

引用格式:赵巍颂,田敏,钟汇才. 基于 ALD Al_2O_3 新型反熔丝器件的可靠性研究[J]. 微电子学与计算机,2019,36(1):41-45.
[ZHAO W S, TIAN M, ZHONG H C. Studyon Reliability of A New Anti-Fuse Device Based on ALD Al_2O_3 [J]. Microelec-
tronics & Computer,2019,36(1):41-45.]

基于 ALD Al_2O_3 新型反熔丝器件的可靠性研究

赵巍颂^{1,2}, 田 敏^{1,2}, 钟汇才¹

(1 中国科学院 微电子研究所,北京 100029; 2 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 金属-绝缘体-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)反熔丝器件常被用于现场可编程逻辑阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的互联结构单元. 本文使用高介电常数材料 Al_2O_3 作为介质层,使用原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)技术,制备了高可靠性,高性能的 MIM 反熔丝单元. 该反熔丝单元关态电阻超过 $1\text{T}\Omega$,同时开态电阻非常低,满足正态分布,集中在 $22\ \Omega$ 左右,波动幅度很小,标准差仅为 $3.7\ \Omega$,因此 Al_2O_3 反熔丝器件具有很高的开关比. 本文研究了该器件编程前后两种状态的特性及时变击穿特性(Time Dependent Dielectric Breakdown, TDDb). 研究表明,在 2 V 工作电压下,未编程的反熔丝单元的预测寿命为 1591 年,同时,当读电流在 $0\sim 20\text{ mA}$ 时,编程后的反熔丝保持稳定. 这说明该反熔丝单元在低阻态和高阻态都具有非常高的可靠性.

关键词: 金属-绝缘体-金属反熔丝;原子层沉积;开关比;时变击穿特性

中图分类号: TN389

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2019)01—0041—05

Study on Reliability of A New Anti-fuse Device Based on ALD Al_2O_3

ZHAO Wei-song^{1,2}, TIAN Min^{1,2}, ZHONG Hui-cai¹

(1 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Metal-Insulator-Metal (MIM) antifuse has always been used in Field Programmable Gate Array (FPGA) interconnection structure unit. A High-performance and High-reliability Metal-Insulator-Metal antifuse was fabricated with high $\kappa\text{Al}_2\text{O}_3$ deposited by Atomic Layer Deposition (ALD) as the dielectric. The anti-fuse unit's off-state resistance exceeds $1\text{T}\Omega$, and the on-state resistance is very low, which satisfies the normal distribution, the on-resistance value is concentrated around 22Ω , and the standard deviation is only 3.7Ω , so it has high on/off ratio. In this paper, the Time Dependent Dielectric Breakdown (TDDb) of the structure is studied. The results show that the predicted lifetime of the unprogrammed anti-fuse cell is 1591 years at 2V operating voltage. At the same time, when the read current is $0\sim 20\text{mA}$, the programmed anti-fuse remains stable. This shows that the antifuse has a very high reliability in both low-impedance and high-impedance states.

Key words: metal-insulator-metal anti-fuse; atomic layer deposition; on/off ratio; time dependent dielectric breakdown

1 引言

FPGA 现已被广泛应用于通信、控制、航天等各个领域. 其中,反熔丝型 FPGA^[1-2] 因反熔丝器件特有的抗辐照和器件高可靠性的特点被广泛应用于航空航天领域. 反熔丝型 FPGA 的核心部件为反熔丝

单元. 依照电极和介质材料的不同,常见的反熔丝单元有氧化物-氮化物-氧化物(ONO)反熔丝单元、栅氧化层反熔丝单元和 MIM 型反熔丝单元. 其中 MIM 反熔丝单元因有着面积小、编程后电阻低、速度快的特点而被广泛应用于高速高密度可编程器件之中.

MIM 反熔丝单元主要由上下电极和中介介质层三层构成。在未编程时,两电极因中介介质层的存在而使得编程前电阻极大。编程时,介质层在一定的电场条件下发生化学键的断裂形成缺陷,积累足够的缺陷后能在介质层中形成一条导电通道。由此,反熔丝单元可从编程前的高阻转化成低阻状态。由于所有的反熔丝单元均连接在工作电压之下,因此反熔丝单元在工作电压下的可靠性至关重要,同时开态电阻也是反熔丝器件的关键参数,因为开态电阻决定了器件编程后的速度。

