

隧道结 TiO_x 线宽度对隧穿现象的影响^{*}

张超艳¹ 刘庆纲^{1,†} 李 敏¹ 匡登峰² 郭维廉³ 张世林³ 胡小唐¹

(1 天津大学精密测试计量技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

(2 南开大学信息技术科学学院 光学研究所, 天津 300071)

(3 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 在新型超高速光导开关的研究中,采用 AFM 阳极氧化加工方法,加工利用磁控溅射方法在 GaAs 衬底得到的厚约 3nm 的钛膜,形成纳米级氧化钛线. 该 Ti-TiO_x-Ti 形成 MIM 隧道结作为光导开关的基本结构,并且 TiO_x 作为电子的能量势垒. 为说明氧化线的宽度对隧穿现象的影响,确定加工超高速光导开关时不引起隧穿的最窄线宽及其实验条件,通过控制空气中的相对湿度,在加工速度、氧气浓度和偏置电压不变的条件下,加工出宽度分别为 15.6,34.2 和 46.9nm 的钛氧化线,测试了不同宽度氧化线隧道结的 *I-V* 特性. 结果表明,在两电极的偏压为 6V 时不引起隧穿的前提下,可以在超高速光导开关两电极间加工最小宽度大约为 10nm 的氧化钛线.

关键词: AFM 阳极氧化; 氧化钛线; 隧道结; 大气湿度; 超高速光导开关

PACC: 0779; 8160; 6048G

中图分类号: TN16

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)08-1453-05

1 引言

在新型超高速光导开关的研究中,怎样提高光导开关的响应速度是研究的主要方面. 一般可通过三种途径来提高响应速度:(1)选择和利用载流子寿命短的光导材料;(2)设计新型的开关结构,减小载流子运动的路程,即减小电极之间的距离;(3)增加光导开关两电极间所施加的偏压.

本实验中选择载流子迁移率高的 GaAs 作为光导材料. Ti 由于其常温下的稳定性以及易生成均一氧化物而被广泛应用于阳极氧化加工的研究中,氧化钛的电阻系数比钛膜的高 7 个数量级,其形成的势垒高度适中^[1-3],且相对介电常数较小使隧道结电容较小,有利于降低光导开关两电极间所施加的偏压. 同时,半透明的 TiO_x 对光导开关测试时所使用的钛蓝宝石超快激光的 800nm 波长光源几乎是透明的,可有效提高光的透过率. 实验中利用对向靶磁控溅射的方法在 GaAs 衬底上镀金属 Ti 膜. 缩短电极间距离可通过在两金属电极间加工对激光透明并且绝缘性能很好的纳米 TiO_x 线来代替空气间隙覆盖在半导体的表面. 电极间的距离越小,光导开关的工作速度越快;同时提高外加电压也可以提高器件的速度和灵敏度. 可以看出加工中的关键因素是氧化线的宽度问题,传统的加工方法,例如光学或

电子刻蚀很难达到仅有几十纳米宽的氧化线. 原子力显微镜(AFM)和扫描隧道显微镜(STM)是进行纳米电子器件加工和研究的有效方法^[1-11]. 由于其所具有的原子级分辨力,不仅可以用来做表面成像,而且可以加工几十甚至十几纳米宽的氧化线. 然而,由于光导开关的基本结构——金属-绝缘体-金属(MIM)隧道结的隧穿效应的存在,氧化线的宽度既不能太小,两电极间所施加的偏压也不能太大. 因此,在纳米氧化加工中研究电极电压与氧化线线宽的相互影响就显得至关重要.

1995 年日本的 Matsumoto 等人^[4]在 SiO₂/Si 衬底上镀 4nm 厚钛膜,用 STM 加工出宽 18nm 高 3nm 的氧化钛线条,将这种纳米级氧化线用于 MIM 平行板二极管中作为电子能量势垒,并且得出势垒能量为 $E_g = 0.25\text{eV}$. 1996 年他们^[5]又在 SiO₂/Si 衬底上镀 3nm 的 Ti 膜,用 STM 阳极氧化加工方法加工出 64nm 和大约 10nm 的氧化钛线,研究了 MIM 结电流的温度依赖性和在 300 K 时测量了 MIM 结的 *I-V* 特性,发现 10nm 氧化钛线在相同电压下电流更高并且它对温度的依赖性更弱一些. 1997 年日本的 Shirakashi 等人^[6]用直流磁溅射的方法在 SiO₂/Si 衬底上镀 2~3nm 的 Nb 膜,用 AFM 阳极氧化加工的方法在 Nb 膜上加工氧化线,比较了 54,181 和 234nm 三种不同线宽的 *I-V* 特性,说明所加工的氧化线是作为电子的绝缘材料;对

