

射频溅射制备的 BST 薄膜介电击穿研究^{*}

卢 肖 吴传贵 张万里 李言荣

(电子科技大学微电子与固体电子学院 成都 610054)

(2005 年 9 月 7 日收到 2005 年 11 月 10 日收到修改稿)

采用射频溅射制备 BST 薄膜,研究了薄膜的介电击穿特性.实验表明,在电压增大到传统击穿电压(电流密度出现瞬时增大时的电压)之前,薄膜性能已被破坏,发现在传统击穿状态之前存在另一个新状态——初始击穿状态.通过测试各状态的 J - V (电流密度-电压)、 J - T (电流密度-温度)特性分析其导电机理,建立了薄膜结构、漏电性能随电场强度增大而变化的模型.最后提出了确定实际意义上击穿电压的方法.

关键词:BST 薄膜,介电击穿,漏电流

PACC:7340R,7360H

1. 引 言

由于 BST 薄膜具有高介电系数、低漏电流密度、居里温度可调以及优异的热释电性能等,被广泛运用于电子信息领域,例如,动态随机存储器、高介电常数电容器、介质移项器、非制冷红外探测器等.而 BST 薄膜的击穿直接关系到器件的可靠性和工作范围,所以击穿机理、击穿电压、击穿过程等历来都是研究的热点.传统击穿电压的测试是通过外加逐渐增大的直流电压方法,当出现电流瞬时增大时所对应的电压值即击穿电压^[1,2].但对于在电流发生瞬时增大以前,薄膜性能是否已经被破坏,这方面的研究还未见报道.

本文对射频溅射制备的 BST 薄膜击穿电压进行测试,发现电流出现瞬时增大之前,薄膜性能已经被破坏,在传统击穿状态之前存在另一个状态,我们把它定义为初始击穿状态.并且通过各状态 J - V (电流密度-电压)、 J - T (电流密度-温度)特性分析,阐述了电场逐渐增大时,薄膜的结构、漏电性能变化过程.

2. 实 验

采用射频溅射,在 Pt/Ti/SiO₂/Si 基片上制备 Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃ (BST) 薄膜,其工艺参数为溅射温度 400℃,溅射气压 1Pa,氧氩比 1:4,溅射功率为 100W.在 0.5×10^5 Pa 纯氧下对 BST 薄膜原位退火,退火温度为 700℃,退火时间为 1h.采用直流磁控溅射制备 BST 薄膜的上电极镍铬合金 Ni/Cr (80/20),用掩膜法制备成直径为 0.4mm 的圆形电极.用台阶仪测试薄膜厚度约为 200nm.利用 Aglient4155B 测试其漏电性能和击穿电压,薄膜底电极 Pt 接地,上电极 Ni/Cr 接直流电压.在 J - V 特性测试时,电压增大的步长为 0.1V,延迟时间为 2s.

3. 结果和讨论

3.1. BST 薄膜的传统击穿状态

图 1 为 BST 薄膜的 J - V 特性曲线,对 J , V 分别取对数,设 $m = \frac{\log J}{\log V}$,即 $J \propto V^m$,当 $V < 1.8$ V 时 $m = 0.9 \approx 1$,即 $J \propto V$ 满足欧姆导电规律,当 $V > 1.8$ V 时 $m = 8.4$,可以用成指数分布陷阱下的空间电荷限制

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号 513102)和国防预研基金(批准号 51412020505DZ0202)资助的课题.

电流解释其导电机理^[3].当直流偏压增大到 18V 时, 电流密度瞬时增大, 达到 10^2 A/cm^2 数量级如图 1 的插图所示, 此时出现传统意义上的介电击穿. 为了进一步研究传统击穿, 我们测试了击穿后薄膜的 J - V , J - T 特性.

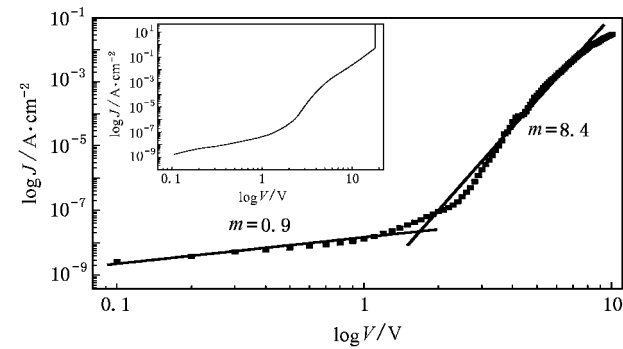


图 1 BST 薄膜 J - V 特性曲线(插图为其传统介电击穿曲线)