目前国内外 MIM 反熔丝单元多采用氧化物、氮化硅、多晶硅等作为中介介质层^[3-5]。随着工艺尺寸的逐渐减小,介质层的厚度也不断减小,这使得反熔丝单元的 TDDB 时间逐渐变短并对反熔丝的可靠性提出了更高的要求。基于此,本文使用了高介电常数材料 Al_2O_3 作为中介介质,采用 ALD 工艺生长了一层致密的 Al_2O_3 薄膜作为 MIM 反熔丝结构的中介介质层,同时为了减小电极与介质材料之间的应力并防止不同材料之间原子的扩散,我们使用了 Ti 和 TiN 作为 MIM 三明治结构中的阻挡层和过渡层。由此我们可以得到一个致密、均匀、无针孔缺陷以及上下电极接触良好的反熔丝单元。我们对 Al_2O_3 介质层厚度对反熔丝特性的影响以及反熔丝击穿后的电学特性都做了深入的研究^[6-7],本文中我们将继续探讨 Al_2O_3 反熔丝单元的击穿特性以及编程前后两种状态的可靠性。经测试及分析表明, Al_2O_3 反熔丝单元具有较低的击穿电压,且在工作电压下具有足够长的寿命和较好的一致性。

2 器件结构

本文提出的 MIM 反熔丝结构是一种三明治结构,以高介电常数材料 Al_2O_3 为介质层,上下电极材料分别为钛(Ti)和钨(W),同时为减小电极与介质层之间的应力,防止介质层与电极之间的扩散,我们在上电极与介质层之间增加了一层氮化钛(TiN)作为过渡层与阻挡层。介质层的厚度为 7 nm,下电极为 400 nm 厚的钨金属层,上电极为 10 nm 厚的钛金属层。 Al_2O_3 薄层通过原子层沉积工艺制备,原子层沉积工艺是一种先进的薄膜制备技术,能够很好地控制薄膜的厚度^[6],下电极钨金属层是通过化学气相淀积(Chemical Vapor Deposition, CVD)制备,上电极钛金属层通过物理气相淀积(Physical Vapor Deposition, PVD)制备。反熔丝的金属互联层材料为 AlCu,通过 PVD 制备,整个反熔丝结构示意图如

图 1 所示。单个反熔丝单元的面积为 $0.5 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ 。在标准互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺的基础上,主要制备过程如下:在硅基衬底上使用 PVD 工艺生长一层 AlCu,平整后采用 CVD 生长厚度 $4000 \text{ \AA}$ 的钨金属层,然后采用 ALD 工艺生长一层厚度为 $70 \text{ \AA}$ 的 Al_2O_3 ,随后通过 PVD 技术生长一层厚度为 $200 \text{ \AA}$ 的钛金属层作为上电极,再使用 PVD 生长一层氮化钛(TiN)作为介质层与电极之间的过渡层和阻挡层,最后用 PVD 生长一层 AlCu 作为上电极的金属互联层^[8]。



图 1 Al_2O_3 反熔丝结构图

3 器件性能

本文利用安捷伦 4156C 半导体参数分析仪来测试该反熔丝单元的特性,测试时,电源正极连接到上电极,下电极接地。典型未编程 Al_2O_3 反熔丝器件的 I-V 特性曲线如图 2 中嵌入的坐标图所示,在工作电压 2 V 下,漏电流小于 1 pA,表明反熔丝的关态电阻大于 1 TΩ。在低电压区域,反熔丝导电机理为直接隧穿电流主导。而在高电压区域,如图 2 所示,可以用 Poole-Frenkel 机制拟合曲线, Poole-Frenkel 发射机制的机理为:电子被介质层中的缺陷捕获,然后热激发脱离陷阱流向金属,其电流电压表达式为公式(1)。

$$J_{\text{PF}} = C \exp \left[-e \left(\varphi_{\text{BPF}} - \sqrt{\frac{eE}{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}} \right) / kT \right] \quad (1)$$

式中, E 为介质中的电场; e 为电子电荷; φ_{BPF} 为陷阱势垒; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为 Al_2O_3 介电常数; k 为玻尔兹曼常数; T 为温度。将反熔丝电流电压曲线由 $\ln(J_{\text{PF}}/E)$ 与 $\sqrt{E}$ 进行拟合得到一条直线,如图红线所示,说明该反熔丝结构关态下在高电压下的导电机理为 Poole-Frenkel 发射机制。

图 3 展示了击穿电压(Breakdown Voltage, V_{BD})和开态电阻的分布,样本为 116 个 Al_2O_3 反熔丝器件。击穿电压基本上服从均值为 5.85 V,标准差为 0.13 V 的正态分布,其标准差很小,表明该器

