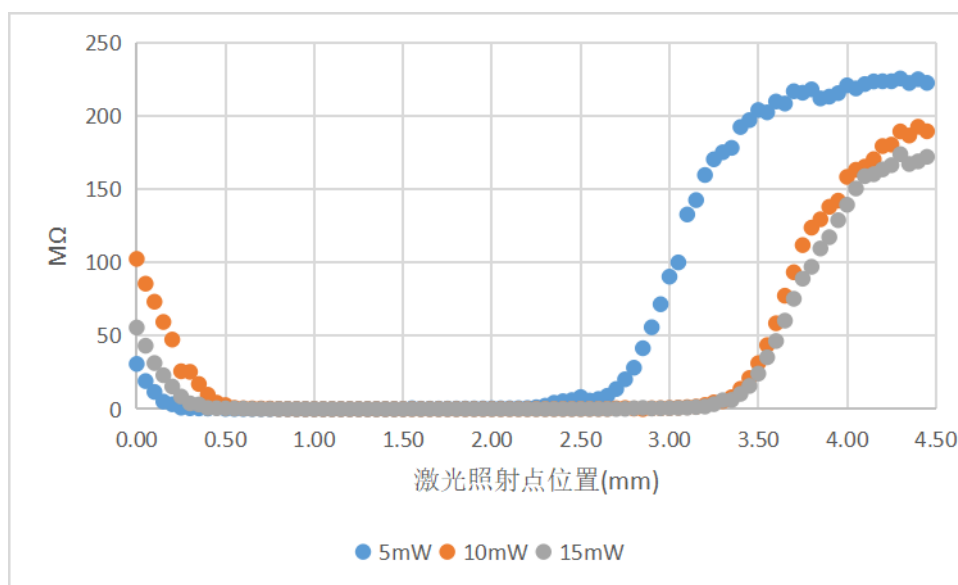
4.2.1 第一组测试

时间: 2021 年 12 月 9 号下午 16: 30-21: 00

编号: 样品 4 (腐蚀 10 分钟的多孔 P 型硅)

电极位置: 0.5mm 处到 2.5mm 处。

目的: 测量的是在同一种材料下不同功率的激光对电阻灵敏度的影响, 测得的数据如下:



从实验结果来看，在两电极中间激光器的位移带来的电阻变化不大。这很有可能是因为两电极距离过大，并没有达到远小于电子扩散长度的要求。基于俞崇祺的论文中，激光功率增大，灵敏度也会相应增大，但在到达一定程度后（约 10mW）灵敏度变化并不明显。因此为了减少激光功率对测试结果的影响，本研究的后续测试中的激光功率均采用 15mW。

