

氧分压对 Ni/HfO_x/TiN 阻变存储单元阻变特性的影响

张志超 王芳 吴仕剑 李毅 弭伟 赵金石 张楷亮

Influneces of different oxygen partial pressures on switching properties of Ni/HfO_x/TiN resistive switching devices

Zhang Zhi-Chao Wang Fang Wu Shi-Jian Li Yi Mi Wei Zhao Jin-Shi Zhang Kai-Liang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 057301 (2018) DOI: 10.7498/aps.20172194

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20172194>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[LaTiO 高k 栅介质 GeMOS 电容电特性及 Ti 含量优化](#)

Electrical properties of LaTiO high-k gate dielectric Ge MOS Capacitor and Ti content optimization

物理学报.2016, 65(3): 037301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.037301>

[超短沟道绝缘层上硅平面场效应晶体管中热载流子注入应力导致的退化对沟道长度的依赖性](#)

Gate length dependence of hot carrier injection degradation in short channel silicon on insulator planar MOSFET

物理学报.2015, 64(16): 167305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.167305>

[高k 栅介质小尺寸全耗尽绝缘体上锗 p 型金属氧化物半导体场效应晶体管漏源电流模型](#)

Modeling on drain current of high-k gate dielectric fully-depleted nanoscale germanium-on-insulator p-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报.2014, 63(23): 237304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.237304>

[高k 栅介质 GeOI 金属氧化物半导体场效应管阈值电压和亚阈斜率模型及其器件结构设计](#)

Models on threshold voltage/subthreshold swing and structural design of high-k gate dielectric GeOI MOS-FET

物理学报.2014, 63(8): 087301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.087301>

[柔性有机非易失性场效应晶体管存储器的研究进展](#)

Progress of flexible organic non-volatile memory field-effect transistors

物理学报.2014, 63(2): 027302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.027302>

氧分压对Ni/HfO_x/TiN阻变存储单元阻变特性的影响*

张志超 王芳[†] 吴仕剑 李毅 弭伟 赵金石 张楷亮[‡]

(天津理工大学电气电子工程学院, 天津市薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

(2017年10月10日收到; 2017年12月5日收到修改稿)

采用射频磁控溅射的方法, 基于不同氧分压制备的氧化铪构建了Ni/HfO_x/TiN结构阻变存储单元. 研究发现, 随着氧分压的增加, 薄膜表面粗糙度略有降低; 另一方面, 阻变单元功耗降低, 循环耐受性能可达10³次, 且转变电压分布的一致性得到改善. 结合电流-电压曲线线性拟合结果及外加温度测试探究了器件的转变机理, 得出在低阻态的传导机理为欧姆传导机理, 在高阻态的传导机理为肖特基发射机理, 并根据氧空位导电细丝理论, 对高低阻态的阻变机理进行了详细的理论分析.

关键词: 阻变存储器, 氧化铪, 氧分压, 阻变机理

PACS: 73.40.Qv, 72.80.Ga, 71.30.+h

DOI: 10.7498/aps.67.20172194

1 引言

目前主流的flash存储器已经达到了其尺寸缩减的极限, 在下一代新型非易失性存储器中, 阻变存储器(resistive random access memory, RRAM)具有存储密度高、转变速度快、功耗低、多值存储等优点, 被认为是下一代非易失性存储器的有力竞争者^[1-3]. 可用于阻变存储器中间层材料非常多^[4-7], 其中氧化铪作为一种高 k 介质材料并且与目前的硅基集成电路制造技术相兼容, 人们对以氧化铪为中间层的阻变存储器进行了广泛的研究. 可用于氧化铪基阻变存储器的电极材料很多, 但是对Ni/HfO_x/TiN结构阻变存储器的研究还很少^[8], 已报道的器件具有单极性和双极性两种转变方式, 循环耐受性能可达10³次, 但是高阻态波动很大, 已有报道只对单极性转变机理进行了分析, 未讨论双极性的转变机理. 目前, 对电阻转变效应

的机理提出了较多的理论^[9-11]. 对于氧空位导电细丝的阻变器件, 氧空位与氧离子的浓度对阻变性能有很大的影响^[12]. 文献^[13]报道的Ni/HfO_x/Pt结构的阻变单元, 表现出了双极性的转变特性, 经过分析其导电机理是金属Ni导电细丝的形成和断裂; 然而对同样结构的Ni/HfO_x/Pt阻变单元, 文献^[14]报道其具有非极性的转变特性, 认为该存储单元在低阻态时的导电细丝是由金属Ni导电细丝和氧空位导电细丝共同形成的. 阻变机理的不明确制约了阻变存储器件的进一步发展.