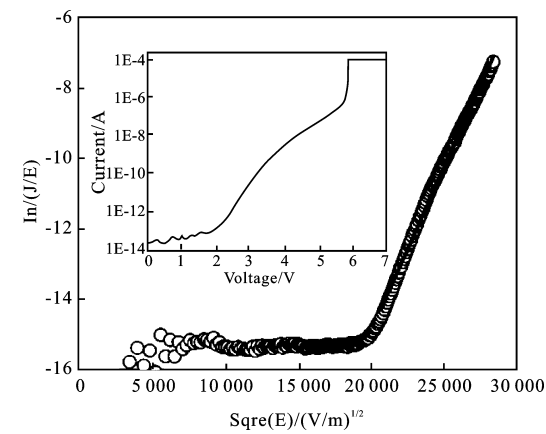
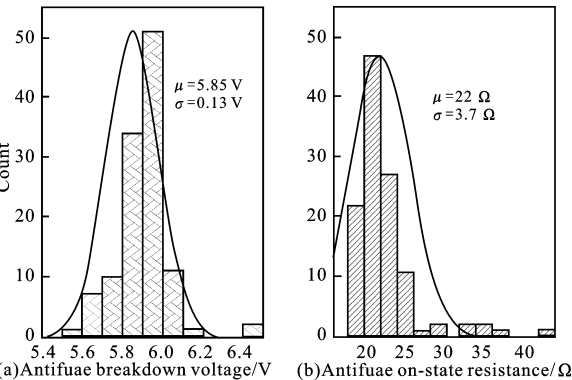


图 2 反熔丝的 I-V 特性曲线

件均一性好,击穿电压波动幅度不大. 开态电阻服从均值为 22 Ω,标准差为 3.7 Ω 的正态分布. 表明该批次的器件,由于采用了原子层沉积工艺,具有很高的合格率,同时各个器件的击穿位置是统一的. 相对于关态电阻大于 1 TΩ,编程后电阻非常低,只有 22 Ω 左右,所以开关比约为 10¹¹,这是一个很好地特性.



μ 表示均值, σ 表示标准差

图 3 在 116 个器件中击穿电压和开态电阻的分布

4 器件可靠性

反熔丝器件的可靠性要求器件在关态工作电压下具有足够长的寿命和器件在开态条件下开态电阻稳定.

为了得到该反熔丝单元的时变击穿特性(TD-DB),对器件施加恒定电压(Constant Voltage Stress, CVS),测量器件电流达到 1 mA 时的时间. 图 4 展示了器件在不同 CVS 下漏电流随着施加电压时间的变化情况,当电压作用时间超过某个阈值后,器件的漏电流会迅速增加,这是硬击穿的典型表现. 由图 4 可知,由于电荷捕获效应^[9]的作用,漏电

流刚开始会随着电压作用时间增加而减小,电荷捕获效应可以让器件在关态有更长的寿命.

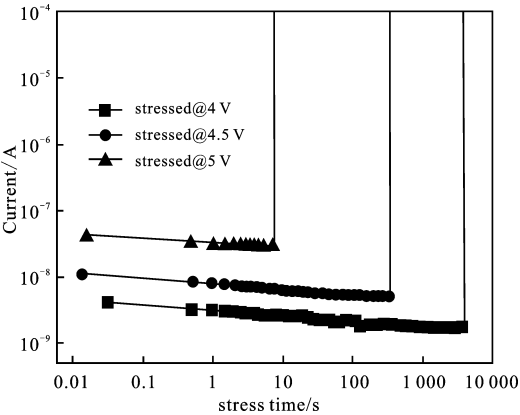


图 4 器件在不同 CVS 下的击穿特性

每个器件在一个电压下有一个寿命,同一个电压下不同器件的寿命不一样,该寿命符合 Weibull 分布,通常选取 Weibull 分布中的特征值作为固定电压下的寿命值,Weibull 分布为公式(2),其中 F 表示累计失效概率, β 为 Weibull 斜率,表示同一电压下击穿时间的分布的离散度, t_{63} 表示同一电压下 63.2% 的器件被击穿时的时间,代表该电压下的特征击穿时间.

$$W(F) = \ln[-\ln(1 - F)] = \beta \ln\left(\frac{t}{t_{63}}\right) \quad (2)$$

本文反熔丝器件的寿命分布如图 5 所示,对于电压从 3.5V 到 5.5V,分别给出了相应的 weibull 斜率 β 和特征 T_{BD} ,以 t_{63} 的值为相应电压下器件的寿命.