^{*}天津市自然科学基金(批准号:06 YFJ ZJ C01000)和教育部天津大学南开大学科技合作基金资助项目

[†]通信作者. Email:lqg@tju.edu.cn

2005-11-20 收到,2006-02-20 定稿

同一线宽的氧化线在不同温度下测试了其特性,说明了热辐射温度的存在. 1997 年 Irmer 等人^[1]用轻敲模式 AFM 阳极氧化加工出 15nm 的 Ti-TiO_x-Ti 势垒,测出电流与氧化线宽度成指数关系,并且从非线性 *I-V* 特性得出隧道势垒高度为 178meV. 目前,国内外都还没有定量地研究线宽和电压对隧穿现象的影响,以便对实际的加工做出指导.

本文利用 AFM 阳极氧化加工在 GaAs 衬底上加工纳米氧化钛线隧道结. 根据 AFM 阳极氧化加工的机理^[7-10],通过改变空气中的相对湿度来达到改变氧化钛线宽度的目的,从而研究不同氧化钛线宽度的隧穿条件,并且在不引起隧穿现象的前提下加工了最小宽度的氧化钛线. 文中还总结了不同线宽隧道结的隧穿现象规律,对超高速光导开关响应速度的测试具有一定的指导作用.

2 实验

图 1 为用 L-Edit 软件设计的利用微电子工艺加工的隧道结的电极结构版图. 中间钛线的尺寸为 2μm × 2μm, 两侧电极尺寸为 2μm × 5μm.

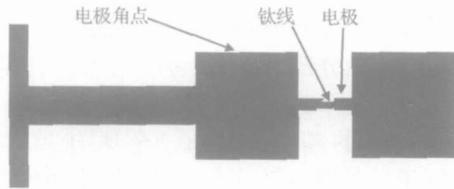


图 1 隧道结的版图设计
Fig. 1 Design of tunneling junction

AFM 图像扫描和阳极氧化加工是在美国 DI (VEECO) 公司的 Nanoscope a 型多功能 SPM 上进行的,成像和加工过程均采用接触模式. 阳极氧化针尖采用的是 NT-MDT™ 公司的 CSCS12/ W₂C 型导电 AFM 探针,针尖的曲率半径小于 35nm,针尖高 10~20μm,针尖锥角小于 22°,针尖和悬臂梁面覆盖了 W₂C(W₂C 薄膜的特征电阻约为 30μΩ·cm), W₂C 薄膜的厚度为 20~30nm,悬臂梁的反射面覆盖 Au.

实验中,首先对隧道结进行 40μm × 40μm 的大范围扫描,然后逐渐缩小扫描范围到 10μm × 10μm,找到隧道结空气间隙包含超薄钛膜区域的中间部位进行扫描测量. 图 2(a) 和 (b) 为 AFM 测试的隧道结的平面图和立体图. 此时,就可以在 AFM 导电针尖和钛膜之间施加 - 8V 偏置电压,针尖以 0.1μm/s 的速度沿垂直于电极的方向在超薄钛膜的中间部位由上到下长距离(8μm)运动,将超薄钛膜的中间部位全部氧化成氧化钛线,将两端电极完全隔开,形成隧道势垒. AFM 阳极氧化加工的纳米氧化钛线的平面图和立体图如图 3(a) 和 (b) 所示.

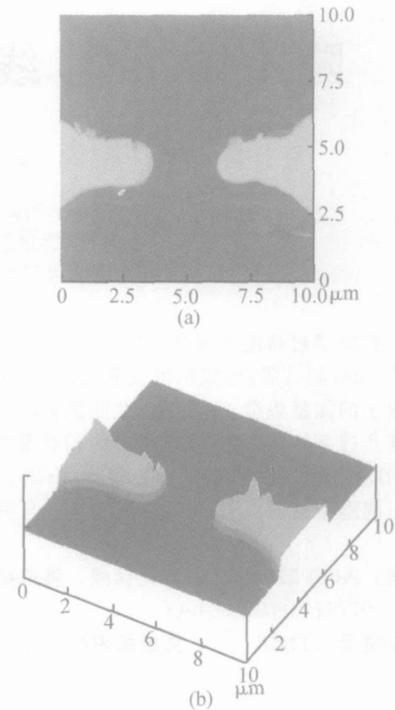


图 2 AFM 测试的隧道结 (a) 平面图;(b) 立体图
Fig. 2 AFM image of tunneling junction (a) Top view image;(b) Three-dimensional image