为进一步探究氧离子浓度对阻变器件性能的影响, 本文制备了Ni/HfO_x/TiN结构的阻变存储单元, 其中介质层氧化铪在不同氧分压的条件下利用射频磁控的方法制备; 通过研究氧离子浓度对阻变特性的影响, 并根据电流-电压($I-V$)曲线拟合以及外加温度测试, 对高低阻态的阻变机理进行了分析.

* 国家重点研发计划(批准号: 2017YFB0405600)和天津市自然科学基金(批准号: 17JCYBJC16100, 17JCZDJC31700)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: fwang75@163.com

[‡] 通信作者. E-mail: kailiang_zhang@163.com

2 实验

采用射频磁控溅射, 利用金属 Hf 靶材, 改变通入反应腔室的氩气和氧气的流量比来改变氧分压, 在氧分压分别为 2%, 4% 和 6% 条件下在 TiN/SiO₂/Si 衬底上分别沉积了 20 nm 厚的 HfO_x 薄膜, 利用金属掩膜版通过电子束蒸发的方法制备了直径 300 μm, 厚度 200 nm 的圆柱形金属 Ni 作为上电极. 使用安捷伦 B1500 A 型半导体参数分析仪测试阻变单元的电学性质, 并采用加温装置对器件进行温度测试, 测试过程中底电极 TiN 接地, 所有

的电压和电流激励都加在顶电极 Ni, 并规定正向电流是从顶电极 Ni 指向底电极 TiN 方向.

3 结果与讨论

3.1 氧化钬薄膜的表征

图 1 为不同氧分压条件下氧化钬薄膜的原子力显微镜 (AFM) 图, 所制备薄膜表面的均方根粗糙度随着氧分压的增加而降低, 分别为 0.22, 0.15 和 0.14 nm. 在较高的氧分压条件下, 薄膜的沉积速率较慢, 从而使得薄膜的表面形貌略有差异.

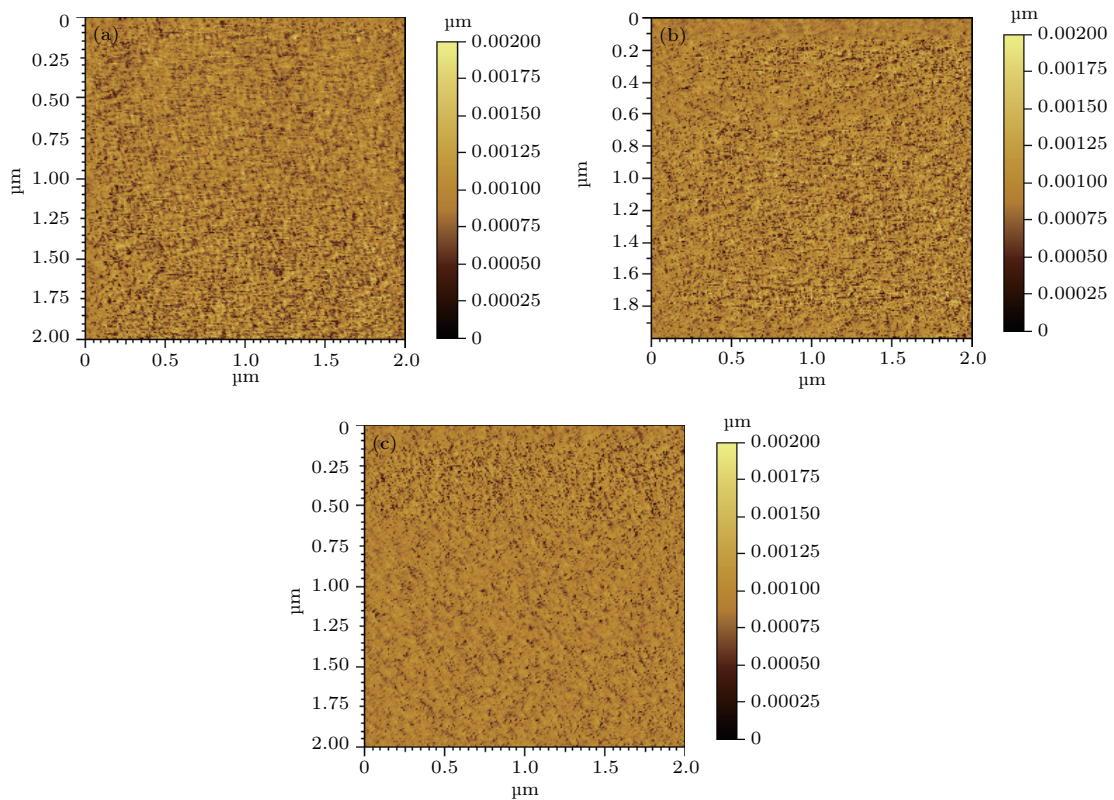


图 1 不同氧分压条件下 HfO_x 薄膜的 AFM 图 (a) 2%; (b) 4%; (c) 6%

Fig. 1. AFM surface morphology of HfO_x thin films deposited under different oxygen partial pressure: (a) 2%; (b) 4%; (c) 6%.