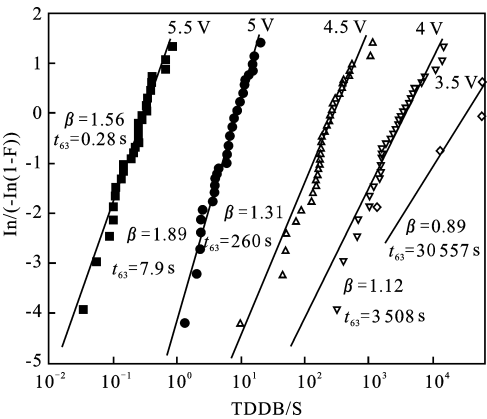


图 5 在不同的电压条件下,器件的 TDDB 分布

由于反熔丝未编程前的导电机制为 Poole-Frenkel 发射,所以预测寿命模型为 $\sqrt{E}$ 模型^[10],也就是击穿时间的 log 函数与介质中电场的二次开方呈现线性关系,如图 6 展示了在不同电压下,器件发

生击穿的时间,可以看出击穿时间 T_{BD} 的对数与施加电压大小的二次开方成正比,在 2 V 工作电压下,器件的预测寿命为 1591 年,这么高的关态可靠性是因为介质层为高介电常数的材料 Al_2O_3 。

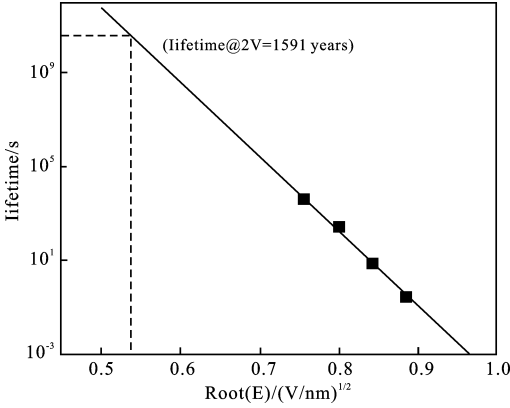


图 6 器件寿命随电压的变化

器件编程过后,电路的可靠性要求开态电阻在长时间的读操作时保持不变,图 7 展示了几个反熔丝器件的开态电阻随着电流的特性曲线,从图中可知,随着电流增加到 20 mA,器件的电阻基本保持不变。而器件的工作电流一般远远小于 20 mA,所以器件可以在开态保持很好的可靠性。

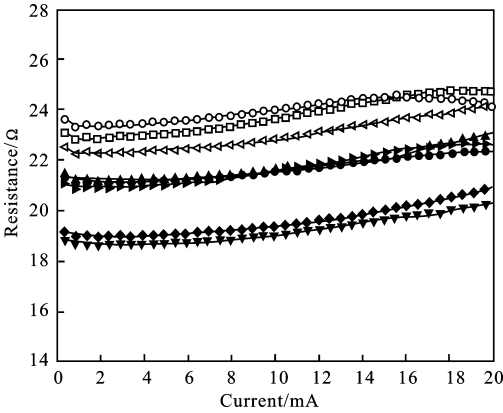


图 7 器件开态电阻与工作电流的关系

图 8 展示了已编程器件的电迁移测试结果,表明该器件在 20 mA 电流下经过 50 ks,而开态电阻没有很大的变化,该结果也表明器件在编程状态下具有很高的可靠性。

5 结束语

本文利用高介电常数材料 Al_2O_3 作为介质层,利用原子层沉积工艺,流片制备了一种高性能,高可靠性的 MIM 反熔丝单元。实验结果表明,该反熔丝单元具有很高的开关比,达到了 10^{11} ,同时在 2 V 工

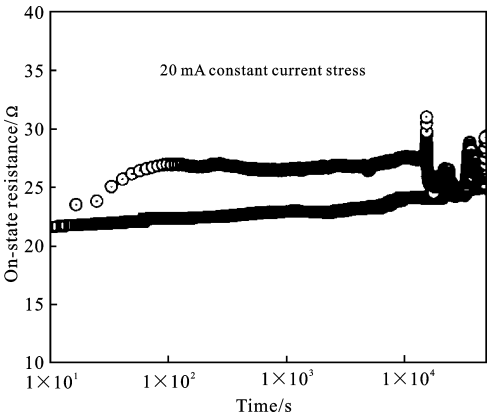


图 8 器件在 20 mA 电流下的电迁移测试

作电压下,器件关态寿命高达 1591 年,在电流为 0 ~20 mA 条件下,器件的开态电阻保持稳定。结果表明,该 MIM 反熔丝单元能够很好的应用到 FP-GA。

参考文献:

[1] Hu C. Interconnect devices for field programmable gate array[C]// Electron Devices Meeting, 1992. IEDM '92. Technical Digest. International. UK, Glasgow, IEEE, 1993;591-594.