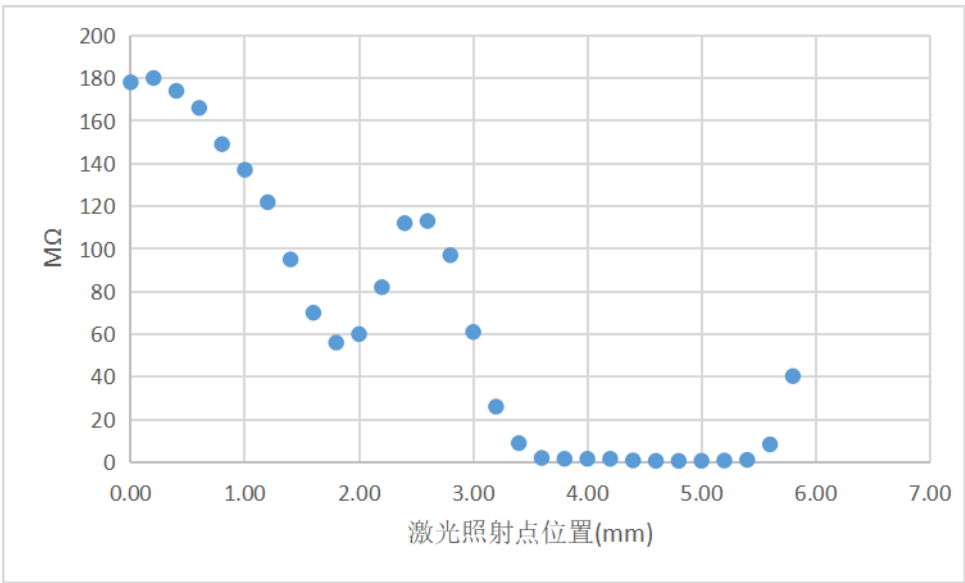
4.2.2 第二组测试

时间：2021 年 12 月 9 号下午 16：30-21：00

编号：1 号样品（P-型裸硅）

电极位置：0.8mm 和 3.2mm 处。

目的：测量此结构的双极性电阻效应。获得以下数据：



这次实验发现了在中间处电阻随照射点位移向上呈线性增大的部分，并不符合线性的情况。这种情况尚未在前人的论文中提到过。

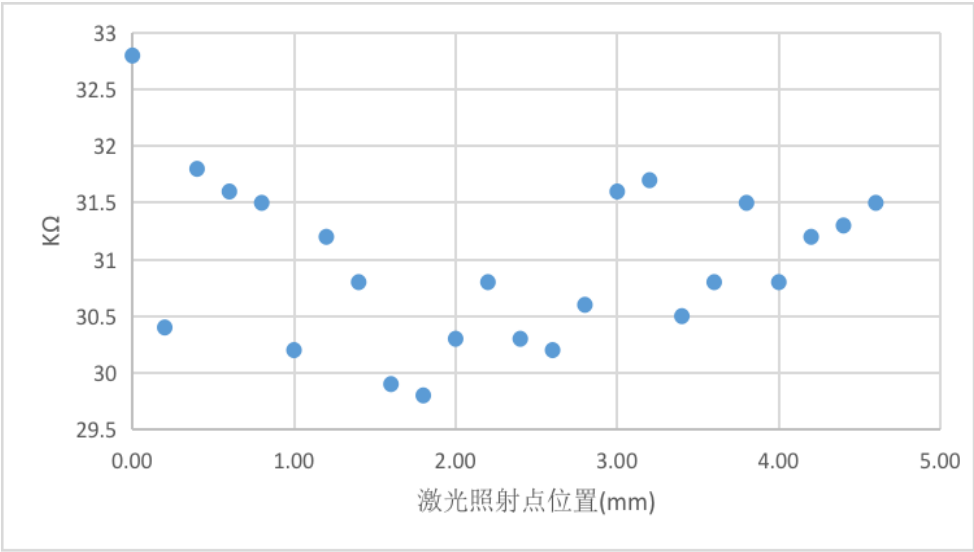
4.2.3 第三组测试

时间：2021 年 12 月 9 号下午 16：30-21：00

编号：2 号样品（N-型裸硅）

电极位置： 1mm 处和 3mm 处。

目的：测量此结构的双极性电阻效应。获得以下数据：



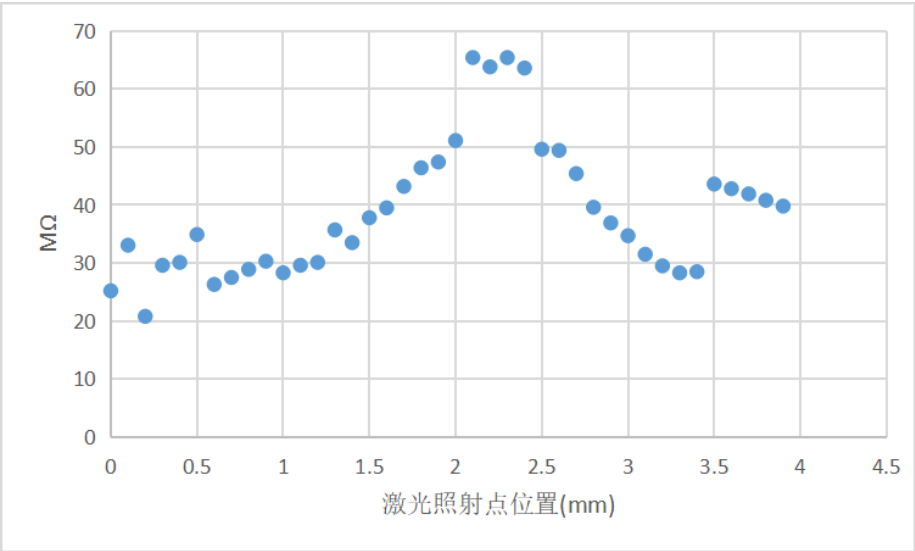
4.2.4 第四组测试

时间：2021 年 12 月 9 号下午 16：30-21：00

编号：7 号样品（腐蚀 5 分钟的 Ag/Si 的 P-型硅）

电极位置： 1.5mm 处和 3mm 处。

目的：测量此结构的双极性电阻效应。获得以下数据：

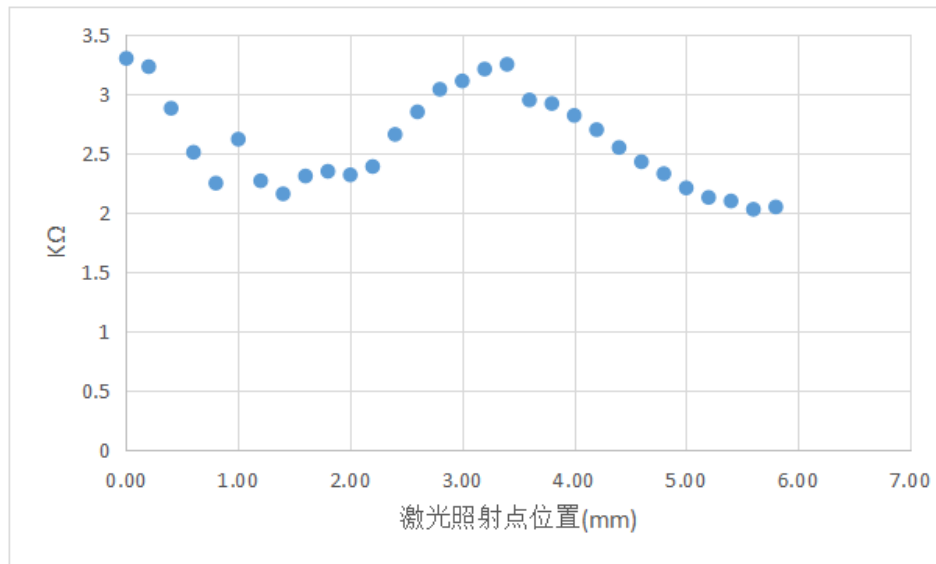


4.2.5 第五组测试

时间：2021 年 12 月 9 号下午 16: 30-21: 00

编号：8 号样品（腐蚀 5 分钟的 Ag/Si 的 N-型硅）