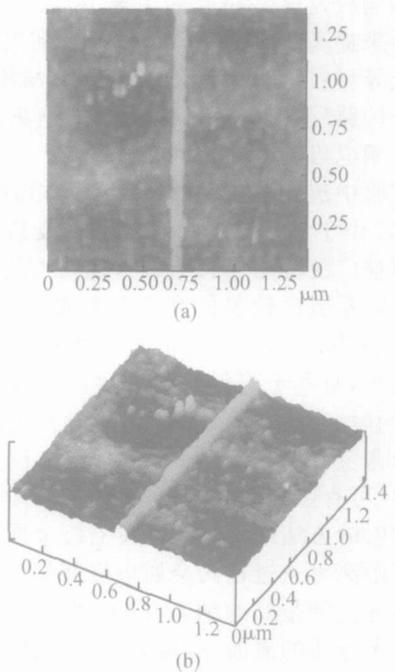


图 3 AFM 阳极氧化加工的纳米氧化钛线 (a) 平面图;(b) 立体图
Fig. 3 TiO_x nano lines formed by AFM anodic oxidation (a) Top-view image;(b) Three-dimensional image

在对器件进行 AFM 阳极氧化加工时,控制空气中的相对湿度分别为 20%, 30% 和 40%, 加工出

宽度分别为 15.6, 34.2 和 46.9nm 的钛氧化线,并且测试了不同宽度氧化线隧道结的 I-V 特性,来说明钛氧化线宽对隧穿现象的影响.

3 结果与讨论

图 4 是相对湿度分别为 20%, 30% 和 40% 时加工出的不同钛氧化线宽度隧道结的 I-V 特性曲线. 从图中的结果可以看出, 室温下隧道结两侧电极之间的 I-V 特性曲线不再为线性, 电流和电压之间出现明显的指数关系. 大致遵循 $I \propto \exp(V^{0.5})$ 的规律^[11]. 这种电场的依赖关系既与内部的漂移导带有关, 又由于氧化钛线的低势垒高度而与金属-氧化物接触的热辐射有关. 说明 AFM 针尖已经将两端电极之间的钛膜完全氧化透, 形成的氧化钛线作为电子的绝缘势垒材料完全将两端的电极隔开. 这是因为当电极间所施加偏压增加时, TiO_x/Ti 之间的内势垒高度 ϕ_{b0} 由于映像电荷势能, 即众所周知的肖特基效应而降低了 ϕ , 即势垒抑制为^[6]

$$\phi = \left[\frac{qE}{4 \epsilon_r \epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (1)$$

其中 q 为电荷量; E 为电场; ϵ_r 为 TiO_x 的相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数. ϕ , ϕ_{b0} 和 ϕ_b 三者之间的关系满足下式

$$\phi = \phi_{b0} - \phi_b \quad (2)$$

而内势垒高度 ϕ_{b0} 是一确定的值, 所以有效势垒高度 ϕ_b 随着电场 E 的平方根的增加而减小. 这与 Villegier 等人^[12] 提出的隧道势垒在接触面上和中心范围内由两个抛物线形式的肖特基势垒组成的说法类似, 因此 I-V 特性可以通过计算传输概率得出, 为指数形式.

同时可以看出, 在电极间施加相同电压的条件下, 图 4(a), (b) 和 (c) 所达到的电流值依次减小. 比如, 施加 6V 电压时, 三个隧道结所达到的电流值依次为 16, 12 和 4μA. 这是由于对较宽的氧化线而言, 所施加电压较低时, 导带内电子密度较小, 温度依赖性较大, 电流主要为热辐射电流; 当所施加电压较高时, 由于高压的存在, 使得电流的温度依赖性变小, 电流的主要部分为 F-N 电流, 由 F-N 隧道电流构成的电流用下式表示:

$$\ln \frac{J}{E^2} = \ln A - \frac{B}{E} \quad (3)$$

式中

$$B = \frac{8 (2 m^* m_0)^{1/2} (q \phi_b)^{3/2}}{3 q h} \quad (4)$$

其中 A 是常数; E 是电场; m^* 是 TiO_x 势垒中电子的有效质量; m_0 是固有电子质量; h 为普朗克常数.