[2] Hamdy E, Mccollum J, Chen S O, et al. Dielectric based antifuse for logic and memory ICs[C]// Electron Devices Meeting, 1988. IEDM '88. Technical Digest. International. San Francisco, IEEE, 1988; 786-789.

[3] Zhang G, Hu E, Yu P, et al. Metal-to-metal antifuses with very thin silicon dioxide films[J]. IEEE Electron Device Letters, 1994, 15(8):310-312.

[4] Tamura Y, Shinriki H. ON-state programming and off-state reliability of metal-to-metal antifuse based 10 nm-thick SiNx film for 3.3 V operation[C]// Reliability Physics Symposium, 1995. Shanghai, China, IEEE International, IEEE, 1995;36-41.

[5] Wong R J, Gordon K E. Reliability mechanism of the unprogrammed amorphous silicon antifuse[C]// Reliability Physics Symposium, 1994. IEEE International. San Jose, California, IEEE Xplore, 1994; 378-382.

[6] Tian M, Zhong H, Li L, et al. A new high- κ Al_2O_3 -based metal-insulator-metal antifuse[J]. Solid-State Electronics, 2018,7(12); id. 125327.

[7] Tian M, Xu J, Zhong H, et al. Role of Ti electrode on the electrical characterization of filament within l_2O_3 based antifuse[J]. ECS Journal of Solid State

Science and Technology, 2018, 7(4):N37-N41.

[8] Gonzalez M B, Rafi J M, Beldarrain O, et al. Charge trapping analysis of l₂O₃ films deposited by atomic layer deposition using H₂O or O₃ as oxidant [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B Nanotechnology & Microelectronics Materials Processing Measurement & Phenomena, 2012, 31(1):01A101.

[9] Ding S J, Hu H, Zhu C, et al. RF DC and reliability characteristics of ALD HfO/sub 2/-Al/sub 2/O/sub 3/ laminate MIM capacitors for Si RF IC applications [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2004, 51(6):886-894.

[10] Rimmell T, Ramprasad R, Roberts D, et al. Reliabil-

ity of silicon nitride dielectric-based metal-insulator-metal capacitors[C]// Reliability Physics Symposium Proceedings. 2004 IEEE International. Beijing, China, IEEE, 2004:573-574.

作者简介:
赵巍颂 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为集成电路先导工艺. E-mail:zhaows009@gmail. com.
田 敏 女,(1991-),博士研究生. 研究方向为集成电路先导工艺.
钟汇才 男,(1973-),博士,研究员. 研究方向为集成电路测试.

(上接第 40 页)

5 结束语

本文提出了一种解决训练样本类别失衡的损失函数及参数更新算法,相比于交叉熵损失函数,其通过自适应的方式调节容易识别样本与困难识别样本的权重,减少样本类别失衡带来的问题,并在 VOC2007 数据集上的精度达 78. 3%,超过 YOLOv2 等方法. 同时提出了一种新颖的图像合成方法,主要由随机边缘信息融合算法和多尺度鉴别器网络构成,使合成图片的边缘信息更加逼真,其在 Cityscapes 数据集上的像素精度相比基线方法 pix2pix 提升了 7%,并且实验证明合成图片可以完成训练任务,极大地减轻图像采集负担. 本文提出的损失函数以及图像合成的优化,不仅适用于智能机房监控系统,同样适用于其他目标检测任务,有较广泛的应用价值.

参考文献:

[1] Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]//The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, Nevada, USA; IEEE, 2016:779-788.

[2] Joseph Redmon, Ali Farhadi. YOLO9000: Better, faster, stronger[C]//The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu, Hawaii, USA; IEEE, 2017:6517-6525.

[3] Ren S, He K, Girshick R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.

[4] Liu W, Anguelov D, Erhan D, et al. SSD: Single shot multibox detector[C]//European Conference on Computer Vision. Amsterdam, The Netherlands; Springer, Cham, 2016:21-37.

[5] Isola P, Zhu J Y, Zhou T, et al. Image-to-image translation with conditional adversarial networks[C]//The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu, Hawaii, USA; IEEE, 2017:5967-5976.

作者简介:
朱曦阳 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为数字集成系统设计. E-mail:zhuxy15@mails. tsinghua. edu. cn.
张 春 男,(1972-),博士,副研究员. 研究方向为数字集成系统设计.
张德兵 男,(1988-),硕士. 研究方向为数字集成系统设计.