电极位置： 2mm 和 3.5mm 处。

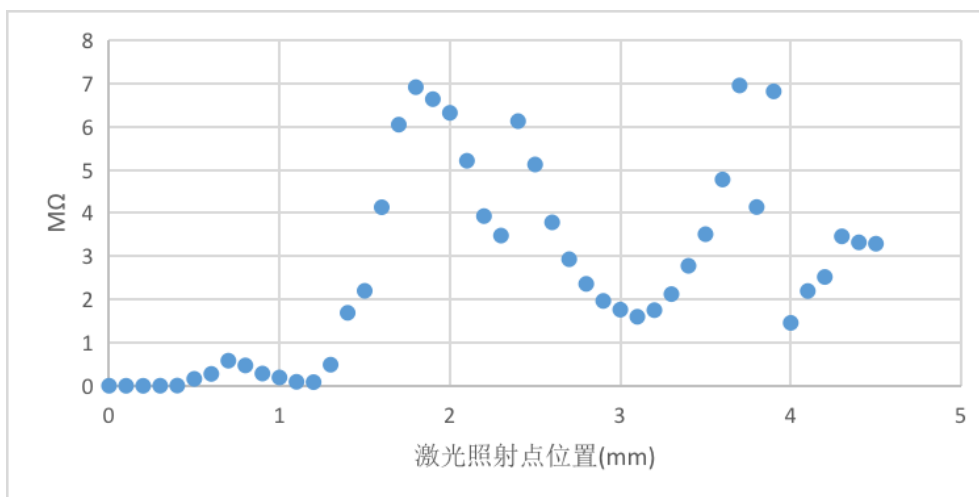


4.2.6 第六组测试

时间：2021 年 12 月 10 号下午 16: 00-20:00

编号：9 号样品（腐蚀 10 分钟的 Ag/Si 的 P-型硅）

电极位置： 分别处于 1.3mm 处和 3mm 处。



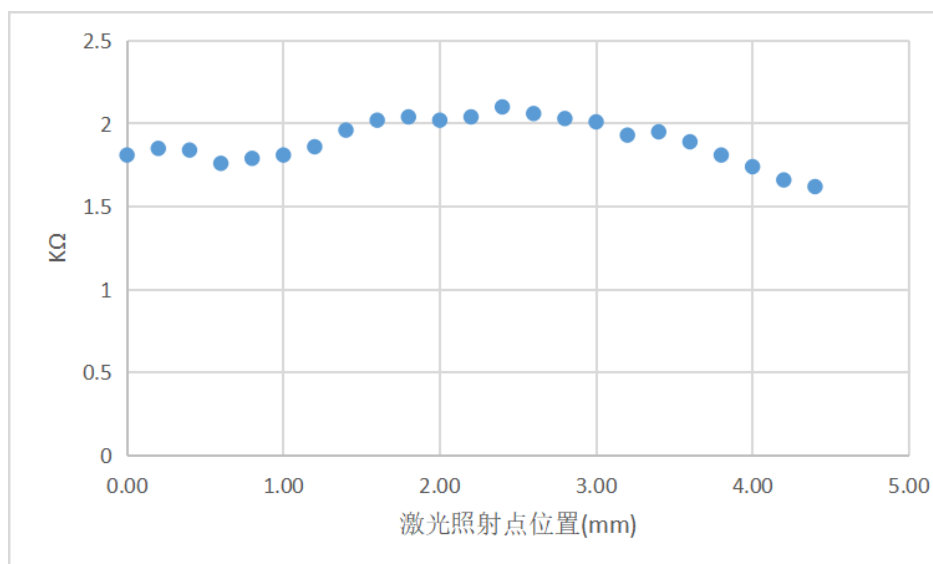
4.2.7 第七组测试

时间：2021 年 12 月 10 号下午 16: 00-20: 00

编号：10 号样品（腐蚀 10 分钟的 Ag/Si 的 N-型硅）

电极位置：电极放置在 0mm 处和 2mm 处。

目的：测量此结构的双极性电阻效应。获得以下数据：



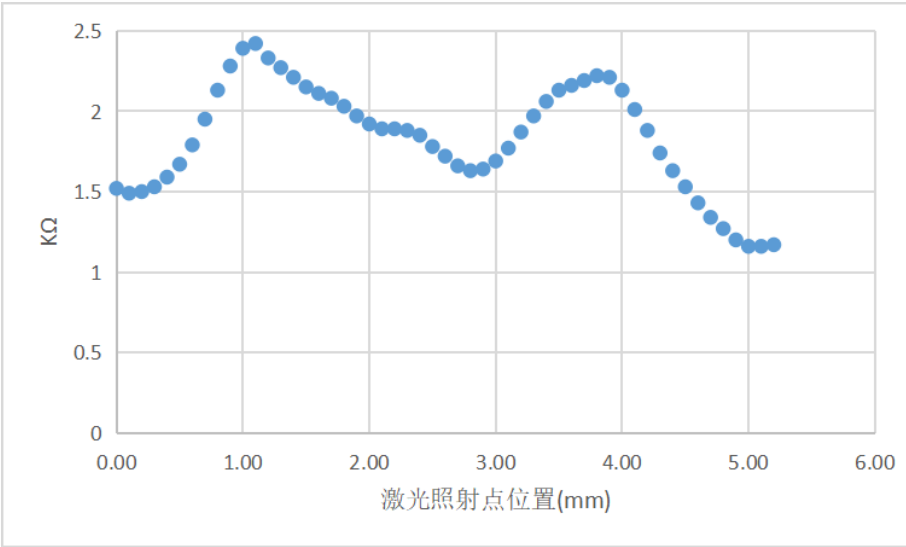
4.2.8 第八组测试

时间：2021 年 12 月 10 号下午 16: 00-20: 00

编号：12 号样品（N-型的 Ag/SiO₂/Si）

电极位置：1mm 处和 2.8mm 处。

目的：测量此 MOS 结构的双极性电阻效应。获得以下数据：



在这种MOS结构中，在两电极之间发现了极强的线性变化。不过有意思的是在中间2.1mm-2.3mm处有一小部份的非线性区域，而造成这种非线性区的很有可能是1.8mm的较大电极距离。其余部分则与参考文献2所得规律相同。

