

Tunneling Phenomenon in the Photoconductive Semiconductor Switch *

LIU Qing-gang^{1*}, GAO Xia¹, ZHAO Lin¹, JIANG Ning-chuan¹, HU Xiaotang¹

(State Key Lab of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Photoconductive semiconductor switch (PCSS) is fabricated by combining lithography technique and atomic force microscope (AFM) 's tip induced anodic oxidation technique in air ambient. The nanometer scale Ti-TiO_x-Ti tunneling junction forms the basic PCSS 's structure. The electric characteristic of the PCSS is analyzed. The micro type PCSS 's output characteristic varies with the width of the TiO_x in air ambient and room temperature. When the width is narrower than 100 nm, the output curve appears another nonlinear peak after a normal linear one, and there is a tunneling phenomenon in the Ti-TiO_x-Ti junction which has different tunneling characteristic with different TiO_x width.

Key words: photoconductive semiconductor switch(PCSS); tunneling junction; tunneling phenomenon; AFM tip-induced anodic oxidation

EEACC:2530G

光电导开关中的隧穿现象 *

刘庆纲^{1*}, 高霞¹, 赵琳¹, 江宁川¹, 胡小唐¹

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:采用光刻和大气环境下原子力显微镜(AFM)阳极诱导氧化加工相结合的加工方法,加工由 Ti-TiO_x-Ti 纳米级隧道结构成其基本结构的微型光电导开关(PCSS),并对其电特性进行了研究和分析。研究结果表明在大气室温条件下,微型 PCSS 的输出特性随氧化物宽度不同而不同,当宽度小于 100 nm 时,其输出特性表现为在一个线性峰值的输出过后,又出现了一个非线性的峰值;在一定条件下 Ti-TiO_x-Ti 纳米级隧道结存在隧穿效应,且其隧穿特性随绝缘金属氧化物的宽度不同而不同。

关键词:微型光电导开关(PCSS);隧道结;隧穿现象;AFM 阳极诱导氧化

中图分类号:TN16

文献标识码:A

文章编号:1004-1699(2008)02-0269-04

光电导开关是最早出现的高速光电导器件,其具有机械结构简单、开关速度快、触发更稳定、热容量和热传导性高、寄生电感低、能直接产生微波频段的电脉冲、更容易实现多个开关的同步、灵敏度高和实现光电隔离等优点。超高速光电导开关可以用于光通讯系统中的高速光接收器件,可以产生高速周期性电信号,可以辐射 THz 波,可以用于纯电气很难做到 100 GHz 以上超高速电子器件的评价技术,可以和扫描探针显微镜结合构筑高速的扫描探针显微系统,可以用于超高速电光采样技术,还可以用于超快瞬态和无损伤检测^[1-3]。

基于 GaAs 衬底的金属-绝缘体-金属纳米级隧道结,是微型光电导开关(PCSS)的基本结构。在如图 1 中所示传统的空气隙型光电导开关中^[4],在衬底表面形成的金属薄膜衬底构成一对电极,电极之间暴露的表面(空气隙)形成用于进入被探测光的光学窗口;在电极对上施加合适的电压,当光照射在光学窗口上,在衬底中产生激发的载流子(电子和空穴),开关很快从阻断状态转换为导通状态,PCSS 两端电压下降,这一转换过程可以在皮秒甚至亚皮秒量级的时间内完成;当光脉冲熄灭后,由于载流子的复合,PCSS 将很快恢复阻断状态,这样在负载上

基金项目:天津市自然科学基金重点项目资助(06 YFJ ZJ C01000)

收稿日期:2007-09-30 修改日期:2008-01-01

就得到了一个瞬态响应电脉冲,通过对电脉冲的检测,可以实现 PCSS 特性以及输入光信号特性的检测。为了提高空气隙型 PCSS 的响应速度,通常会采用增大电极电压、减小电极间距等方法。由于电极之间衬底材料表面上的光学窗口裸露,在电极之间施加更高电压时,增大了光学窗口裸露表面上的爬行放电和空气间隙的放电,使得器件难以工作;其次,即使利用溅射或其它气相沉积技术在光学窗口上形成光学透明保护绝缘层,由于工艺复杂和开口较大,也很难提高 PCSS 的响应速度。

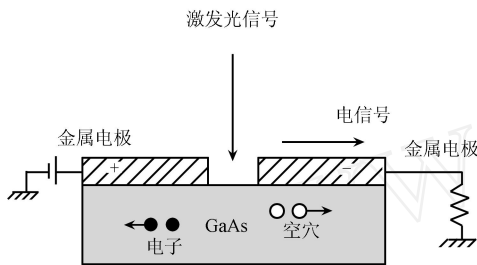


图1 传统光电导开关的基本结构

为了提高 PCSS 的响应速度,方法之一就是减小空气隙的宽度,而减小电极间距,虽然使光生载流子的输运距离减小,但随着空气隙的减小,必然提高了其击穿的可能性。为此,本实验中采用 MEMS 加工工艺与原子力显微镜 (AFM) 阳极诱导氧化纳米加工工艺相结合的方法^[5],选择具有较低载流子寿命的砷化镓 (GaAs) 半导体材料,设计并加工试制了可形成微型 PCSS 的结构,并对其基本性能、特殊现象等进行了分析和研究。

1 实验

在抛光洗净的砷化镓衬底上,利用磁控溅射的方法制作一层纳米级金属钛膜 (Ti),然后利用 MEMS 光刻工艺加工 PCSS 的电极以及信号传输线,选用共面带状线结构,在此基础上,利用 AFM 阳极诱导氧化加工方法加工金属电极,将金属 Ti 氧化透成为 TiO_x ,在金属电极间形成纳米级宽度的绝缘层势垒,这样 Ti-TiO_x-Ti 就构成了金属-绝缘体-金属隧道结,进而形成了本研究的微型 PCSS,如图 2 所示。图 3 为测试的 PCSS 的微带线和电极结构的 AFM 图像。需要加工的氧化钛线的长度为 5 μm 左右,在这种情况下,可以得到均匀的、连续的、可靠的氧化钛线,大大防止了可能出现电流泄漏的几率。光电导开关传输线相对于衬底的平均高度为 350.9 nm,传输线的平均宽度为 5.2 μm,光导空气间隙的长度为 8.0 μm。

AFM 阳极氧化加工实验采用美国 DI

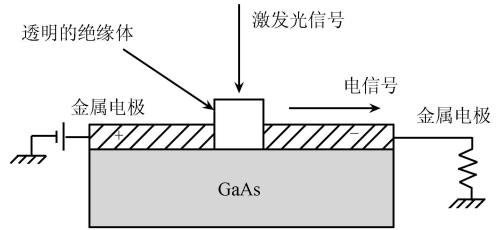


图2 间隙为透明绝缘层的超高速光电导开关

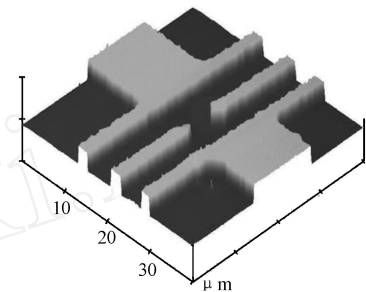


图3 AFM 测试的超高速光导开关的微带线和电极结构的立体图

(VEECO)公司的 Nanoscope a 型多功能 SPM,加工过程均采用接触模式。阳极氧化针尖采用的是 NT-MDTTM 公司的 C5CS12/W₂C 型导电 AFM 探针,针尖的曲率半径小于 35 nm,针尖高 10 μm ~ 20 μm,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 30 μ·cm),W₂C 薄膜的厚度为 20 nm ~ 30 nm,悬臂梁的反射面覆盖 Au。

2 结果讨论及分析

2.1 PCSS 的输出特性

为了使用电路分析的方法研究光电导开关的瞬时响应特性,将光电导开关表示为嵌在传输线中的一个时变电阻 $R_s(t)$ 和一个电容 C_g 的并联组合,如图 4 所示。假设电极与薄膜的接触是纯欧姆性的,则输出电压⁽⁶⁾为:

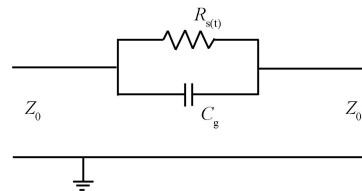


图4 光电导开关等效电路

$$V_{out} = V_{in} \frac{Z_0}{2Z_0 + R_s(t)} \tag{1}$$

$$R_s(t) = \frac{L^2}{q[N(t)\mu_n + P(t)\mu_p]} + R_0 \tag{2}$$

其中 Z_0 为微带线特性阻抗, L 为间隙宽度, $N(t)$ 为光生电子载流子总数, $P(t)$ 为光生空穴载流子总数, μ_n 为电子载流子迁移率, μ_p 为空穴载流子迁移

率, q 为电子(空穴)的电量。只要求出了光电导开关的电阻 $R_s(t)$, 就可以近似求出其输出电脉冲波形。根据半导体物理学, 非平衡态载流子运动和分布满足^[7](一维运动情况下)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \mu_{nn} \frac{\partial E}{\partial x} + \mu_n E \frac{\partial n}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{n}{\tau_n} + f_n \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\mu_{pp} \frac{\partial E}{\partial x} - \mu_p E \frac{\partial p}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{p}{\tau_p} + f_p$$

其中 τ_n, τ_p 分别为非平衡载流子电子和空穴的寿命, G_n, G_p 分别为非平衡载流子电子和空穴的产生率, D_n, D_p 分别为电子和空穴的扩散系数, μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率, n, p, n_0, p_0 分别为电子和空穴的平衡浓度和非平衡浓度。式(2)是载流子在非平衡态的扩散和漂移过程中所遵循的连续性方程。在给定的边界条件和初始条件下, 求解方程组就可以得到半导体内各位置、各时刻载流子的分布, 进而分析光电导开关在超短光脉冲激励下的输出特性。衬底采用低温生长的 GaAs 材料^[8], 当光照激发产生载流子时, 对设计的超高速光导开关进行计算时的材料参数(载流子迁移率、吸收系数和反射系数等)取 $\mu_n = 0.88 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}, \mu_p = 0.035 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}, \tau_n = 0.4 \text{ ps} = 4 \times 10^{-13} \text{ s}$ 。拟采用的激发超快光电导开关产生载流子的飞秒激光光源的参数为 $\lambda = 8 \times 10^{-7} \text{ m}, h\nu = 2.49 \times 10^{-19} \text{ J}$, 脉冲能量和脉冲宽度 $I = 1 \times 10^{-3} \text{ J}, T = 5 \times 10^{-14} \text{ s}$, 该材料对此光的吸收系数和反射系数分别为^[9], $\alpha = 10^6 \text{ m}^{-1}, R = 0.28$, 超快光电导开关所加偏置电压、间隙宽度和长度(即加工的氧化钛线的宽度和长度)、光照可以达到的衬底深度分别为 $U = 10 \text{ V}, W = 1 \times 10^{-7} \text{ m}, L = 5 \times 10^{-6} \text{ m}, b = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$, 根据以上参数, 获得了 t 时刻电子载流子浓度 $n(x, t)$ 和空穴载流子浓度 $p(x, t)$ 的表达式。在激发时间内积分, 得到式(4)~(5):

$$N(t) = 3.26 \times 10^{23} \{ (1.25 \times 10^{-9} t e^{-4 \times 10^{26} t^2} - 3.91 \times 10^{-24} e^{-4 \times 10^{26} t^2}) + e^{-2.5 \times 10^{12} t} [(6.92 \times 10^{-9} t - 2.77 \times 10^{-21}) e^{-2 \times 10^{12} (8.8 \times 10^{-7} + 5 \times 10^{-8} t)^2} + (2.77 \times 10^{-21} - 6.92 \times 10^{-9} t) e^{-15.488 \times 10^{27} t^2}] \} \quad (4)$$

$$P(t) = 3.26 \times 10^{23} \{ (4.69 \times 10^{-8} t \times e^{-4 \times 10^{26} t^2} - 1.46 \times 10^{-22} e^{-4 \times 10^{26} t^2}) + e^{-2.5 \times 10^{12} t} [(1.03 \times 10^{-8} t - 4.12 \times 10^{-21}) e^{-2 \times 10^{12} (-3.5 \times 10^{-6} + 5 \times 10^{-8} t)^2} + (1.03 \times 10^{-8} t - 4.12 \times 10^{-21}) \times e^{-2.45 \times 10^{25} t^2}] \} \quad (5)$$

由于光半导体与电极之间的接触可以认为是纯欧姆接触, 所以 $R_0 = 0$, 这样, 式(1)可以写成 $R_s(t) = L^2/q[N(t)\mu_n + P(t)\mu_p]$, 而输出电压为和开关电流分别为

$$V_{out} = V_{in} \frac{Z_0}{2Z_0 + \frac{L^2}{q[N(t)\mu_n + P(t)\mu_p]}} \quad (6)$$

$$I_{out} = V_{in} \frac{V_{in}}{2Z_0 + \frac{L^2}{q[N(t)\mu_n + P(t)\mu_p]}}$$

该微型 PCSS 理论模拟输出特性如图 5 所示, 其中(a)为微型 PCSS 的电压-时间输出特性, (b)为具有不同氧化线宽度的微型 PCSS 的电压-时间输出特性。从图中可以看到, 在一个线性峰值的输出过后又出现一个非线性的较矮峰值, 可以认为后一个峰值不是特征输出。在线性输出部分, 信号的最大半宽只有 10 fs 左右, 这对于要求快速响应的光电导开关来说无疑是最成功的地方。经过理论研究和分析, 可能导致这种非线性输出的原因可能存在双光子吸收和热吸收。而由以上分析可以看出, 热吸收产生这种非线性输出的几率更大一些, 是产生这种特殊现象的主要原因, 也就是说由于激光照射之后, 无法使聚集在半导体中的热量迅速散去, 从而产生了这种非理想输出, 所以今后的改进方向就是给光电导开关提供好的散热条件, 使激光停止照射以后, 聚集的热量也能够几乎同时消散。本文改变开关间隙宽度 W 的大小, 可以看出 W 值越大, 光电导开关输出脉冲的宽度越大, 非线性输出越不明显。这也说明了热吸收对 PCSS 输出特性的影响。

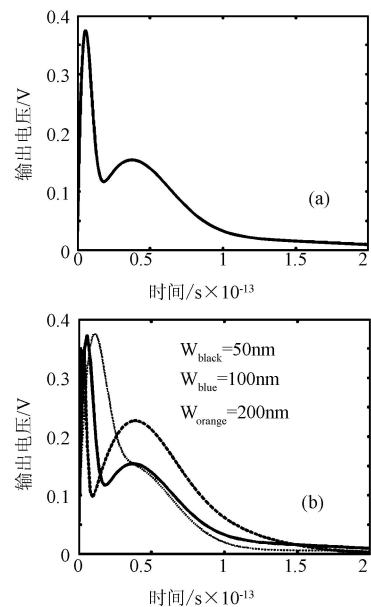


图 5 (a)微型 PCSS 的 $V-t$ 特性, (b)不同氧化线宽度的 PCSS 的 $V-t$ 特性

2.2 隧道结特性

在微型 PCSS 的研究中, 为了检测其基本性能, 首先对其电特性进行了研究和测试, 理论和实验结果表明, 在大气室温条件下, 由 Ti-TiO_x-Ti 构成的

纳米级隧道结存在隧穿效应,且其隧穿特性随绝缘金属氧化物的宽度不同而不同,如图6所示。这是由于隧道结是由两个纳米级间距的电极和中间的绝缘介质组成的结构。在外电路向它提供偏压时,由于电子的量子属性,它们有一定的几率通过该势垒,由一个电极到达另一电极,从而在外电路上可以观察到稳态电流。隧穿电流大小决定于隧穿几率,而后者又由势垒的高度和厚度决定。

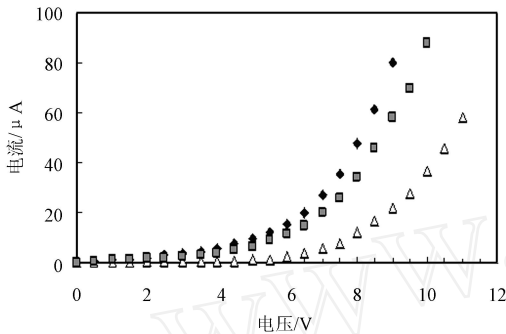


图6 不同氧化钛线宽度隧道结的I-V特性曲线:(a)“ ”线宽为15.6 nm;(b)“ ”线宽为34.2 nm;(c)“ ”线宽为46.9 nm

3 结论

本文采用MEMS光刻工艺和AFM纳米阳极诱导氧化加工工艺相结合的加工方法,对GaAs衬底上溅射的3-5纳米的金属钛膜进行结构加工,试制了微型光电导开关,利用理论模拟分析的方法对其输出特性进行了研究,对构成其基本结构的纳米级Ti-TiO_x-Ti构成的MIM隧道结的特性,特别是在氧化线宽度改变后隧穿特性的变化规律进行了研究。研究结果表明在大气室温条件下,微型PCSS的输出特性随氧化物宽度不同而不同,当宽度小于100 nm时,其输出特性表现为在一个线性峰值的输出过后,又出现了一个非线性的峰值;在一定条件下

Ti-TiO_x-Ti纳米级隧道结存在隧穿效应,且其隧穿特性随绝缘金属氧化物的宽度不同而不同。

致谢

感谢天津大学理学院米文博博士和白海力教授在钛薄膜加工、天津大学电信学院张世林教授和郭维廉教授在器件性能测试中的大力支持。

参考文献:

- [1] Matsumoto K., STM/AFM Nano-Oxidation Process to Room-Temperature-Operated Single-Electron Transistor and Other Devices[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(4): 612-628.
- [2] Haring P, Bolivar, Coherent Terahertz Spectroscopy, Chapter 5[M]. Ed. by A. Miller, M. Ebrahimzadeh and D. M. Finlayson, Institute of Physics, Bristol, 1999, pp. 151-192.
- [3] Gerber G, Sattler F, Vogler S, et al., Femtosecond time-resolution in scanning tunneling microscopy[C]// Quantum Electronics Conference, Proceedings of 5th European, 1994:33-33.
- [4] Vullers R J M, Ahlskog M, Van Haesendonck C. Titanium Nanostructures Made by Local Oxidation with the Atomic Force Microscope[J]. Applied Surface Science, 1999, 144-145:584-588.
- [5] 张超艳,刘庆纲,李敏,胡小唐,隧道结TiO_x线宽度对隧穿现象的影响[J]. 半导体学报, 2006, 27(8): 1453-1457.
- [6] Sayadian H A, Li M G and Lee C H. Generation of High-Power Broad-Band Microwave Pulses by Picosecond Optoelectronic Technique[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1989, 37(1):43-50.
- [7] Dagata J A, Schneir J, Harary H H, et al., Modification of Hydrogen-Passivated Silicon by a Scanning Tunneling Microscope Operating in Air[J]. Applied Physics Letters, 1990, 56(20):2001-2003.
- [8] 李琦,张显斌,施卫.半绝缘GaAs光电导开关的超线性时间响应分析[J]. 光子学报, 2002, 31(9): 1086-1089.
- [9] Ph Avouris, T. Hertel, and R. Martel, Atomic Force Microscope Tip-Induced Local Oxidation of Silicon: Kinetics, Mechanism, and Nanofabrication [J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(2): 285-287.



刘庆纲(1964-),男,博士,副教授,1987、1990和1996分别获得学士、硕士和博士学位,1992~1995在日本东北大学工学部机械电子工学科留学,1997~1999在日本东北大学和日本工业技术院计量研究所从事客员研究员和博士后研究,现在天津大学精密测试技术及仪器

国家重点实验室、天津大学精密仪器与光电子工程学院工作,研究方向为微纳测试与加工技术、光电测试技术等,lqg@tju.edu.cn.