而对于较窄的氧化线而言, 无论电压高低, 其氧

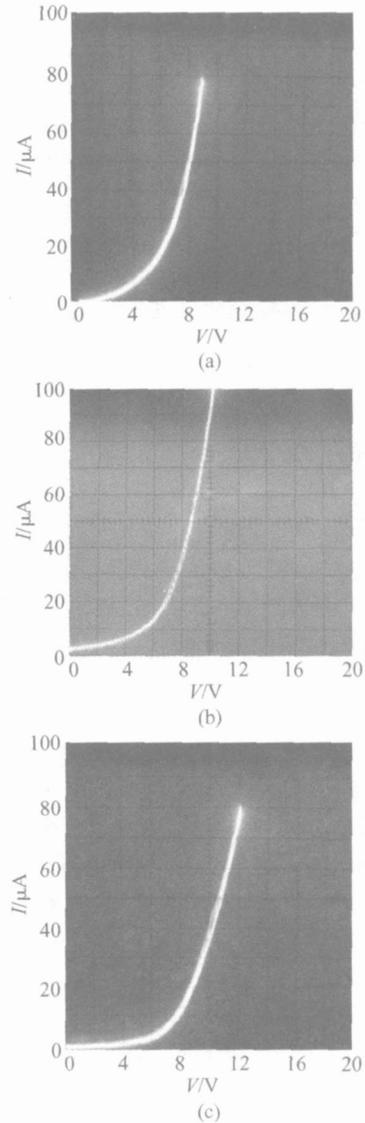


图 4 不同钛氧化线宽度隧道结的 I-V 特性曲线 (a) 湿度为 20%, 线宽为 15.6nm; (b) 湿度为 30%, 线宽为 34.2nm; (c) 湿度为 40%, 线宽为 46.9nm

Fig. 4 I-V characteristics of tunneling junctions with different TiO_x lines width (a) Humidity is 20%, line width is 15.6nm; (b) Humidity is 30%, line width is 34.2nm; (c) Humidity is 40%, line width is 46.9nm

化线导带内电子密度较大, 对温度的依赖性很弱, 所以电流主要为对温度的依赖性很弱的直接隧道电流. 因此, 它可以直接穿过很薄的氧化钛势垒; 而宽氧化钛线的电流大部分为 F-N 电流和热辐射电流, 要达到隧穿电流, 就需要较大的电压.

同时, 在实验中通过不断增加隧道结两电极间施加的电压, 观察其 I-V 特性, 当 I-V 特性变为线性时就可得到一定宽度氧化钛线隧道结的隧穿电压. 结合现有的 AFM 阳极氧化加工水平, 电极间所施加电压为 6V 时, 所能加工的不引起隧穿的最窄氧化钛线大

约为 10nm,此时加工时的相对湿度为 15%。通常情况下,超高速光导开关采样系统所施加偏压为 6V。也就是说,在不引起隧穿的前提下,可以在超高速光导开关两电极间加工最小约为 10nm 的氧化钛线,使得两电极间间隙达到目前为止的最小值,从而使光导开关的响应速度得到进一步的提高。同样,对于其他线宽的隧道结而言,可以通过实验测出一定线宽所对应的隧穿电压,在测试超高速光导开关响应速度的实验中就可以根据实验结果适当地调整电极间所施加的电压,使其不超过器件的隧穿电压,用来防止所施加电压太大而引起隧穿现象的发生以致损坏器件。

4 结论

本文在环境条件(温度、氧气浓度、加工速度、偏置电压)相对保持不变的条件下,仅改变阳极氧化加工时的湿度,加工出宽度分别为 15.63,34.18 和 46.88nm 的钛氧化线,并且测试了不同氧化线宽隧道结的 $I-V$ 特性。发现室温下隧道结电流和电压之间呈明显的指数关系,并且通过对不同氧化线宽隧道结特性的比较表明了氧化线宽度对隧穿现象的影响。同时通过实验得出加工超高速光导开关时不引起隧穿的最窄线宽及其实验条件,为以后加工中更好地控制实验条件以得到特性优良的超高速光导开关奠定了基础。文中还总结了不同线宽隧道结的隧穿现象规律,对超高速光导开关响应速度的测试具有一定的指导作用。

