

接触电阻的产生与影响

—理论模型分析及实验验证

PB14000682 薛皓天
指导老师：张增明

主要内容

- 1、提出两个理论模型：
 - (1)、微小接触模型
 - (2)、半球形变模型
- 2、实验验证理论结果
- 3、总结与提出解决方法

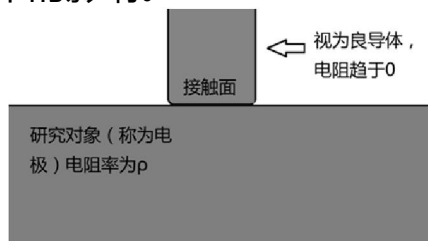
广泛性

- 一切电子设备均由插座供电，插座中接触电阻过大会引起火灾。
- 现今电子设备都是由一个个标准化模块组成，而模块之间为了便于更换，均由各类接口相连，而这些接口中极脚间均存在接触电阻。
- 微电子术中，随着电极的不断微型化，接触电阻变得不可忽略，会对电路性能的提升造成阻碍。

影响因素

- 接触面大小
- 接触面受应力，即压强
- 相接触的电极材料其本身性质，分为：
 - 1) 表面性质
 - 2) 内部性质，即电阻率

首先研究接触面积以及电阻率的影响。



接触面积对于接触电阻的影响

接触点

电极内

r

dr

1) 半球外
取球面微元，其电阻为

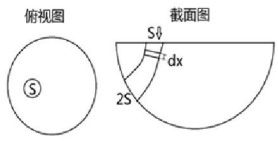
$$dR = \rho \frac{dr}{2\pi r^2}$$

积分有

$$R = \int_l^\infty \rho \frac{dr}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi l} = \frac{\rho}{2\sqrt{\pi S}}$$

其中 $S = \pi l^2$ 为接触面面积

接触面积对于接触电阻的影响



2) 半球内, 取一电流流管, 有微元电阻为

$$dR = \rho \frac{dx}{S}$$

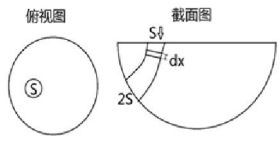
其中S是x的函数:

$$S = s + kx$$

其中

$$k = \frac{S}{l}$$

接触面积对于接触电阻的影响



积分有

$$R = \int_0^l dR = \int_0^l \rho \frac{dx}{S} = \int_0^l \rho \frac{dx}{s + \frac{S}{l}x}$$

$$= \rho \frac{l}{S} \ln 2$$

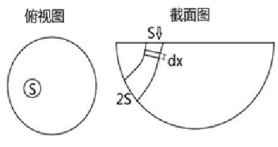
对整个半球取平均(此处近似)

$$\bar{l} \times \pi r^2 = \iint_S l ds = \frac{2}{3} \pi r^3$$

有

$$\bar{l} = \frac{2}{3} r$$

接触面积对于接触电阻的影响



整个半球近似电阻:

$$R = \frac{2 \ln 2 \rho}{3 \sqrt{\pi S}}$$

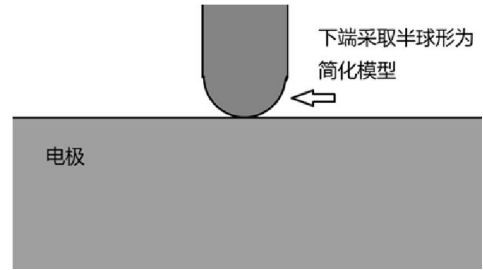
结合1) 2) 有全部接触电阻

$$R = \left(\frac{2 \ln 2}{3} + \frac{1}{2} \right) \frac{\rho}{\sqrt{\pi S}} = 0.962 \frac{\rho}{\sqrt{\pi S}}$$

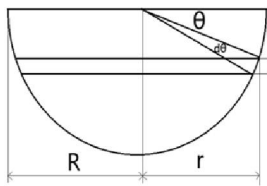
可见,

$$R \propto \rho S^{-\frac{1}{2}}$$

下面探究压强与接触面积的关系



探究压强与接触面积的关系



考虑半球部分, 取片状微元, 考虑其形变, 由胡克定律^[4]

$$Y \frac{dy}{dx} = \frac{F}{2\pi r^2}$$

有几何关系有

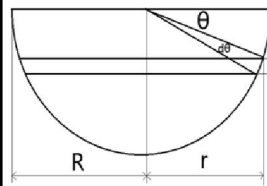
$$dx = R \cos \theta d\theta$$

$$r = R \cos \theta$$

整理有

$$\frac{Y dy}{r \cos \theta d\theta} = \frac{F}{2\pi (R \cos \theta)^2}$$

探究压强与接触面积的关系



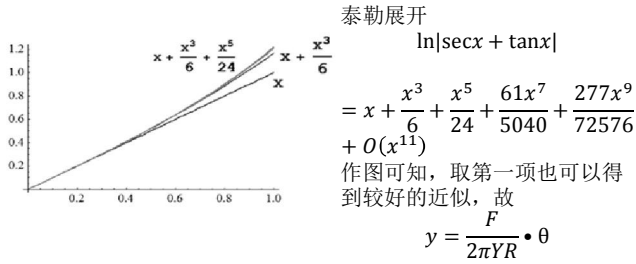
$$dy = \frac{F}{2\pi Y R} \cdot \frac{d\theta}{\cos \theta}$$

$$y = \frac{F}{2\pi Y R} \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{\cos \theta}$$

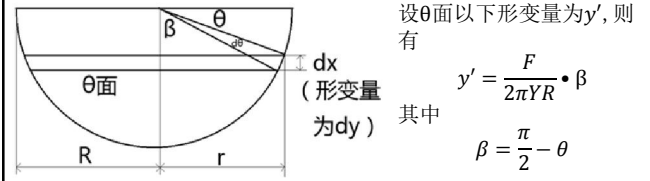
(形变量考虑为dy)

$$\int_0^{\theta} \frac{d\theta}{\cos \theta} = \ln |\sec \theta + \tan \theta|$$

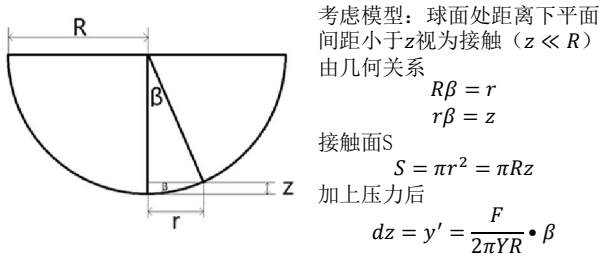
探究压强与接触面积的关系



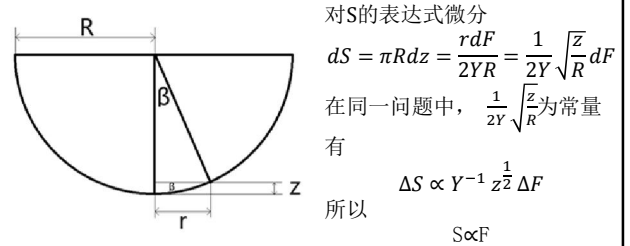
探究压强与接触面积的关系



探究压强与接触面积的关系



探究压强与接触面积的关系



接触电阻与受力关系

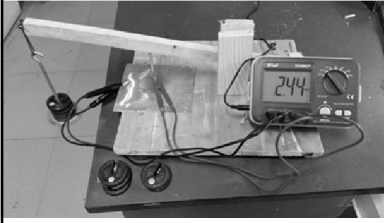
- 结合两个模型，我们有
- $R \propto \rho S^{-\frac{1}{2}}$ $S \propto F$
- 有 $R \propto F^{-\frac{1}{2}}$ 即 $R \propto \frac{1}{\sqrt{F}}$
- 接触电阻随着压力的增大而减小，成平方根反比

实验验证



实验设计
 使用市售精度为0.01mΩ的毫欧表直接测量回路中接触电阻值

实验验证



实验设计

利用杠杆机构以及砝码来改变受力

实验验证

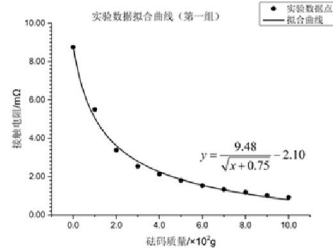
理论推导函数形式:

$$R = \frac{a}{\sqrt{F-b}} + c$$

数据记录

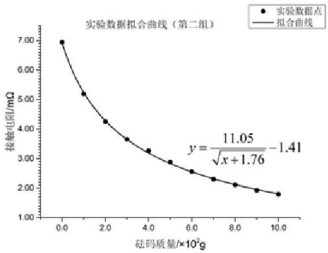
砝码数		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
接触电阻 /mΩ	第一组	8.75	5.50	3.38	2.54	2.13	1.80	1.53	1.33	1.18	1.02	0.92
	第二组	6.94	5.19	4.25	3.65	3.26	2.88	2.56	2.30	2.11	1.92	1.79
	第三组	5.57	4.83	4.00	3.49	3.09	2.78	2.53	2.29	2.04	1.84	1.66

数据处理 (第一组)



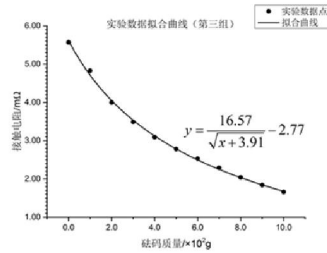
Equation	y = a/(sqrt(x-b))+c		
Reduced Chi-Sqr	0.04562		
Adj. R-Square	0.99208		
		Value	Standard Error
B	a	9.48	0.87
B	b	-0.75	0.11
B	c	-2.10	0.34

数据处理 (第二组)



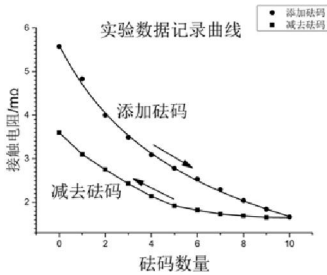
Equation	y = a/(sqrt(x-b))+c		
Reduced Chi-Sqr	0.00161		
Adj. R-Square	0.99936		
		Value	Standard Error
B	a	11.05	0.35
B	b	-1.76	0.07
B	c	-1.41	0.11

数据处理 (第三组)



Equation	y = a/(sqrt(x-b))+c		
Reduced Chi-Sqr	0.0031		
Adj. R-Square	0.99805		
		Value	Standard Error
B	a	16.57	1.31
B	b	-3.91	0.35
B	c	-2.77	0.32

其他现象



减去砝码时，电阻值曲线并不原路返回，减砝码曲线位于加砝码曲线下方。

猜测：金属电极发生了塑性形变，不能恢复原状。

实验结论

• $R \propto \frac{1}{\sqrt{F}}$ 在误差允许范围内成立

其他影响因素——氧化层

- 实际金属表面存在氧化膜^[3]，然而金属氧化物的电阻率远高于金属本身，模型中可视为绝缘。这相当于直接减小了金属电极间接触面积。
- 由于此效应，实际金属接触面积仅相当于理想模型的5%~10%^[3]

减小接触电阻的方法

根据前文结论，我们可以分析出：

- 增大接触面积：设法将电极制造的更加平整。
- 增大接触面压力。
- 改变材料性质，阻止氧化膜产生：例如镀金

总结

- 分析了两个金属电接触的理想模型，得出了 $R \propto \rho S^{-\frac{1}{2}}$ 、 $S \propto Y^{-1} z^{\frac{1}{2}} F$ 两条定性关系
- 由此导出： $R \propto \frac{1}{\sqrt{F}}$
- 实验证实了 $R \propto \frac{1}{\sqrt{F}}$
- 根据结论提出几个减小接触电阻的方法

参考文献

- [1]Contact Resitance-Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Contact_resistance
- [2]接触电阻-百度百科
<http://baike.baidu.com/link?url=ii6alypYpLwAlOb7Xuao8Pm9T7CXfcwjfk9r1txaX-5F1FrurOoysMPCG62AImCqGgN1MT2N4Vmb1nZr1JrHK>
- [3]樊康旗,贾建援,朱应敏,陈光焱.Fan Kangqi,Jia Jianyuan,Zhu Yingmin,Chen Guangyan 基于 Hamaker假设的黏着接触弹性模型[期刊论文]-西安交通大学学报 2007(5)

致谢

- 感谢张增明老师的指导。
- 感谢徐昊助教的指导。
- 感谢14级物理学院王轩同学在实验过程中极大的帮助。
- 感谢格物致知社实验室提供实验场地

谢谢！