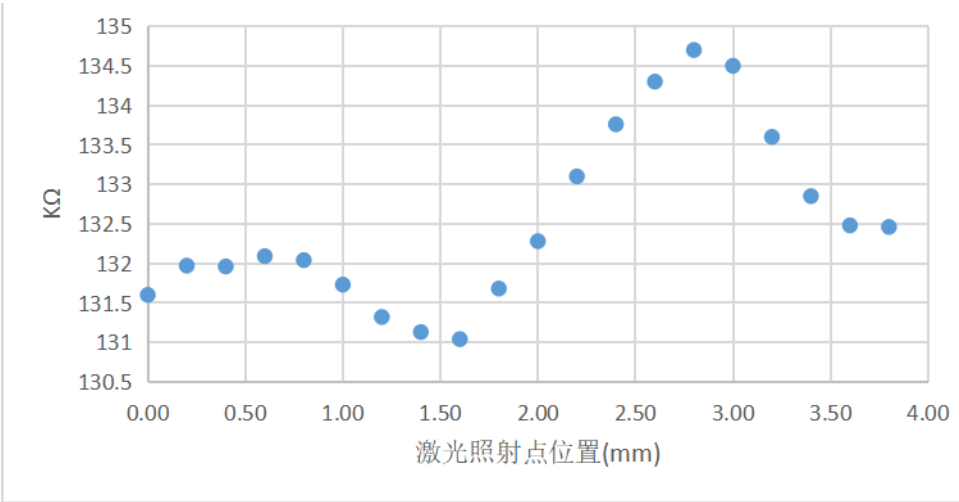
4.2.9 第九组测试

时间：2021 年 12 月 10 号下午 16：00-20：00

编号：13 号样品（腐蚀 10 分钟的 Ag/SiO₂/Si P 型硅）

电极位置：电极安装在 1.5mm 处和 2.8mm 处。

目的：测量此 MOS 结构的双极性电阻效应。获得以下数据：



分析：在这腐蚀 10 分钟的 Ag/SiO₂/Si 的 P-型硅结构中，发现了极强的线性度，而且它的灵敏度也比腐蚀 10 分钟的 Ag/SiO₂/Si N-型硅结构大。**MOS 结构线性度强很有可能是因为其扩散长度较长，因而如公式（2）所示在 1.5mm-2mm 左右的电极距离时电阻变化相对其他结构能更好地近似为线性。而其他结构因扩散长度更小，载流子扩散至另一电极便造成了非线性的电阻变化。其次，这次实验发整体现这种 N-型裸硅变化比 P-型硅小，且并没有线性关系，这也是在参考文献中并没有探讨的问题。**

11号样品和14号样品表面有一定面积因实验操作不当而产生的污染，表面镀层有部分损坏，因此没有测量。

趋势分析与总结：

序号	样品编号	电极位置	分析
第一组	样品4（腐蚀10分钟的多孔P型硅）	电极位置： 左侧电极在 0.5mm 处， 而右侧电极在 2.5mm 处。	从实验结果来看，不难得出在两电极中间激光器的位移带来的电阻变化不大。这可能是因为两电极距离过大，并没有达到远小于电子扩散长度的要求。就结果来看，并不能区分哪种功率对于半导体样品的灵敏度变化最大。
第二组	1号样品（P-型裸硅）	电极位置： 两电极分别在 0.8mm 处和 3.2mm 处。。	这次实验发现了在中间处电阻随照射点位移向上呈线性增大的部分，并不符合线性的情况。这种情况在前人发表的论文中没有被提及过。
第三组	2号样品（N-型裸硅）	两电极分别在 1mm 处和 3mm处。	这次实验发现这种N-型裸硅变化极小，且没有线性关系，呈现的是一个整体的非线性区。这可能是因为测量时硅片摆放的位置有点歪，所以激光行走的路线并不与两电极所连成的线段相符，也可能是因为在裸硅中，双极性电阻效应本身不强。

第四组	7号样品（腐蚀5分钟的Ag/Si的P-型硅）	两电极分别在1.5mm处和3mm处。	这里没有出现基本的连贯线性趋势，而是在先线性增大后经过一段非线性区再线性下降。虽然基本符合线性关系，却不是呈一直增或一直减的趋势。总结来看，这次有意将两电极距离减小，却仍然没有呈现出线性关系，有可能是因为两电极距离仍然过大。
第五组	8号样品（腐蚀5分钟的Ag/Si的N-型硅）	两电极分别处于2mm和3.5mm处。	虽然并没有调小两电极距离，但是仍然可以观测到一条基本呈线性趋势增长的线。
第六组	9号样品（腐蚀10分钟的Ag/Si的P-型硅）	分别处于1.3mm处和3mm处。	这次在最初的线性增长后却和Ag/Si硅片一样呈现出一段非线性区后线性递减。
第七组	10号样品（腐蚀10分钟的Ag/Si的N-型硅）	电极放置在0mm处和2mm处。	虽然电阻有一定的线性上升趋势，但是整体电阻变化不大。
第八组	12号样品（N-型的Ag/SiO ₂ /Si）	电极在1mm处和2.8mm处。	在这种金属-氧化层-半导体结构中，在两电极之间发现了极强的线性变化。不过有意思的是在中间2.1mm-2.3mm处有一小部份的非线性区域，而造成这种非线性区的很有可能是1.8mm的较大电极距离。
第九组	13号样品（腐蚀10分钟的Ag/SiO ₂ /Si P型硅）	电极安装在1.5mm处和2.8mm处。	在这腐蚀10分钟的Ag/SiO ₂ /Si的P-型硅结构中，发现了极强的线性度，而且它的灵敏度也相对于腐蚀10分钟的Ag/SiO ₂ /Si N-型硅结构大。

