

纳米隧道结的制备和特性研究^{*}

匡登峰^{1)†} 刘庆纲²⁾ 胡小唐²⁾ 胡留长³⁾ 郭维廉³⁾

1) 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

2) 精密测试计量技术及仪器国家重点实验室, 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

3) 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

(2005 年 4 月 13 日收到, 2005 年 6 月 6 日收到修改稿)

结合对向靶直流磁控溅射技术、微电子光刻方法和原子力显微镜阳极氧化加工方法制备了实用的纳米钛-钛氧化线-钛隧道结, 钛膜的厚度为 3.02nm, 钛氧化线的宽度为 60.5nm, 在室温下此隧道结的 $I-V$ 曲线表现出明显的库仑阻塞效应.

关键词: 原子力显微镜阳极氧化, 钛氧化线, 隧道结, 库仑阻塞效应

PACC: 0779, 6480G, 8160

1. 引言

利用原子力显微镜 (AFM) 针尖诱导氧化方法加工半导体衬底上沉积的纳米级的金属膜 (如 $Al^{[1]}$, $Nb^{[2,3]}$, $Ti^{[4-6]}$, $Cr^{[7]}$ 等), 形成的纳米氧化物将金属膜隔开, 从而构成金属-绝缘体-金属 (MIM) 结构, 可以实现加工各种纳米器件, 如单电子晶体管 (SET)^[8,9]、高电子迁移率晶体管 (HEMT)^[8]、光导开关^[8]和单电子存储器 (SEM)^[10].

纳米金属-绝缘体-金属隧道结是利用上述方法实现各种纳米器件的基础, 其结构和特性决定了最终的纳米器件的工作特性. 因此, 研究 AFM 阳极氧化加工的纳米隧道结的电特性对于器件应用非常重要.

决定纳米器件特性的关键因素是能够达到的氧化线的最小宽度. 当前, 此种方法加工的氧化线宽度在 10—100nm 范围, 氧化线宽度主要取决于氧化加工过程中针尖和样品之间的偏压和相对扫描速度、环境的相对湿度以及 AFM 导电探针的针尖形状. 对于实用的器件, 金属膜的厚度必须足够大, 以实现足够高的金属导电性; 另一方面, 金属膜越厚, 将金属膜氧化透所需要的偏压越大、相对扫描速度越小, 这样形成的氧化线宽度也越大.

本文结合对向靶直流磁控溅射技术^[11,12]、微电子光刻方法和 AFM 阳极氧化加工方法在 SiO_2/Si 衬底上溅射了 3nm 厚的钛膜、制备了隧道结两端的 Au-Ge-Ni 电极和导线结构并加工了纳米钛-钛氧化物-钛隧道结, 在室温下研究了此纳米隧道结的电流-电压特性.

2. 器件制备过程

纳米钛-钛氧化物-钛隧道结的加工制备过程如下: 首先在 Si 衬底上进行热氧化生长得到 SiO_2/Si 衬底, 生长的 SiO_2 的厚度为 200nm; 其次利用对向靶直流磁控溅射 Ti 膜, 钛膜的平均厚度为 3.02nm; 然后利用光刻和牺牲层工艺形成隧道结两端的 Au-Ge-Ni 电极和导线结构, 最后在大气状态下利用 AFM 在隧道结的中间位置加工氧化钛线.

3. AFM 氧化加工

AFM 氧化加工采用美国 DI 公司的 Nanoscope IIIa 型多功能 SPM, 加工过程均采用接触式 AFM 进行. 氧化加工探针采用 NT-MDTTM 公司的 CSCS12/ W_2C 型导电 AFM 探针, 针尖的曲率半径小于 30nm, 针尖和悬臂梁上覆盖了 W_2C 导电膜, W_2C 薄膜的特征电阻

^{*} 教育部天津大学南开大学科技合作项目基金资助的课题.

[†]E-mail: dengfengkuang@yahoo.com.cn

约为 $30\mu\Omega\cdot\text{cm}$, W_2C 薄膜的厚度为 25nm).

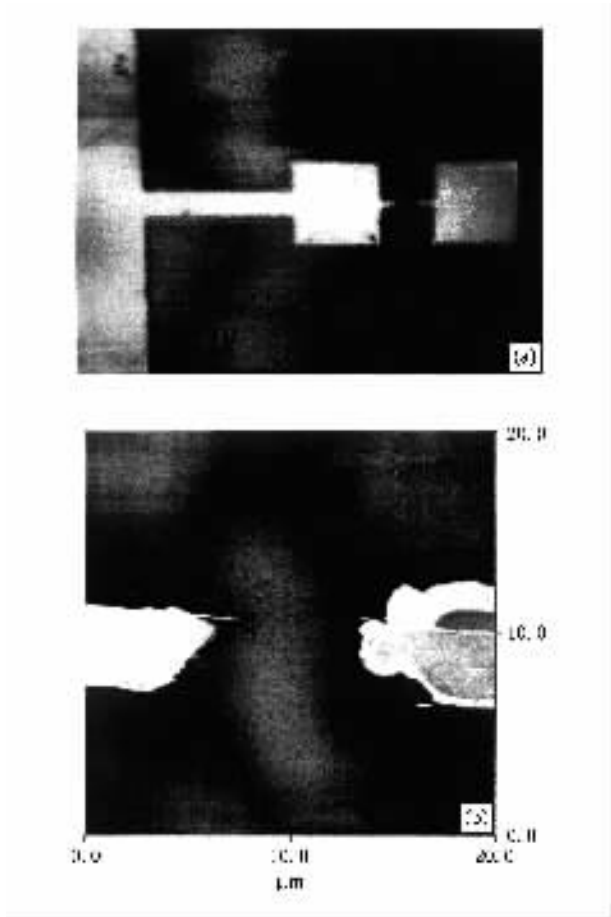


图 1 隧道结的电极和导线的(a)光学显微镜图像和(b) AFM 图像

AFM 氧化加工的过程和结果如下：

1)首先 ,在光学显微镜下将需要进行氧化加工的隧道结的位置尽量调正 ,以保证氧化加工时 AFM 针尖的移动方向与导线垂直 .光学显微镜下显示的隧道结的 Au-Ge-Ni 导线和电极结构如图 1(a) .图中的电极之间的间隙由溅射的 3.02nm 厚的钛膜连接 ,AFM 氧化加工将在此间隙的中间部位进行 .

2)其次 将 AFM 探针的针尖大致调整到隧道结间隙的中间位置 ,进行 $20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$ 的大范围扫描 ,以获得隧道结传输线的精细结构 ,为进一步精确定位作好准备 .AFM 所测量的隧道结的导线和中间间隙的平面图如图 1(b) .隧道结 Au-Ge-Ni 导线相对于衬底的平均高度为 341.1nm ,导线的平均宽度为 $5.20\mu\text{m}$,中间间隙的长度为 $7.81\mu\text{m}$.

3)然后 将扫描范围进一步缩小 ,找到包含钛膜区域的隧道结间隙的中间部位进行扫描测量 .图 2 (a)是包含超薄钛膜区域的 $7\mu\text{m}\times 7\mu\text{m}$ 范围内的平面图 .从图中可以看出 ,钛膜将两边的导线连接起

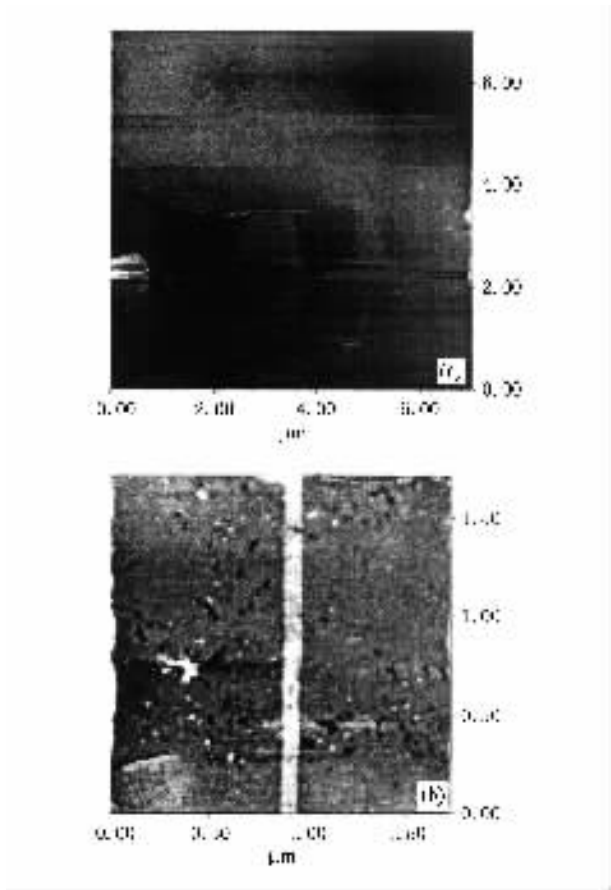


图 2 (a)AFM 氧化加工之前的钛膜和(b)AFM 氧化加工之后形成的氧化钛线

来 ,钛膜的宽度和导线的宽度相当 ,附近区域的钛膜都已经被离子腐蚀去掉 .

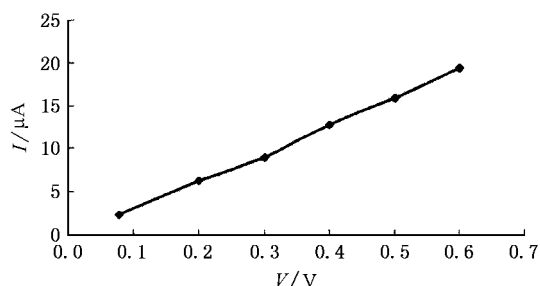
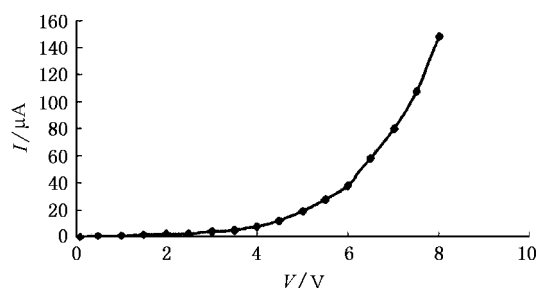
4)最后 ,在 AFM 导电针尖和钛膜之间施加 -8V 的偏置电压的条件下 ,控制 AFM 针尖在钛膜的中间部位垂直于隧道结的导线的方向以 $0.1\mu\text{m/s}$.的速度从上到下移动 $6\mu\text{m}$,以把中间位置的钛膜全部氧化成氧化钛线 ,从而将两端的导线完全隔开 ,形成钛-钛氧化物-钛隧道结 .AFM 阳极氧化加工的纳米氧化钛线的平面图如图 2(b) .氧化钛线的凸出高度为 1.51nm ,最大半宽为 60.5nm .

AFM 阳极氧化加工时的环境条件为 :氧气浓度 18.4% ,相对湿度 41.2% ,温度 29.9°C .

4. 结果和讨论

我们利用 JS2D 晶体管反向截止电流测试仪测量了隧道结形成之前和之后的电极两端的电流-电压特性 ,分别如图 3 和图 4 所示 .

从图 3 可以得到 ,隧道结形成之前 ,室温下两端电极之间的 $I-V$ 曲线表现出良好的线性 ,即电阻特

图3 氧化钛线隧道结形成之前的两端电极之间的 $I-V$ 曲线图4 氧化钛线隧道结形成之后的两端电极之间的 $I-V$ 曲线

性,此时两端电极之间的电阻为 $31\text{k}\Omega$.

而在图4中氧化钛隧道结形成之后,氧化钛线将两端的电极隔开,此时室温下两端电极之间的 $I-V$ 曲线不再为线性,电流和电压之间出现明显的指数关系.在相同的电压下,电流值也明显变小.在室温下当电压提高到 8V 时,经过隧道结的电流为 149nA ,此时的电阻值为 $53.7\text{M}\Omega$.因此氧化物隧道结的存在将电极之间的导电性改变了3个数量级,这

样证明,AFM 针尖已经将两端电极之间的 Ti 膜完全氧化透,形成的氧化钛线完全将两端的电极隔开,从而 $I-V$ 曲线表现出明显的库仑阻塞现象.

前人的研究结果表明:经过氧化钛隧道结的电流主要由热电子发射和隧道电流两部分组成^[13].热电子发射为电子被热能激发后越过隧道结势垒,此电流与温度有关^[14];而隧道电流为能量低于隧道结势垒的电子隧穿经过势垒,它与温度关系不大.我们加工的氧化钛线的最大半宽为 60.5nm ,并且测量 $I-V$ 曲线时施加的偏压较大,因此测量得到的电流以隧道电流为主.

我们研制的隧道结在室温下表现出明显的库仑阻塞特性,但其电阻值还远远大于电阻量子 $h/e^2 \approx 25.8\text{k}\Omega$.要实现单电子隧穿的金属-绝缘体-金属隧道结,还需要通过精确控制氧化加工时环境的相对适度或采用尖端半径更小的导电探针(如碳纳米管探针)来进一步减小氧化线宽度.

5. 结 论

本文利用对象靶直流磁控溅射方法在 SiO_2/Si 衬底上溅射 3.02nm 厚钛膜,然后利用光刻和牺牲层工艺加工 Au-Ge-Ni 导线和电极结构,最后利用 AFM 阳极氧化方法加工了最大半宽为 60.5nm 氧化钛线,制备了实用的纳米隧道结,在室温下此隧道结的 $I-V$ 曲线表现出明显的库仑阻塞效应,从而为研制室温下实用的单电子晶体管、单电子存储器和单电子逻辑电路打下了坚实的基础.

- [1] Snow E S, Campbell P M, Park D 1996 *Superlattices and Microstructures* **20** 545
- [2] Shirakashi J, Matsumoto K, Miura N *et al* 1997 *Jpn. J. Appl. Phys.* **36** L1257
- [3] Shirakashi J, Matsumoto K, Miura N *et al* 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 1893
- [4] Held R, Heinzel T, Studerus P *et al* 1998 *Physica E* **2** 748
- [5] Vullers R J M, Ahlsgog M, Haesendonck C Van 1999 *Appl. Surf. Sci.* **144** 584
- [6] Vullers R J M, Ahlsgog M, Cannaeerts M *et al* 1999 *Journal of Vacuum Science & Technology B* **17** 2417
- [7] Wang D W, Tsau Liming, Wang K L *et al* 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 1295
- [8] Matsumoto K 1997 *Proceedings of the IEEE* **85** 612

- [9] Matsumoto K, Ishii M, Segawa K *et al* 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 34
- [10] Bubanja V, Matsumoto K, Gotoh Y 2001 *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* **40** 87
- [11] Ji H, Zhao T X, Wang X P *et al* 1993 *Acta Phys. Sin.* **42** 1340 (in Chinese)[季航、赵特秀、王晓平等 1993 物理学报 **42** 1340]
- [12] Ma P, Liu L Y, Zhang Sh Y *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 406 (in Chinese)[马平、刘乐园、张升原等 2002 物理学报 **51** 406]
- [13] Matsumoto K, Ishii M, Segawa K 1996 *Journal of Vacuum Science & Technology B* **14** 1331
- [14] Liu Y X, Wang Y C, Du S Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2734 (in Chinese)[刘彦欣、王永昌、杜少毅 2004 物理学报 **53** 2734]

Fabrication and properties of nano metric tunneling junction ^{*}

Kuang Deng-Feng^{1)†} Liu Qing-Gang²⁾ Hu Xiao-Tang²⁾ Hu Liu-Chang³⁾ Guo Wei-Lian³⁾

¹⁾ *Institute of Modern Optics ,Nankai University ,Tianjin 300071 ,China)*

²⁾ *State key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instrument ,Tianjin University ,Tianjin 300072 ,China)*

³⁾ *Department of Electronic Information Engineering ,Tianjin University ,Tianjin 300072 ,China)*

(Received 13 April 2005 ; revised manuscript received 6 June 2005)

Abstract

Applicable nano metric titanium-titanium oxide line-titanium tunneling junction was fabricated with dual-facing target sputtering ,micro-electronic optical lithography and atomic force microscope anodic oxidation. The thickness of titanium film of the fabricated junction was 3nm and the width of the titanium oxide line was 60.5nm. The $I-V$ curve of the tunneling junction at room temperature clearly indicates the Coulomb blockade effect.

Keywords : atomic force microscope anodic oxidation , titanium oxide line , tunneling junction , Coulomb blockade effect

PACC : 0779 , 6480G , 8160

^{*} Project supported by the Ministry of Education on Tianjin University & Nankai University Science and Technology Cooperation Project.

[†]E-mail : dengfengkuang@yahoo.com.cn