参考文献

- [1] Irmer B, Kehrle M, Lorenz H, et al. Fabrication of Ti/TiO_x tunneling barriers by tapping mode atomic force microscopy induced local oxidation. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(12):1733
- [2] Matsumoto K. STM/AFM nano-oxidation process to room temperature operated single electron transistor and other devices. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(4):612
- [3] Kuang Dengfeng, Liu Qinggang, Hu Xiaotang, et al. Mechanism analysis of AFM tip induced oxidation of Ti in air. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(12):1303 (in Chinese) [匡登峰,刘庆纲,胡小唐,等.大气状态下 AFM 针尖诱导氧化加工 Ti 膜的机理分析, 2003, 24(12):1303]
- [4] Matsumoto K, Takahashi S, Ishii M, et al. Application of STM nanometer-size oxidation process to planar-type MIM diode. *Jpn J Appl Phys*, 1995, 34:1387
- [5] Matsumoto K, Ishii M, Segawa K. Application of scanning tunneling microscopy nanofabrication process to single electron transistor. *J Vac Sci Technol B*, 1996, 14(2):1331
- [6] Shirakashi J, Matsumoto K, Miura N, et al. Nb/Nb oxide-based planar-type metal/insulator/metal (MIM) diodes fabricated by atomic force microscope (AFM) nano-oxidation process. *Jpn J Appl Phys*, 1997, 36:1120
- [7] Avouris P, Hertel T, Martel R, et al. Atomic force microscope tip-induced local oxidation of silicon: kinetics, mechanism, and nanofabrication. *Appl Phys Lett*, 1997, 71:285
- [8] Bubanja V, Matsumoto K, Gotoh Y. Single electron memory at room temperature: experiment and simulation. *Jpn J Appl Phys Lett*, 2001, 40:87
- [9] Lemeshko S, Gavrilov S, Shevovoyakov V, et al. Investigation of tip-induced ultrathin Ti film oxidation kinetics. *Nanotechnology*, 2001, 12:273
- [10] Snow E S, Jernigah G G, Campbell P M. The kinetics and mechanism of scanned probe oxidation of Si. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(13):1782
- [11] Vullers R J M, Ahlskog M, Van Haesendonck C. Titanium nanostructures made by local oxidation with the atomic force microscope. *Appl Surf Sci*, 1999, 144/145:584
- [12] Villergier J C, Matheron G. Some properties of Nb-Nb₂O₅-Pb (In) Josephson tunnel junctions for deuces applications. *IEEE Trans Magn*, 1981, 17:855

Effect of the TiO_x Line Width on Tunneling at Tunneling Junctions *

Zhang Chaoyan¹, Liu Qinggang^{1,†}, Li Min¹, Kuang Dengfeng²,
Guo Weilian³, Zhang Shilin³, and Hu Xiaotang¹

(1 State Key Laboratory of Precision Measurement Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2 Institute of Modern Optics, College of Information Technical Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

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

Abstract : Ultra-fine oxidized titanium (TiO_x) lines are formed on the surface of a titanium (Ti) layer by an atomic force microscope (AFM) tip acting as a selective anodization electrode. The Ti layers are about 3nm thick on the GaAs substrates and are formed by magnetron sputtering. The Ti- TiO_x -Ti construction forms a metal-insulator-metal tunneling junction, which is the basic structure of the ultra-fast photoconductive switch. The TiO_x works as an energy barrier for the electrons. In order to illustrate the effect of the TiO_x line width on the tunneling and to determine the narrowest TiO_x line as well as the conditions under which it can be formed without leading to the breakdown of the tunneling junction, TiO_x lines with widths of 15.6, 34.2, and 46.9nm are fabricated by changing the ambient humidity while keeping the scanning speed, oxygen concentration, and applied voltage fixed. The I-V characteristics of tunneling junctions with different widths are measured. The results indicate that the narrowest TiO_x line with a width of about 10nm, can be fabricated between the two electrodes of the ultra-fast photoconductive switch when the voltage between the two electrodes is 6V without leading to the breakdown of the tunneling junction.

Key words : AFM tip induced anodic oxidation; Ti oxidation wires; tunneling junction; ambient humidity; ultra fast photoconductive switch

PACC: 0779; 8160; 6048G

Article ID : 0253-4177(2006)08-1453-05

* Project supported by the Natural Science Foundation of Tianjin(No.06 YFJ ZJC 01000) and the Cooperation Foundation of Tianjin University and Nankai University

† Corresponding author. Email:lqg@tju.edu.cn

Received 20 November 2005, revised manuscript received 20 February 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics