

表面粘连效应对接触式微开关接触电阻的影响

黄见秋 黄庆安

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 建立了一个微开关接触电阻模型. 模型将粗糙的触头表面理想化为多微丘结构, 并考虑了表面粘连效应, 给出了接触电阻与接触力之间的变化关系. 结果显示, 在低接触力下, 粘连效应十分重要. 粘连模型与 Majumder 等人所建立的模型以及实验值的比较结果表明, 粘连效应可以用来解释弹性模型与实验之间的偏差.

关键词: 微开关; MEMS; 接触电阻; 粘连效应

EEACC: 2575; 8340; 1320

中图分类号: TN43

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)06-1229-05

1 引言

由于接触式微开关的功耗低、插入损耗小、隔离度高、线性度好, 并且可以和其他电子器件集成, 因此正日益成为人们研究的热点. 接触式微开关是一种利用触头进行直接金属接触的三端口器件, Majumder 等人^[1]以及郭方敏等人^[2]都对这种结构进行了报道. 接触电阻是接触式微开关的重要参数, 它直接影响到微开关的工作性能以及可靠性. 因此, 建立微开关的接触电阻模型十分必要.

人们已经对大尺寸器件的接触电阻进行了研究^[3,4]. 这些研究对于微开关中接触电阻模型的建立具有一定的指导意义, 同时, MEMS 器件自身的特点又使得这一问题具有一定的特殊性. Majumder^[1]等人曾建立了一个微开关的接触电阻模型, 可是由于忽略了表面粘连效应, 因此在低接触力情况下与实验存在着偏差. 其实, MEMS 器件所产生的作用力一般为几 μN 到几百 μN , 在这一接触力范围内, 金属微触点的表面力效应变得非常重要^[5,6]. 因此, 本文引入粘连效应, 建立了一个新的微开关接触电阻模型. 结果表明, 这一模型更加准确, 弥补了 Majumder^[1]等人建立的模型与实验的偏差.

2 微开关结构

微开关结构如图 1 所示. 衬底上从左到右依次

分布着三个电极, 分别为漏极 (Drain)、栅极 (Gate) 与源极 (Source). 梁的固定端与源极相连, 梁的自由端下表面具有一只触头, 在栅极与梁之间施加一定的工作电压之后, 悬臂梁受到静电吸引发生弯曲, 进而触头与漏极接触, 使得源极与漏极导通. 触头与电极所用的材料通常为金.

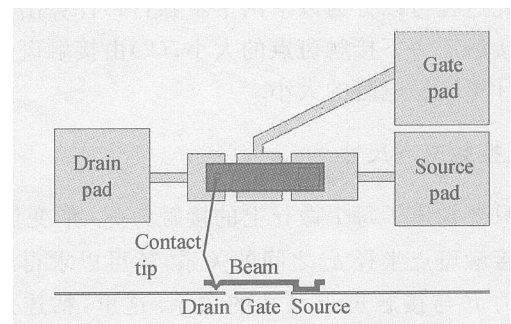


图 1 微开关示意图

Fig. 1 Schematic of a microswitch^[1]

从触头表面的 SEM 成像 (图 2) 中可以看到在接触面上存在着不规则的波状起伏. 当接触发生时, 只有有限的微观凸起 (称之为“微丘”) 发生了接触, 形成有限数目的接触斑点, 电流经过接触斑点时发生收缩, 产生附加的电阻, 称之为收缩电阻.

接触电阻一般包括收缩电阻与膜电阻两个部分. 当微开关运行数百个周期后, 由于表面膜破裂, 收缩电阻起主要作用, 因此这里忽略膜电阻的作用.

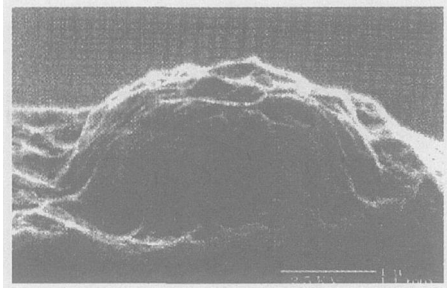


图 2 微开关触头的 SEM 成像

Fig. 2 SEM micrograph of a contact bump in the microswitch^[1]

实验证明这是可行的^[1].

3 模型

图 2 所示触头表面的 SEM 微成像表明,微丘一般具有 50~200nm 的顶端半径,且只有少量的微丘将会参与接触.

由于漏电极表面远比触头表面平坦^[1],因此,将触头表面的微丘简化为一系列曲率相同、高度不同的球状凸起;而将漏电极表面简化为平面.对电接触的研究过程可以分为以下两个步骤:(1)计算出在一定的接触压力下接触斑点的大小;(2)由接触斑点的情况计算接触电阻的大小.

3.1 接触斑点尺寸

只要知道了每个微丘上的接触力 F_i 、形变量 w_i 以及接触斑点半径 a_i 之间的关系,就可以求得总的接触力 F 与接触斑点尺寸的关系.这里,粘连效应不可忽视.

固体与固体表面之间的粘连过程是一个复杂的化学、物理过程.引起粘连效应的物理机制主要是界面分子间的范德华作用力,如取向力、诱导力、色散力等.引起粘连效应的化学机制主要是各种化学键作用,如离子键、共价键、金属键等.单位面积表面能是衡量粘连效应的一个重要参数.假设将单位面积对称粘连界面分开所需做的功为 2γ ,则分别有表面能 γ 属于两个新形成的自由表面.

假设接触材料的杨氏模量与泊松系数分别为 E_1, E_2, ν_1, ν_2 ,考虑到粘连效应后,每个微丘上接触力 F_i 、形变量 w_i 以及接触斑点半径 a_i 之间的关系可以表示为^[7]

$$F_i = 4 E a_i^3 / 3 R - 4 \sqrt{E a_i^3} \quad (1)$$

$$w_i = a_i^2 / R - 2 \sqrt{a_i / E} \quad (2)$$

其中 R 为微丘曲率半径; $E = 1 / (1 / E_1 + 1 / E_2)$; γ 是单位面积表面能.当 $\gamma = 0$ 时,上式退化为弹性理论.

3.2 接触电阻

对于理想的洁净接触表面,单个导电斑点(半径为 a)的接触电阻为^[1,8]

$$R_c = \rho / 2 a \quad (3)$$

其中 ρ 为导体的电阻率.

对于多个接触斑点,除了各斑点独立的接触电阻成分外,还存在着各斑点间相互耦合而引起的附加电阻.此时,存在着两种极限情况:当各导电斑点相距得足够远且不存在耦合作用时^[1,8]

$$R_{cMIN} = \rho / 2 a_i \quad (4)$$

当各导电斑点相距得足够近,以至于融合成为一个大的导电斑点时^[1,8]

$$R_{cMAX} = \rho / 2 \sqrt{a_i^2} \quad (5)$$

(4)式与(5)式分别对应了导电斑点在不同分布情况下的上限值与下限值.

对于 MEMS 领域的电接触现象,由于接触斑点的尺寸比宏观情况要小几个数量级,因此不得不考虑尺寸效应对接触电阻的影响.因为,如果导电斑点的尺寸足够小(小于电子平均自由程 l_e),则电子通过导电斑点时会发生散射,导致电阻增加.

考虑尺寸效应后,单个导电斑点的接触电阻为^[1,8]

$$R_c = (\rho / 2 a) \left[(l_e / a) + 4 l_e / 3 a^2 \right] \quad (6)$$

其中 $\left[(l_e / a) + 4 l_e / 3 a^2 \right]$ 是与 l_e / a 有关的函数,当 $l_e / a = 0$ 时, $\left[(l_e / a) + 4 l_e / 3 a^2 \right] = 1$;当 l_e / a 增大时, $\left[(l_e / a) + 4 l_e / 3 a^2 \right]$ 缓慢地降到 0.69,它与 l_e / a 的关系由图 3 给出.

考虑尺寸效应后,多接触斑点的接触电阻上下限分别为^[1,8]

$$R_{cMAX} = (\rho / 2 \sqrt{a_i^2}) \left[(l_e / \sqrt{a_i^2}) + 4 l_e / 3 a_i^2 \right] \quad (7)$$

$$R_{cMIN} = \left[\frac{1}{(\rho / 2 a_i) \left[(l_e / a_i) + 4 l_e / 3 a_i^2 \right]} \right]^{-1} \quad (8)$$

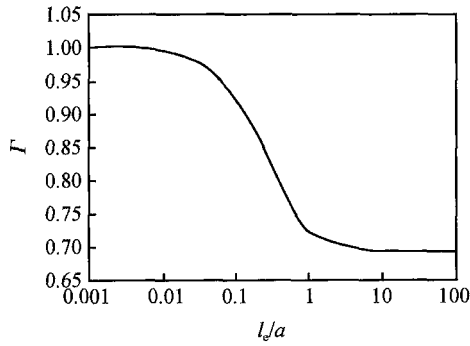


图 3 随 l_c/a 变化的曲线^[11]

Fig. 3 Variation of with l_c/a ^[11]

3.3 计算步骤

对于触头表面具有 $m(m > 1)$ 个微丘的情况：

(1) 令所有微丘的曲率半径同为 R 。

(2) 微丘的高度在一定的正态分布条件下随机生成,这与实际情况较为接近^[8]。

(3) 令最高的微丘(高度为 l)垂直形变为 w ,则由其他微丘与其高度的差值可以得出所有微丘的垂直形变(注意:高度小于 $l-w$ 的微丘形变为 0)。

(4) 由(1)、(2)式分别计算各微丘上的接触力以及接触斑点半径,总接触力为各微丘上的接触力之和,再由(7)、(8)式估算接触电阻。

(5) 以 w 为参变量可以得出接触电阻与总接触力之间的关系。

(6) 随机选取多组微丘高度分别进行计算,并对结果做统计平均,使结果更具普遍性。

4 结果与讨论

基于以上模型,对微开关中 Au/Au 接触的情况进行讨论(Au 的杨氏模量 $E = 80 \text{ GPa}$,泊松系数 $\nu = 0.4$,密度 $\rho = 2.2 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^3$,单位面积表面能 $\sigma = 1.4 \text{ J/m}^2$ ^[9])。

图 4 给出了单个微丘(半径 $a = 100 \text{ nm}$)上的接触力在粘连理论与非粘连理论中的差异。在相同形变下,两者存在着一个 10^{-6} N 量级的差值,它正对应于粘连力的作用。当弹性力与粘连力的大小相当,或者说,接触力在 10^{-6} N 量级时,粘连效应已不可忽视。

图 5 给出了单个微丘的接触电阻在粘连理论与非粘连理论中的差异。当接触力较小(10^{-6} N 量级以下)时,粘连理论远远偏离了非粘连理论所预测的曲

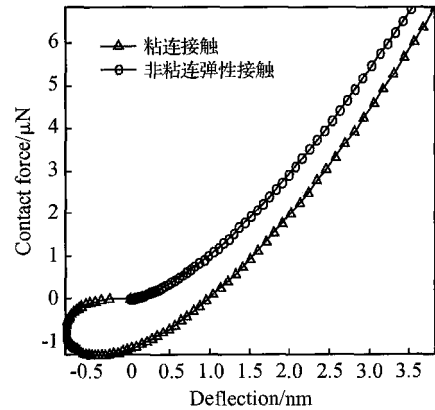


图 4 两种模型给出的接触力随微丘形变的变化关系

Fig. 4 Variation of contact force with deflection of the asperity in different models

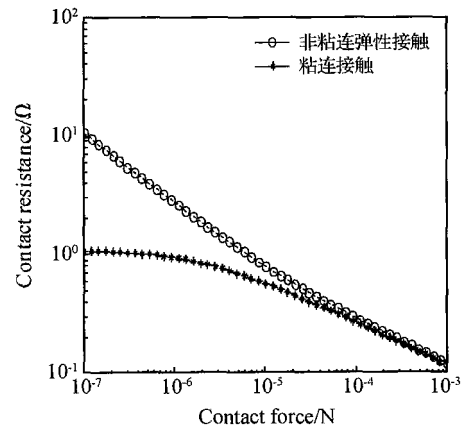


图 5 两种模型给出的单微丘表面的接触电阻随接触力的变化关系

Fig. 5 Variation of contact resistance with contact force at the surface with only one asperity in different models