对不同氧分压条件下制备的氧化钬薄膜进行了 X 射线光子能谱 (XPS) 测试^[15], 利用 XPS 图谱表征所制备的氧化钬薄膜的化学状态, 峰位校正以 C 1s 峰为标准. 图 2 (a) 和 (b) 是不同氧分压条件下氧化钬薄膜 O 1s 与 Hf 4f 的 XPS 图谱. 从图 2 (a) 可以看出, O 1s 的 XPS 图谱利用高斯拟合出两个峰位, 位于 529.8 eV 的峰对应于和金属钬离子结合的氧离子, 位于 531.2 eV 的峰对应于氧化钬薄膜缺

陷区域的非晶格氧离子. 在图 2 (b) 中, Hf 的 4f_{7/2} 与 4f_{5/2} 峰分别位于 16.8 eV 和 18.5 eV. 通过对拟合的峰位的面积进行计算, 在 2%, 4% 以及 6% 氧分压的条件下, 位于 529.8 eV 处的氧离子的含量分别为 53%, 55% 和 58%, 随着氧分压的增加而增加. O 与 Hf 的原子比分别为 1.41, 1.44 和 1.54, 这说明随着制备过程中氧分压的增加, 所制备薄膜的氧化程度增加.

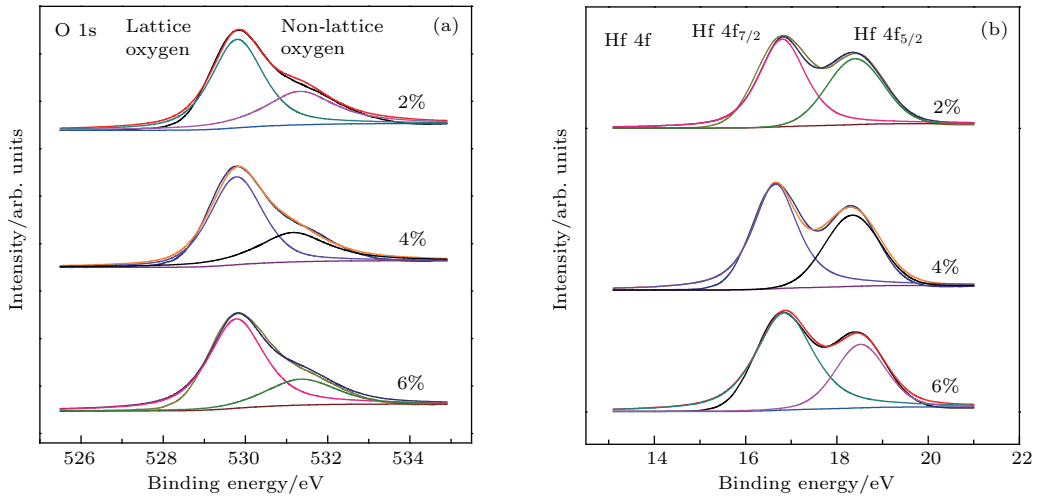


图2 不同氧分压条件下HfO_x薄膜的(a) O 1s和(b) Hf 4f的XPS图谱

Fig. 2. XPS spectra of the elements O 1s (a) and Hf 4f (b) in the HfO_x films deposited at different oxygen partial pressure.

3.2 Ni/HfO_x/TiN阻变存储单元的电学特性

图3(a)为不同氧分压下Ni/HfO_x/TiN阻变存储单元的*I-V*特性,初始化后,电压的扫描方向为0 V → -2 V → 0 V → 2 V → 0 V.所有的存储单元都具有双极性电阻转变的性质.对于氧分压为6%条件下的存储单元,电压从0 V向负向电压增加时,电流值也随之增加.当电压增加到约-0.8 V时,电流急剧增加,即所谓的set过程;在电压从-2 V扫描回0 V的过程中,器件保持在低阻态.然后电压向正向扫描的过程中,器件首先处于低阻态,电压增加到1.9 V时,电流突然降低,即所谓的reset过程;最后电压从2 V扫描回0 V过程中,器件一直保持在高阻状态.从图3(b)可以看出,随着氧分压的增加,Ni/HfO_x/TiN阻变存储单

元整体的功耗降低,这是由于在更高氧分压的条件下,所制备的氧化钬薄膜氧化程度越高,从而薄膜的整体阻值变大,即使得器件的电流随着氧分压的增加而减小.另外,该器件具备自限流性能,即在转变过程中不需要外加限制电流.图3(b)是不同氧分压下Ni/HfO_x/TiN阻变存储单元转变电压的累积概率分布图.计算了不同氧分压下转变电压的标准差,在2%,4%和6%氧分压的条件下,set电压的标准差分别为0.23,0.21和0.16;reset电压的标准差分别为0.06,0.05和0.02.由此可见,随着氧分压的增加,转变电压的一致性得到改善.在6%氧分压条件下器件转变电压的一致性最好,这是由于在氧化程度较高的薄膜中可以更好地防止氧空位缺陷的自由聚集^[16],从而使得导电细丝的形成和断裂会在某一确定的区域发生,即转变电压的一致性得到改善.

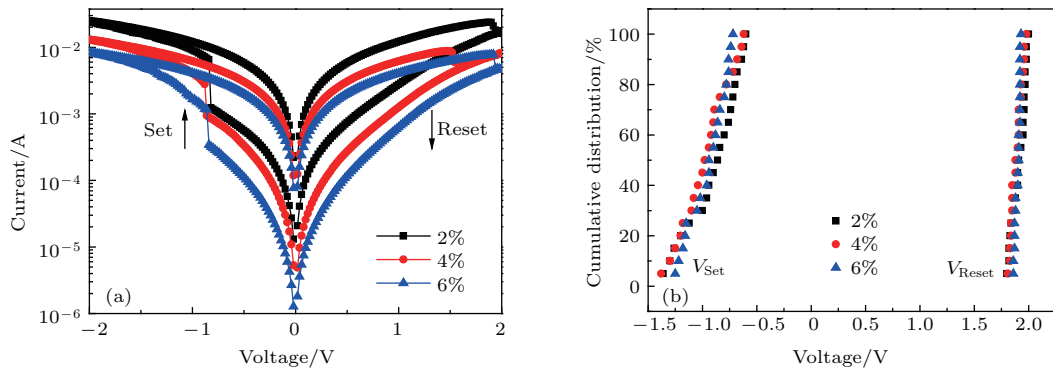


图3 (a)不同氧分压条件下Ni/HfO_x/TiN阻变存储单元的双极性阻变特性*I-V*曲线;(b)不同氧分压条件下Ni/HfO_x/TiN阻变存储单元连续20次循环的转变电压累积概率分布

Fig. 3. (a) Typical bipolar resistive switching *I-V* curves of Ni/HfO_x/TiN devices deposited under different oxygen partial pressure; (b) *V*_{set} and *V*_{reset} distributions for Ni/HfO_x/TiN devices deposited under different oxygen partial pressure.

循环耐受性是衡量阻变存储器非易失性好坏的重要指标, 图4是不同氧分压条件下循环耐受性测试结果, 其中高低阻态的阻值是在100 mV处取得. 从图4可以看出, 不同氧分压条件下, 随着测试过程中循环次数增加, 相对于高阻态 (HRS), 低阻态 (LRS) 变化波动不大, 高阻态阻值会随着循环次数的增加而衰减, 最终使得高低阻值倍率小于10. 文献[17]中报道过相似的高阻衰减的现象, 这是由于在 reset 过程中, 由于氧离子的不断耗尽, 减少了

与氧空位结合的概率, 使得氧空位导电细丝在 reset 过程中断裂不完全, 即 reset 过程不完全, 导致高阻态阻值会随着循环次数而衰减. 另外从图4中可以看出, 随着氧分压的增加, 高阻态的衰减过程会减缓. 这是由于在更高的氧分压的制备条件下, 薄膜中所含的氧离子更多, 从而减缓了高阻态的衰减过程[18].

3.3 机理分析

为探究该阻变存储单元的阻变机理, 将高低阻态的 $I-V$ 曲线在双对数坐标下进行线性拟合. 从图5(a)可以看出, 不同氧分压条件下制备的 Ni/HfO_x/TiN 阻变存储单元, 低阻态时的 $I-V$ 曲线在双对数坐标下符合线性关系, 表现出欧姆导电特性, 这说明存储单元在低阻态的电流是通过导电细丝进行传导. 为进一步探究这是何种导电细丝, 选取6%氧分压条件下制备的存储单元, 研究了低阻态下温度与电阻的关系. 从图5(b)可以看出, 随着温度的升高, 低阻态的电阻值降低, 具备半导体性质, 这说明在低阻态时形成的导电细丝为氧空位导电细丝[19]. 不是Ni金属细丝的原因在于在上电极Ni和中间层HfO_x存在一层很薄的氧化物薄膜, 该氧化物薄膜阻止了Ni金属离子的扩散, 从而没有形成Ni金属细丝.