从以上测试结果来看，我在8号、12号和13号样品中发现了两电极之间的电阻呈现良好的线性关系。

后续我将上述获得的三块灵敏度符合要求的样品，作为基本组件，制成了变阻器。

五、制作半导体变阻器件

5.1 变阻器件的制作

为了制作一个便携式的小型变阻器，我决定不使用实验室中多功能、体积较大且成本较高的激光器。相反，我购置了一批波长与实验室所用相同的小型激光器，其头部直径仅为 1 厘米，长度为 2.6 厘米。同时，我也为了精简设备，购置了一台小型的精细滑台。这些小型设备的使用旨在提高便携性，降低成本，并使我能够在更小的空间中进行实验。

为了连接滑台和半导体样品，我设计了如下的 3D 装置，并且借助 3D 打印机完成制作，这个装置长 63mm，宽 50mm，高 43mm。如图 7 所示：

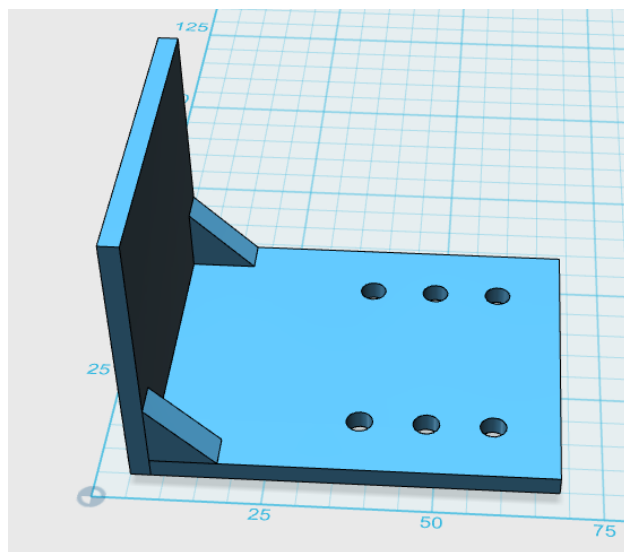


图 7、支架的 3D 图形

为了连接滑台和激光器，我还设计了另外一个 3D 装置，这个装置长 40mm，宽 30mm，厚度 3mm，如图 8 所示：

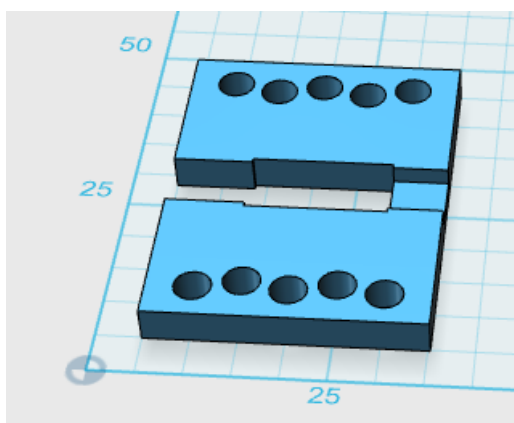


图 8、激光器连接板的 3D 图形

制作过程中，遇到一个问题，就是怎样对硅片进行固定。由于硅片非常脆弱，且无法长时间暴露在空气之中，同时需要小心使用镊子移动，另外，用镊子夹住的铜线容易脱落，因此我需要想办法来稳定硅片和铜线。我的解决方法是将硅片和铜线夹在两块清洗过的玻璃片中间，这样既不影响激光的照射，也能够将样品固定住。操作时，首先将一块样品放置在一块玻璃片上，用镊子夹好铜线后使用胶带将铜线固定住，保证铜线在操作的过程中不会掉。然后用第二片玻璃片盖在样品上，并且用胶水粘住两块玻璃片（注意，胶水不会接触到半导体）。如图 9 所示。