线。然而当接触力增大时,两条曲线逐渐重合。

假设触头表面存在着 30 个半径为 100nm 的微丘,其高度服从 $N(100 \text{ nm}, 0.01^2)$ 的正态分布。图 6 对此接触电阻的变化范围进行了估计,其中的每组曲线分别含有一条上限曲线(由(7)式导出)与一条下限曲线(由(8)式导出)。上限曲线与下限曲线的分离意味着多个微丘发生了接触,且接触的微丘越多,上限曲线与下限曲线就分离得越明显。

考虑粘连效应后,在很低的接触力下接触电阻的上限曲线与下限曲线就发生了明显的分离,这表明,开关刚刚闭合时,粘连力就使得大多数的微丘发生了接触。

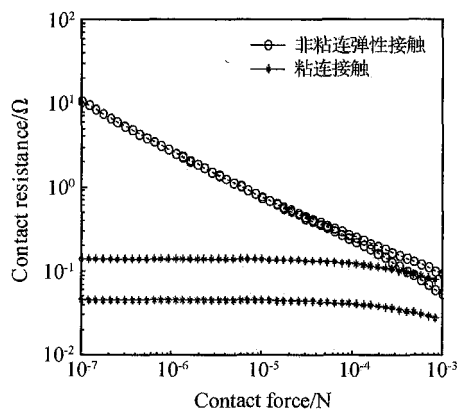


图 6 两种模型给出的多微丘表面的接触电阻随接触力的变化关系

Fig. 6 Variation of contact resistance with contact force at the surface with multi-asperities in different models

由于单个微丘的接触面积受到微丘尺寸的限制,因此单个微丘所能产生的粘接力是有限的;而当微丘增多后,接触斑点增多,粘接力倾向于使接触面积增大,而接触面积增大又进一步使得粘接力增加,因此粘连效应更加明显。

计算表明,考虑粘连效应之后,接触电阻在低接触力与高接触力条件下都保持在 0.1 的量级,即当微开关闭合时,接触电阻受接触力影响的程度比不考虑粘连效应的情况要小得多。

另外, Majumder 等人^[1]也建立了一个基于弹性接触的接触电阻模型,并与实验值进行了比较,如图 7 所示。其中,离散的点对应于多个微开关样品的测量值。大部分接触电阻的测量值都聚集在 0.1 量级附近,只有一只样品的接触电阻接近 10 (样品可能已经失效,分析中将其忽略)。Majumder 等人^[1]利用所建立的弹性接触模型分别计算了微丘半径为 100nm,微丘个数分别为 1, 5 及 50 个时的接触电阻曲线。结果表明:在低接触力条件下,模型偏离了实验。

假设触头上存在多个微丘(30 个),图 8 给出了对应于不同表面能的接触电阻-接触力曲线。其中 $\gamma = 0$ 对应于非粘连接触(即普通的弹性接触),它预测的接触电阻随接触力按照负 n 次方的规律变化; $\gamma = 1.4 \text{ J/m}^2$ 对应于理想 Au/Au 表面的粘连接触,相应的曲线指出:在低接触力下,接触电阻并没有发生急剧的变化。

微开关的接触力与执行电压的平方成正比,在

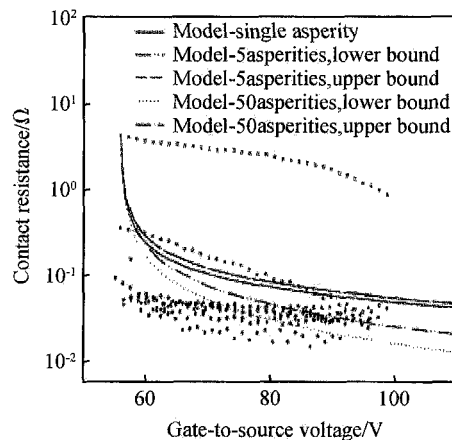


图 7 Majumder 等人给出的接触电阻模拟值与实验值^[1]

Fig. 7 Contact resistance from modeling and experiments given by Majumder et al.^[1]

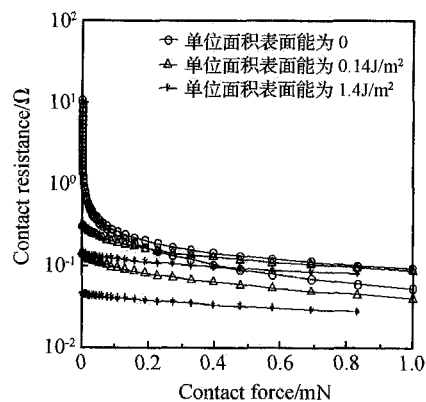


图 8 不同表面能下接触电阻与接触力的关系

Fig. 8 Correlation between contact resistance and contact force with different surface energy