肖特基发射可以描述为

$$J = A^* T^2 \exp \left\{ \frac{-q[\phi_B - \sqrt{qE/(4\pi\epsilon_i)}]}{KT} \right\},$$

其中, J 为肖特基发射电流密度, A^* 为有效理查德常数, T 为绝对温度, K 为玻尔兹曼常数, q 为单个电子的电荷量; $\epsilon_i = \epsilon_0 \epsilon_r$, ϵ_0 为真空绝对介电常数, ϵ_r 为相对介电常数; ϕ_B 为肖特基势垒的高度. 图6(a) 为不同氧分压条件下阻变存储单元高阻态的肖特基拟合图, 高阻态的 $\ln J$ 与 $E^{1/2}$ 满足很好的线性关系, 这说明 Ni/HfO_x/TiN 阻变存储单元高阻态的导电机理为肖特基发射[20].

为进一步探索高阻态的传导机理, 对 Ni/HfO_x/TiN 阻变存储单元的高阻态进行温度测试, 测试范围由308 K增加到358 K. 从图6(b)可见, 随着温度的升高, 存储单元的电流增加, 这是一种典型的热激发效应器件[21], 根据图6(b)的温度测试结果, 可以得出 $\ln(J/T^2)$ 与 $1/T$ 的关系. 从图6(c)中可以看出, $\ln(J/T^2)$ 与 $1/T$ 满足很好的

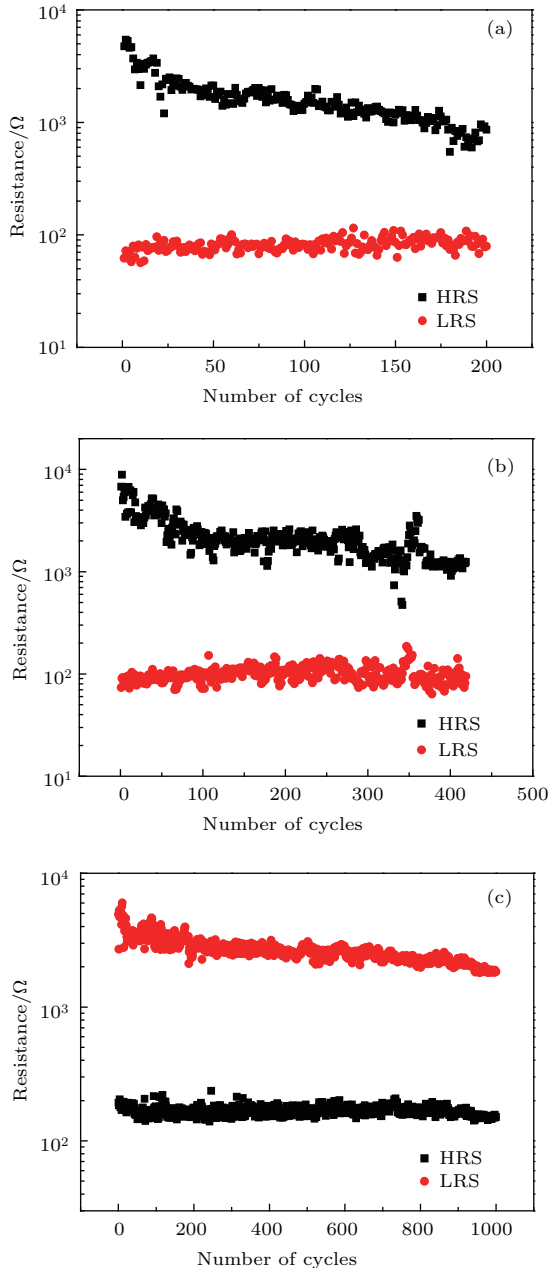


图4 不同氧分压条件下 Ni/HfO_x/TiN 阻变存储单元的循环耐受特性

Fig. 4. Endurance performance of Ni/HfO_x/TiN devices deposited under different oxygen partial pressure: (a) 2%; (b) 4%; (c) 6%.

线性关系, 这进一步证明 Ni/HfO_x/TiN 阻变单元在高阻态下满足肖特基发射机理. 根据图 6 (c) 中线性拟合的斜率, 可以计算出活化能 E_a (E_a 等于 $\phi_B - [qE/(4\pi\epsilon)]^{1/2}$) [22], 在低电压 60 mV 处, 所计算出的活化能为 67 meV, 这与文献 [23] 报道的数值相似. 根据图 6 (c) 中各个曲线拟合的斜率, 进而做出图 6 (d). 从图 6 (d) 中可以看出, 随着 $E^{1/2}$ 的增加, 活化能减小, 这符合肖特基型的热离子发射理

论 [19]. 根据线性拟合的斜率和截距, 可以计算出 Ni/HfO_x/TiN 阻变存储单元的肖特基势垒高度为 0.1 eV, 相对介电常数为 8.3, 所计算出来的相对介电常数比 HfO₂ 薄膜的相对介电常数 (18—25) 要小得多, 但是与文献 [24] 中使用射频磁控方法制备的 HfO_x 薄膜所测得的介电常数相近. 这是由于利用 Hf 靶制备氧化铪的过程中在薄膜中引入了大量的缺陷.