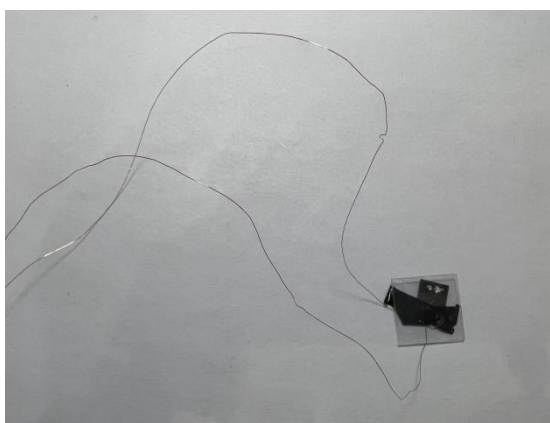


图 9、用玻璃片固定的硅片实物图

该方案仅是样品方案，我查阅资料后认为，后续可以采用带玻璃窗的工业封装，这样就能不仅能使其更加牢固，还可以进一步缩小体积。

将以上几个部件连接在一起，完整的半导体变阻器装置雏形便完成了，如图 10 所示。

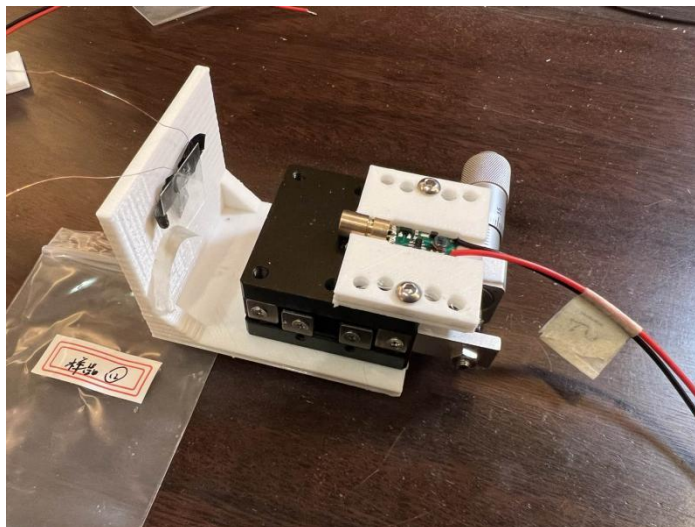


图 10、半导体变阻器装置雏形

5.2 对变阻器的测试：

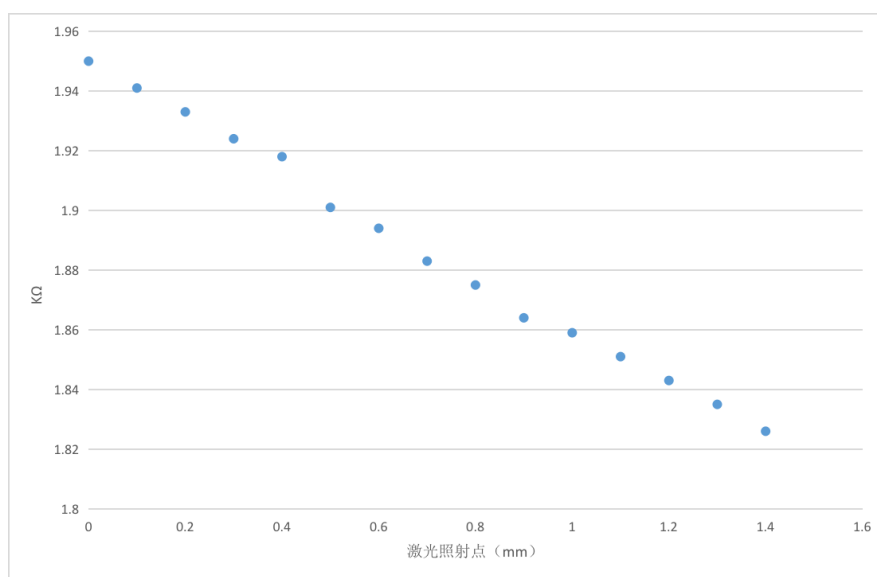
将 12 号样品后和 13 号样品分别测试，则制得了两种量程和灵敏度的变阻器，一个较小量程较低灵敏度，一个大量程高灵敏度。

5.2.1 将 12 号样品重新测试后得到了一个较小量程较低灵敏度的变阻器

具体测试数据如下：

激光点位移	两电极间电阻值 (K Ω)
0	1.95
0.1	1.941
0.2	1.933
0.3	1.924
0.4	1.918
0.5	1.901
0.6	1.894
0.7	1.883

0.8	1.875
0.9	1.864
1	1.859
1.1	1.851
1.2	1.843
1.3	1.835
1.4	1.826



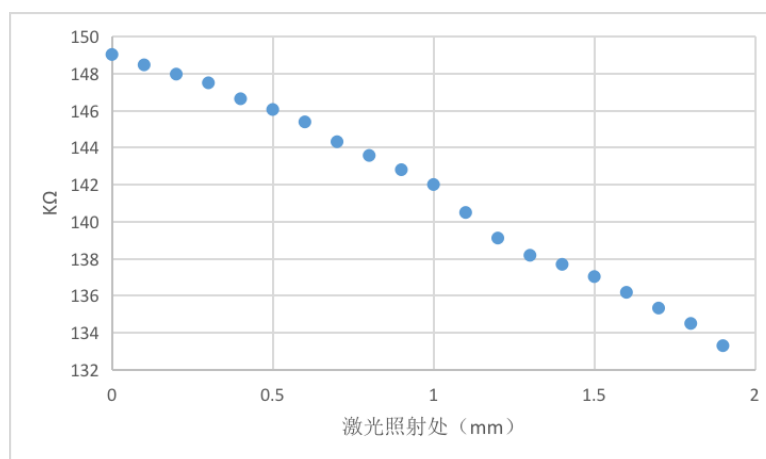
为了使线性度变得更好，我减小了两电极间的距离，如上测试结果显示，确实线性度比较好，而且原本有的非线性区现在也消失了。这里使用的两电极位置分别是 0mm 处和 1.4mm 处。这个腐蚀 10 分钟的 Ag/SiO₂/Si P-型硅结构的电阻量程在 1.33KΩ-1.95KΩ，灵敏度为 0.44KΩ/mm。

5.2.2 将 13 号样品重新测试后得到了一个大量程高灵敏度的变阻器

具体测试数据如下：

激光点位移	两电极间电阻值 (KΩ)
0	149.03
0.1	148.47
0.2	147.97

0.3	147.5
0.4	146.64
0.5	146.06
0.6	145.39
0.7	144.32
0.8	143.58
0.9	142.81
1	142.01
1.1	140.5
1.2	139.12
1.3	138.19
1.4	137.7
1.5	137.04
1.6	136.19
1.7	135.34
1.8	134.51
1.9	133.31



这个腐蚀 10 分钟的 $\text{Ag/SiO}_2/\text{Si}$ P-型硅结构的两个电极分别在 0mm 处和 1.9mm 处，电阻量程在 $133.31\text{K}\Omega$ - $149.03\text{K}\Omega$ ，灵敏度为 $8.27\text{K}\Omega/\text{mm}$ 。

从实验结果来看，装置的玻璃盖板并没有影响激光照射的功率，对样品的双极性电阻效应没有影响。

六、应用-基于新型半导体光控变阻器的位移监测传感器

基于该光控变阻器基于激光点照射位置的高灵敏度和大量程的线性的变化特征，可应用于微小位移的监测，制成微小位移监测的传感器。既可以作为实物尺寸差异的检测，从而广泛应用于精密器件的公差质量监控；也可以作为机械位移的监测，应用在各种因应力、机械振动等导致微小位移的领域。

我拟增加模数转换电路来进一步自动控制位移。

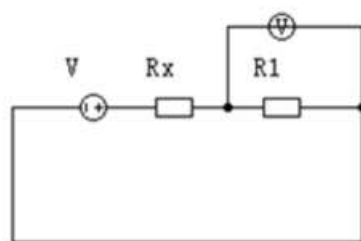


图 11、电阻分压电路图

其中， V 代表了总电压，而 R_x 这里则是我要求得的光控变阻器的阻值，而 R_1 则是一个设定的阻值，测量出 R_1 的电压值，就能求得 R_x 阻值。表达式为：

$$R_x = \frac{R_1(V - V_1)}{V_1} \quad (3)$$

基于本次制作的光控变阻器的阻值高，可以用 Arduino 中的模拟量管脚来读取，成本很低。并根据之前实验仪器标定的半导体变阻器件的斜率参数，计算输出激光点的相对位移。

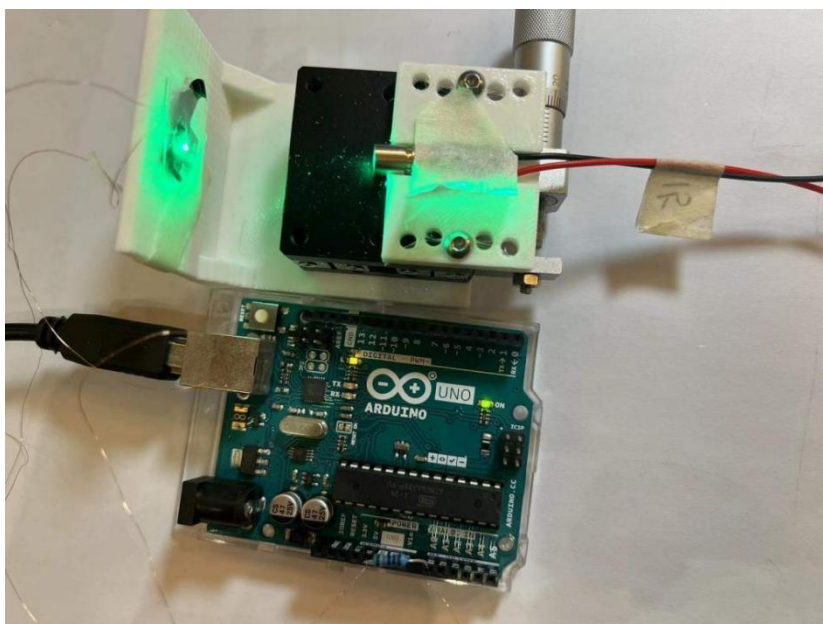


图 12、采用了 Arduino 作为信号监测

本次实验采用了样品 13（腐蚀 10 分钟的 Ag/SiO₂/Si P-型硅结构）。从 5.5.2 所绘制的线性数据做出了最优直线，电阻的表达式为：

$$R(x) = -8.273684x + 149.03 \quad (0 \leq x \leq 1.9) \quad (4)$$

其中 x 为位移，并且以 mm 为单位，而 R(x) 则是表示电阻，且以 KΩ 为单位。

位移的表达式：

$$x = \frac{(R-149.03)}{-8.273684} \quad (133.31 \leq R \leq 149.03) \quad (5)$$

对应到 Arduino 的函数 resistorx() 如下（根据测量电压值计算出半导体变阻器当前电阻值）：

```
double resistorx(double R1, int V1){
double Rx=0;
if(V1!=0){
Rx = (1023-V1)*R1/V1;
}
```

```
return Rx;  
}
```

函数 `resistor2position()` 根据电阻值计算出位移。

```
double resistor2position(double y){  
double x=0;  
double a=-8.273684;  
double b = 149.03;  
x = (y-b)/a;  
return x;  
}
```

而这里电路中我所选用的总电压为 5V，在 Arduino 中 1023 则代表了 5V 电压，输入的参数 R1 和 V 也和公式相对应。

在 Arduino 的 loop 循环中用 `analogRead()` 读取输入测量电压，再调用前面两个函数计算出位移的变化，而给出的位移数据则是以 mm 为单位。

```
void setup() {  
  //打开 arduino 板和计算机的串口连接，初始化波特率默认 9600  
  Serial.begin(9600);  
}  
  
void loop() {  
  // put your main code here, to run repeatedly:  
  int sValue = analogRead(A0);  
  Serial.println(sValue);  
  Serial.println(resistorx(100,sValue));  
  Serial.println(resistor2position(resistorx(100,sValue)));  
  delay(1000);  
}
```

测试数据每组有三行，第一行为电压表测得电压，而这个并不以伏特为单位，而是 **arduino** 将 5V 的电压分成 1023 份后所获得的相应电压对应的数值。第二行则是 R_x 的算得的电阻值，而第三行则是相对应的位移。

```

sketch_jan25a
double resistor2position(double y){
  double x=0;
  double a = -8.273684;
  double b = 149.03;
  x = (y-b)/a;
  return x;
}
double resistorx(double R1, int V){
  double Rx=0;
  if (V!=0){
    Rx = (1024-V) * R1/V;
  }
  return Rx;
}

```

COM3

```

424
141.51
0.91
428
139.25
1.18
428
139.25
1.18
426
140.38
1.05
425
140.94
0.98
422

```

根据 **Arduino** 的串口输出可以得到如下数据：

读取的电压 对应的模拟 量	算得的电阻值 $R_x(K\Omega)$	相对应的位移 (mm)
424	141.51	0.91
428	139.25	1.18
428	139.25	1.18
426	140.38	1.05
425	140.94	0.98

进一步，我可以把滑台略去，通过结构件壳体的形变来改变激光点，这样就达到了期望的监测位移（形变）。同时可以采用 **Arduino Mini Pro**，这样整个装置就非常小型化了,长宽高只有 68mm*28mm*33mm。
最终的监测装置如图 13：

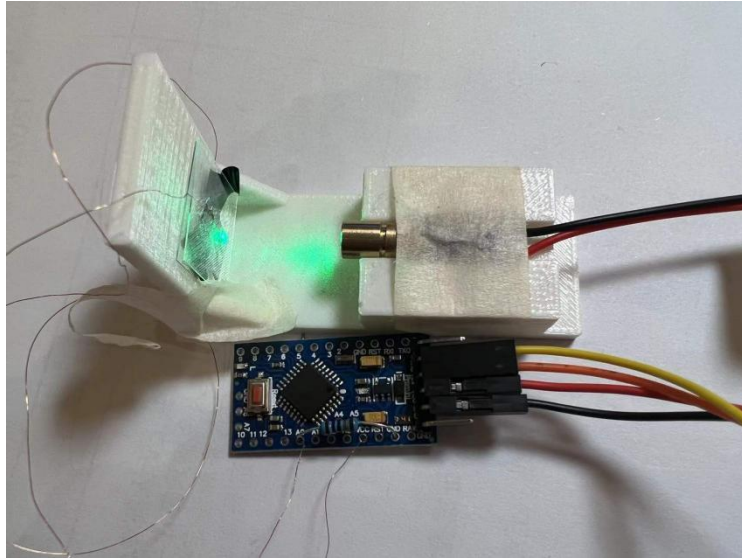


图 13、小型化后的位移监测传感器

七、对有关问题的反思与进一步的研究

7.1 某些细节处理不当

一些样品的线性度不够理想，可能与我在实验过程中，一些细节的不当处理有关。主要有如下几个方面：

（1）因为我选用将铜线通过牙签夹在两块小钢点中间，其中避免不了一些误差。比如，在粘贴钢点的过程中，有时会将钢点做得过大。这样，因为两电极距离本身就大约 1mm 左右，有时两钢点会导致电极中间区域过少。也就是说，我虽然希望将电极距离控制在 1mm 左右，但实际上中间的空隙区域有时会极小，这一定程度上造就了非线性区域的形成。

（2）我在此次实验中所使用的激光没有使用透镜组合进行聚焦，再加上两电极距离过小时，会时常导致照射点覆盖两钢点，这导致了一定程度上的测量精度的下降，所以导致线性程度下降。

（3）我在摆放样品测量的过程中，有时两电极与激光移动的平面不在一个水平面上，也就是说样品有时候会斜着摆放，这也一定程度上导致了非线性区域的形成。

以上这些问题我将会在之后的实验中改进。

7.2 需要进一步做细化实验

目前对于硅片样品的制作，无法确定性地制作出指定的量程和灵敏度，每一次都需要通过实验测得。在后续我打算进行细化实验操作，使做出来的半导体结构的双极性电阻效应所表现的电阻变化范围可控。这些细化实验将包括：

- (1)测试不同薄膜厚度对电阻效应的影响；
- (2)改变多孔硅的孔径以调整基底电阻，测试其相应的电阻效应；
- (3) 测试不同的温度对电阻效应的影响；
- (4)测试不同激光功率对电阻效应的影响；
- (5)增加透镜，进一步调整照射的激光光斑大小，调到尽可能小，以进一步提高线性度。

可以预期，以上这些实验数据出来后，可以优化出系列线性度好、灵敏度高的硅片，且相关线性度和灵敏度可控，为未来规模化生产提供依据。

7.3 对新发现的现象进行分析

在对裸硅和 4 号样品测试时发现两极中间区域的电阻基本保持不变，而在光斑从两侧电极向外移动时则有一定的线性规律。这是个值得分析的问题，也将是我下一步研究的主题。

参考文献

- [1] C.vQ. Yu and H. Wang, Sensors 10, 10155-10180 (2010). “Large lateral photovoltaic effect in metal-(oxide-)semiconductor structures”
- [2] 俞崇祺, 金属 (-氧化物) -半导体结构中的新型光电效应, 上海交通大学硕士学位论文 2011
- [3] 李秀林, & 陈鹏. Ag/bifeo_(3)/cofeb/ito 薄膜器件光控电阻开关特性研究. 科学技术创新(11), 2.
- [4] 张彪. 侧向光伏效应和双极性电阻效应在 Cu₂O/Si 结构中的研究. 上海交通大学硕士学位论文 2014 年 2 月
- [5] 半导体物理学 (第 7 版), The Physics of Semiconductors 7th Edition, 刘恩科、朱秉升、罗晋升编著, 中国工信出版集团, 电子工业出版社
- [6] 光学, 赵凯话编著, 2004 年 11 月第一版, 高等教育出版社
- [7] University Physics, with modern physics, Fifteenth Edition, Sears & Zemansky's
- [8] www.mouser.com, the website of Mouser electronics, Inc.
- [9] C. Q. Yu, H. Wang, and Y. X. Xia, Appl. Phys. Lett. 95, 141112 (2009). “Giant lateral photovoltaic effect observed in TiO₂ dusted metal-semiconductor structure of Ti/TiO₂/Si”.

致谢

研究过程之中，我得到了极大的支持与帮助。在此我想要对他们表达诚挚的谢意。首先要感谢邹娟娟老师对我在电磁学和半导体理论方面的指导，引导我广泛搜索以及查阅前人的相关工作，提炼研究方向以及明确研究对象。要求我以严谨，科学的态度对待研究中的每一步。同时我要感谢上海交通大学王辉教授，王辉教授在研究设备、实验指导方面给予了极大的帮助，并为本项目的论文提供了宝贵的写法指导和修改建议。我要感谢我的父母，感谢他们从小给我宽松的成长环境，培养了我的动手能力以及对于世界的好奇心。最后，我想感谢自己，科研过程充满曲折，感谢自己没有放弃，感谢自己对物理研究的热情。