这里讨论的小区间内可以近似认为它们是线性关系^[1],因此微开关的接触电阻-接触力曲线与接触电阻-执行电压曲线应该具有相同的拓扑形状。将图 8 中 $\gamma = 1.4 \text{ J/m}^2$ 时的接触电阻曲线与图 7 中的实验值进行比较后发现两者是一致的。可见,粘连效应可以用来解释 Majumder^[1]等人所建立的弹性模型与实验之间的差异。

值得一提的是,由于接触界面处的晶格缺陷以及各种污染物的存在,接触表面的表面能一般低于理想值,但是即使下降为理想值的 10% (图 8 中 $\gamma = 0.14 \text{ J/m}^2$ 的情况),粘连效应的影响仍然十分显著。

5 结论

微开关的电接触问题不同于一般器件。在

MEMS 领域,器件的作用力可以小到几个 μN ,而在这样的接触力下,表面粘连效应便显得十分重要.本文利用粘连接触理论代替 Hertz 弹性理论建立了一个微开关的接触电阻模型.结果表明,在低接触力下,考虑粘连效应的接触电阻明显不同于弹性理论的计算值.当开关闭合后,粘连效应使得接触电阻不随接触力发生急剧的变化,且其值大约在 0.1 量级附近,这与 Majumder 等人^[1]所观察到的实验现象是一致的.因此,考虑粘连效应的接触电阻模型可以修正 Majumder 等人^[1]所建立的弹性模型在低接触力下所引起的偏差.

参考文献

- [1] Majumder S,McGruer N E,Adams G G,et al. Study of contacts in an electrostatically actuated microswitch. *Sens Actuators*,2001 ,A93:19
- [2] Guo Fangmin ,Lai Zongsheng , Zhu Ziqiang , et al. Design of micro electro mechanical system RF switch. *Chinese Journal of Semiconductors*,2003 ,24(8) :1190(in Chinese) [郭方敏,赖宗声,朱自强,等.悬臂式 RF MEMS 开关的设计与研制.半导体学报,2003 ,24(8) :1190]
- [3] Jemaa N B. Contacts conduction and switching in DC levels. *Proceedings of the Forty-Eighth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*,2002:1
- [4] Queffelec J L ,Benjema N ,Travers D. Material and contact shape studies for automobile connector development. *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*,1991 ,3(1) :90
- [5] Hyman D ,Mehregany M. Contact physics of gold microcontacts for MEMS switches. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*,1999 ,22(3) :357
- [6] Johnstone R W ,Parameswaran M. Theoretical limits on the freestanding length of cantilevers produced by surface micromachining technology. *J Micromechanics and Microengineering* ,2002 ,12:855
- [7] Johnson K L. *Contact mechanics*. Beijing: High Education press,1992(in Chinese) [Johnson K L. 接触力学.北京:高等教育出版社,1992]
- [8] Cheng Lichun. *Theory and application of electric contact*. Beijing:Mechanical Industry Press ,1988(in Chinese) [程礼椿.电接触理论及应用.北京:机械工业出版社,1988]
- [9] Wang Z,Wynblatt P. Wetting and energetics of solid Au and Au $\pm\text{Ge}$ / SiC interfaces. *Acta Mater* ,1998 ,46(14) :4853

Influence of Sticking Effect on Contact Resistances of a Microswitch

Huang Jianqiu and Huang Qing 'an

(Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract : A model of contact resistance for a microswitch is presented. In this model the rough surface of the contact is idealized as a plane with some asperities. The sticking effect is also considered. The variation of contact resistance with contact force is calculated. The results show that the sticking effect is significantly important at small contact forces. Comparing the new model with that developed by Majumder *et al.* ,the experimental results show that the sticking effect can explain the deviation of the contact resistances in an elastic model.

Key words : microswitch; MEMS; contact resistance; sticking effect

EEACC: 2575; 8340; 1320

Article ID : 0253-4177(2005)06-1229-05