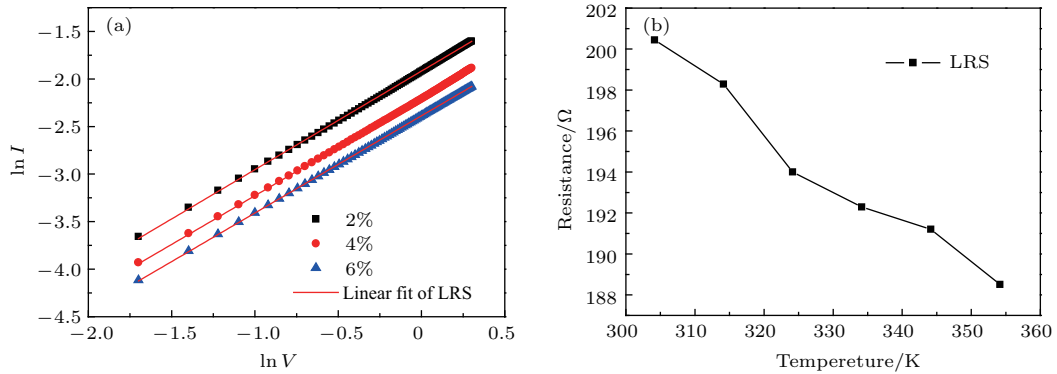


图 5 (a) Ni/HfO_x/TiN 阻变存储单元低阻态 I - V 曲线在双对数坐标下的线性拟合; (b) 低阻态电阻与温度的关系
Fig. 5. (a) Double logarithmic plot and linear fitting for Ni/HfO_x/TiN devices in the state of LRS; (b) resistance of LRS as a function of temperature.

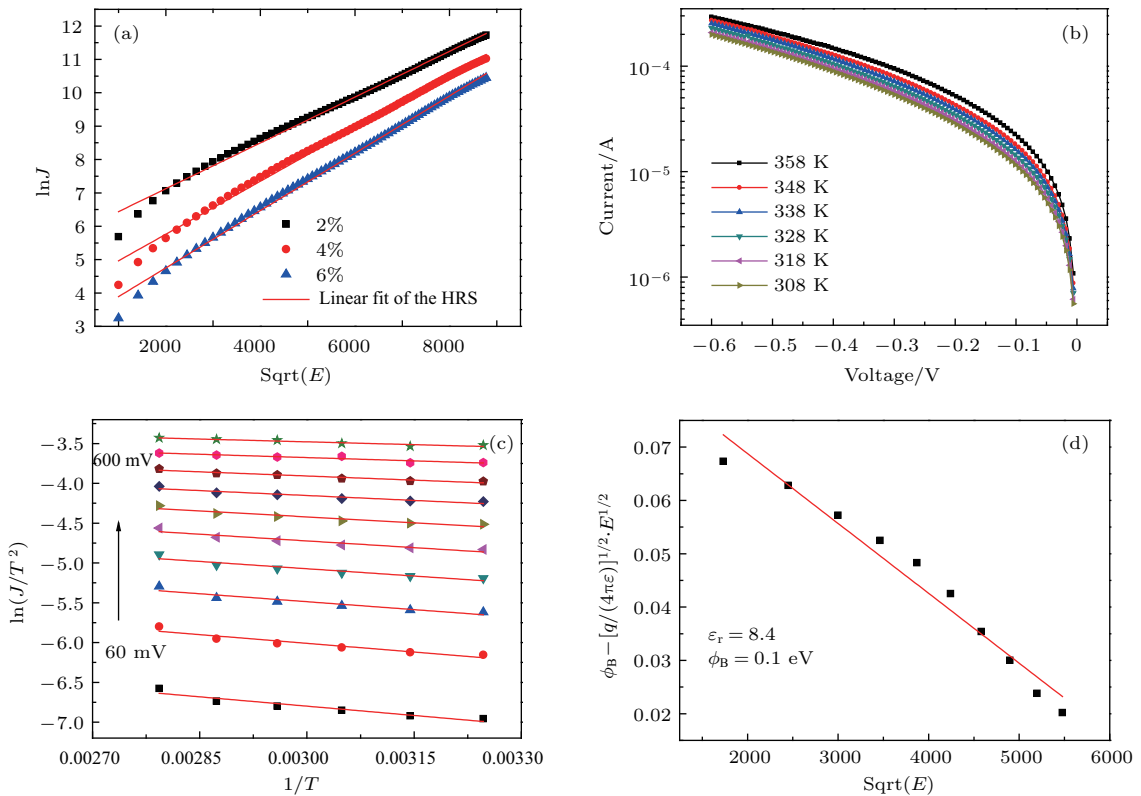
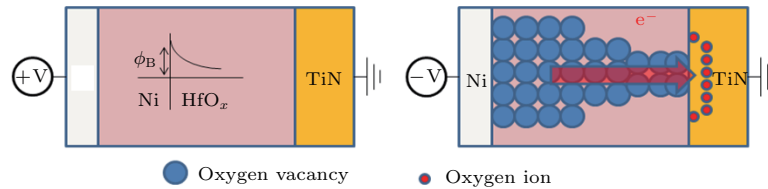


图 6 (a) Ni/HfO_x/TiN 阻变存储单元高阻态 I - V 曲线的肖特基拟合; (b) 高阻态电阻与温度的关系; (c) 高阻态 $\ln(J/T^2)$ 与 $1/T$ 关系曲线; (d) 活化能与电压的关系
Fig. 6. (a) Schottky emission fitting for Ni/HfO_x/TiN devices in the state of HRS; (b) resistance of HRS as a function of temperature; (c) $\ln(J/T^2)$ as a function of $1/T$; (d) activation energy as a function of voltage.

图7 Ni/HfO_x/TiN 阻变存储单元的电阻转变模型Fig. 7. Resistive switching model of Ni/HfO_x/TiN devices.

为进一步明晰Ni/HfO_x/TiN阻变存储单元的电阻转变机理,根据氧空位导电细丝理论,对高低阻态转变的机理进行了分析,如图7所示.金属Ni与HfO_x薄膜接触时产生的肖特基势垒控制着Ni/HfO_x/TiN阻变存储单元的电阻状态.经过电初始化后,一方面HfO_x薄膜中会产生大量氧空位;另一方面,TiN电极从HfO_x薄膜中夺取一部分氧原子,使得HfO_x薄膜产生一定的氧空位.当在Ni电极上加负向电压时,氧离子在电场的作用下向TiN电极方向移动,减少Ni/HfO_x界面处的氧离子,增加氧空位;随着氧空位的增加;在局部地方形成氧空位导电细丝,连接上电极Ni和底电极TiN后,Ni/HfO_x界面的势垒不复存在,器件转变为低阻态.当在Ni电极上加正向电压后,氧离子向Ni电极方向移动,氧离子在电场作用下与氧空位复合,在焦耳热作用下导电细丝熔断,器件恢复高阻态.

4 结 论

基于不同氧分压制备的氧化铪构建了Ni/HfO_x/TiN结构阻变存储单元,物理结构及电性能分析表明:氧化铪基体中氧含量的增加,一方面表面形貌粗糙度略有降低,另一方面器件单元功耗的降低,循环耐受特性可达10³次,且转变电压分布的一致性得到改善.基于I-V曲线线性拟合和温度测试结果探索了器件的转变机理,符合氧空位导电细丝理论,且低阻态导电机理是欧姆传导,高阻态导电机理是肖特基传导.

参考文献

- [1] Lelmini D 2016 *Semicond. Sci. Technol.* **31** 063002
- [2] Chang T C, Chang K C, Tsai T M, Chu T J, Sze S M 2016 *Mater. Today* **19** 254
- [3] Han S T, Zhou Y, Roy V A 2013 *Adv. Mater.* **25** 5425
- [4] Huang Y, Shen Z H, Wu Y, Wang X Q, Zhang S F, Shi X Q, Zeng H B 2016 *RSC Adv.* **6** 17867
- [5] Chen R, Zou L W, Wang J Y, Chen C J, Shao X L, Jiang H, Zhang K L, Lü L R, Zhao J S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 067202 (in Chinese) [陈然, 周立伟, 王建云, 陈长军, 绍兴隆, 蒋浩, 张楷亮, 吕联荣, 赵金石 2014 物理学报 **63** 067202]
- [6] Shang J, Xue W H, Ji Z H, Liu G, Niu X H, Yi X H, Pan L, Zhan Q F, Xu X H, Li R W 2017 *Nanoscale* **9** 7037
- [7] Park K, Lee J S 2016 *Sci. Rep.* **6** 23069
- [8] Chen Y Y, Pourtois G, Adelmann C, Goux L, Govoreanu B, Degreave R, Jurczak M, Kittl J A, Groeseneken G, Wouters D J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 113513
- [9] Kim W, Menzel S, Wouters D J, Guo Y Z, Robertson J, Roesgen B, Waser R, Rana V 2016 *Nanoscale* **8** 17774
- [10] Jiang R, Du X H, Han Z Y, Sun D W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 207302 (in Chinese) [蒋然, 杜翔浩, 韩祖银, 孙登维 2015 物理学报 **64** 207302]
- [11] Yan Z B, Liu J M 2013 *Sci. Rep.* **3** 2482
- [12] Hao A, Ismail M, He S, Qin N, Huang W H, Wu J, Bao D H 2018 *J. Alloys Compd.* **732** 573
- [13] Ito D, Hamada Y, Otsuka S, Shimizu T, Shingubara S 2015 *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** 06FH11
- [14] Pang H, Deng N 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 147301 (in Chinese) [庞华, 邓宁 2014 物理学报 **63** 147301]
- [15] Jiang R, Xie E Q, Wang Z F 2016 *Appl. Phys. Lett.* **89** 142907
- [16] Bousoulas P, Michelakaki I, Tsoukalas D 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 034516
- [17] Jabeen S, Ismail M, Rana M A, Ahmed E 2017 *Mater. Res. Express* **4** 056401
- [18] Wang X J, Hu C, Song Y L, Zhao X F, Zhang L L, Lü Z, Wang Y, Liu Z G, Wang Y, Zhang Y, Sui Y, Song B 2016 *Sci. Rep.* **6** 30335
- [19] Fang Z, Yu H Y, Liu W J, Wang Z R, Tran X A, Gao B, Kang J F 2010 *IEEE Electron Device Lett.* **31** 476
- [20] Alamgir Z, Beckmann K, Holt J, Cady N C 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 063111
- [21] Mahapatra R, Maji S, Horsfall A B, Wright N G 2015 *Microelectron. Eng.* **138** 118
- [22] Shao X L, Zhou L W, Yoon K J, Jiang H, Zhao J S, Zhang K L, Yoo S, Hwang C S 2015 *Nanoscale* **7** 11063
- [23] Puglisi F M, Qafa A, Pavan P 2015 *IEEE Electron Device Lett.* **36** 244
- [24] Kondaiah P, Shaik H, Rao G M 2015 *Electron. Mater. Lett.* **11** 592

Influences of different oxygen partial pressures on switching properties of Ni/HfO_x/TiN resistive switching devices*

Zhang Zhi-Chao Wang Fang[†] Wu Shi-Jian Li Yi Mi Wei
Zhao Jin-Shi Zhang Kai-Liang[‡]

(Tianjin Key Laboratory of Film Electronic & Communication Devices, School of Electrical and Electronic Engineering,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

(Received 10 October 2017; revised manuscript received 5 December 2017)

Abstract

The HfO_x-based resistive random access memory (RRAM) has been extensively investigated as one of the emerging nonvolatile memory (NVM) candidates due to its excellent memory performance and compatibility with CMOS process. In this study, the influences of deposition ambient, especially the oxygen partial pressure during thin film sputtering, on the resistive switching characteristics are discussed in detail for possible nonvolatile memory applications. The Ni/HfO_x/TiN RRAMs are fabricated, and the HfO_x films with different oxygen content are deposited by a radio frequency magnetron sputtering at room temperature under different oxygen partial pressures. The oxygen partial pressures in the sputter deposition process are 2%, 4% and 6% relative to engineer oxygen content in the HfO_x film. Current-voltage (*I-V*) measurements, X-ray photoelectron spectroscopy, and atomic force microscopy are performed to explain the possible nature of the stable resistive switching phenomenon. Through the current-voltage measurement, typical resistive switching behavior is observed in Ni/HfO_x/TiN device cells. It is found that with the increase of the oxygen partial pressure during the preparation of HfO_x films, the stoichiometric ratio of O in the film is improved, the root mean square (RMS) of the surface roughness of the film slightly decreases due to the slower deposition rate under a higher oxygen partial pressure, and the high resistance state (HRS) current decreases. In addition, by controlling the oxygen content of the device, the endurance performance of the device is improved, which reaches up to 10³ under a 6% oxygen partial pressure. The HfO_x films prepared at a higher oxygen partial pressure supply enough oxygen ions to preserve the switching effect. As the oxygen partial pressure increases, the uniformity of the switching voltage is improved, which can be attributed to the fact that better oxidation prevents the point defects (oxygen vacancies) from aggregating into extended defects. Through the linear fitting and temperature test, it is found that the conduction mechanism of Ni/HfO_x/TiN RRAM device cells in low resistance state is an ohmic conduction mechanism, while in high resistance state it is a Schottky emission mechanism. The interface between TE and the oxide layer (HfO_x) is expected to influence the resistive switching phenomenon. The activation energy of the device is investigated based on the Arrhenius plots in HRS. A switching model is proposed according to the theory of oxygen vacancy conductive filament. Furthermore, the self-compliance behavior is found and explained.

Keywords: resistive random access memory, HfO_x thin film, oxygen partial pressure, resistive switching mechanism

PACS: 73.40.Qv, 72.80.Ga, 71.30.+h

DOI: 10.7498/aps.67.20172194

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFB0405600) and the Tianjin Natural Science Foundation, China (Grant Nos. 17JCYBJC16100, 17JCZDJC31700).

[†] Corresponding author. E-mail: fwang75@163.com

[‡] Corresponding author. E-mail: kailiang_zhang@163.com