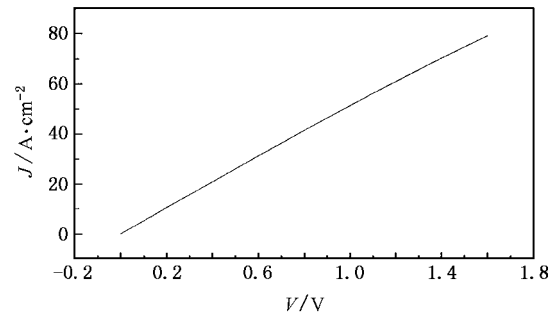


图 2 BST 薄膜传统击穿后的 J - V 特性

图 2 为薄膜被击穿后的 J - V 曲线, 击穿以后薄膜电流密度很大, 并且表现出线性的 J - V 特性, 满足欧姆导电机理, 即

$$J = qnuV/L, \quad (1)$$

其中 q 为电子电荷, n 为载流子浓度, u 为载流子迁移率, L 为薄膜厚度.

由于薄膜被击穿后, 内部已经形成了连续的导电通道, 此时, 薄膜载流子浓度随温度的变化并不明显, 而迁移率温度的关系则服从下列关系^[4]:

$$\mu \propto T^{-n}, \quad (2)$$

其中 n 为常数, 通常值为 $(0 < n < 2.5)$.

结合(1)式和(2)式得到 $J \propto T^{-n}$, 与实验结果符合, 如图 3 所示. 通过计算, n 值为 0.37.

综上所述, 薄膜在传统击穿后, 表现出欧姆导电规律, 电阻非常小, 约 16Ω ; 其电流密度随温度的增加而减小, 并成负指数关系.

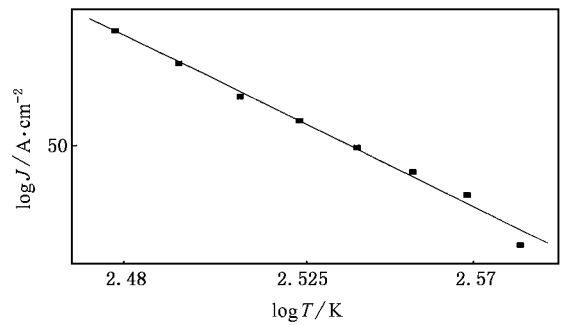


图 3 BST 薄膜传统击穿后的 J - T 特性曲线

3.2. BST 薄膜初始击穿状态

根据上述分析, 当电压达到 18V 时, 电流密度瞬时增大, 薄膜发生传统介电击穿, 表现出线性的 J - V 特性. 但是实验研究发现, 在出现电流密度瞬时增大以前, 薄膜的电性能已经被破坏, 如图 4 所示.

具体实验步骤依次为: 曲线 a 为 0—10.5V 的 J - V 特性测试, b 为 0—11V 的 J - V 特性测试, c 为 0—11.5V 的 J - V 特性测试, d 为 0—12V 的 J - V 特性测试, e 为 0—12.5V 的 J - V 特性测试, f 为 0—13V 的 J - V 特性测试, g 为 0—10V 的 J - V 特性测试.

其对应的曲线也分别为 a, b, c, d, e, f, g .

从图 4 可以得到:

1) 当电压上限从 10.5V 增大到 12.5V 时, 即 a, b, c, d, e 五步实验中, 曲线能够重合, 证明在外加电压小于或等于 12.5V 时不会对薄膜造成损坏.

2) 当电压增大到 13V 时, 虽然曲线 f 中并没有发现电流密度瞬时增大, 也就是说按传统介电击穿定义来讲, 薄膜并没有发生击穿, 但是从接下来的第 g 步实验可以看到薄膜 J - V 特性发生变化, 并且介电性能已经消失, 即说明电压达到 13V 时, 薄膜已经被损坏.

3) 虽然薄膜被损坏, 但是如图 4 中曲线 g 所示, 此时电流密度和传统击穿状态还相差 4—5 个数量级, 因而是和传统介电击穿状态完全不同的另一个状态, 为了方便起见, 我们把其定义为初始击穿状态.

4) 初始击穿发生的电压低于传统介电击穿, 当电压增大到传统介电击穿电压 18V 时, 仍然可以观察到由初始击穿状态而发生的传统击穿如图 4 的插图所示.

下面将通过 J - E 特性和 J - T 特性分析初始击穿状态的导电机理. 图 5 为薄膜初始击穿状态的 J - E

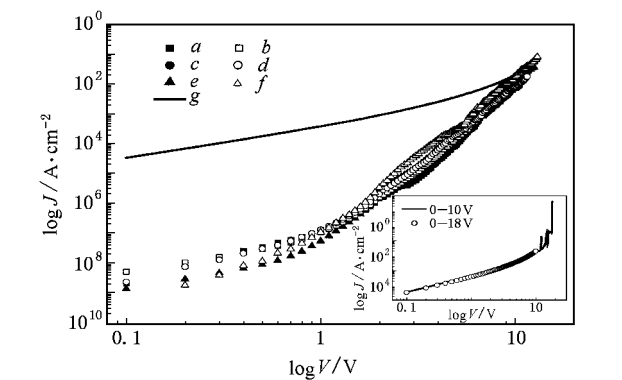


图4 BST薄膜初始击穿过程图(插图为当电压达到传统击穿电压时,由初始击穿状态发生的传统击穿)

特性图.从图中可以看出,在该状态下,电流密度和电压关系为 $\ln J \propto E^{1/2}$,满足肖特基发射导电机理^[5]:

$$J = A^* T^2 \exp(-q\Phi_b/kT) \exp(q\alpha E^{1/2}/kT), \quad (3)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{q}{4\pi\epsilon_i\epsilon_0}}, \quad (4)$$

其中 A^* 为比例常数; T 为绝对温度; Φ_b 为肖特基势垒; E_{int} 为界面间电场; k 为玻尔兹曼常数.为了进一步验证其导电机理,我们测试了其 J - T (电流密度-温度)特性如图6所示,也十分完整的符合肖特基发射规律 $\ln\left(\frac{J}{T^2}\right) \propto \frac{1}{T}$.通过 J - $E^{1/2}$ 特性曲线斜率可以得到 α 值为 2×10^{-5} ,根据 α 值可以计算出 ϵ_i 值为3.6,而BST的 ϵ_i 值决定于其光学折射率,在波长为640nm时应为4.0^[6],和本实验的计算值相近.综合上述分析结果可知,初始击穿状态的导电机理为肖特基发射机理.

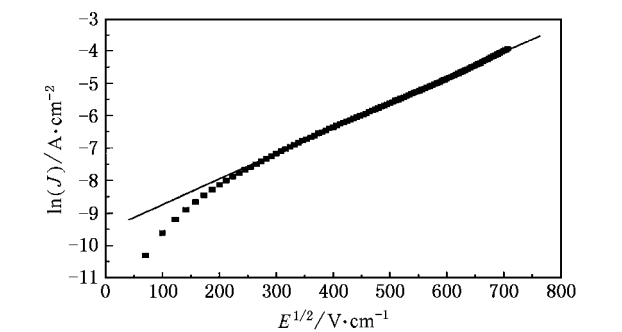


图5 BST薄膜初始击穿后的J-E特性曲线

值得提出的是,很多作者^[7,8]都阐述了修改后的肖特基发射规律更适合表述Pb/BST结构的肖特基发射电流

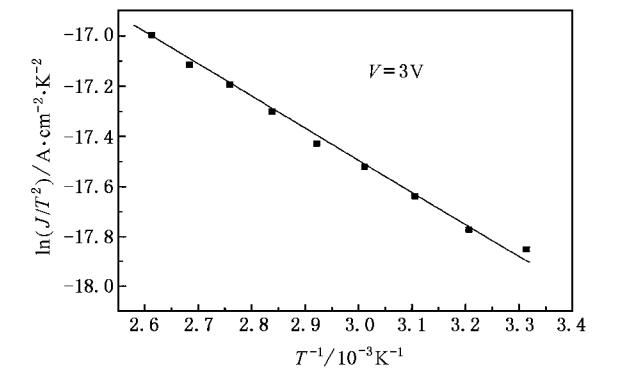


图6 BST薄膜初始击穿后的J-T特性曲线

$$J = \beta T^{3/2} E \mu \exp(-\Phi_b/kT) \times \exp(q\alpha E^{1/2}/kT), \quad (5)$$

其中 β 为常数, μ 为载流子迁移率,其他参数在(3)式中已经介绍.主要原因是^[9]由于(3)式所描述的肖特基发射规律适用条件为电子的平均自由程和绝缘体厚度相当,然而BST薄膜厚度一般远远大于电子平均自由程,因而应用(5)式描述肖特基发射规律.本文之所以引用(3)式描述电流机理,主要考虑此时薄膜内部结构已经破坏,形成了连续的导电通道,只有靠近薄膜表面的结构完整,所以实际起作用的绝缘部分厚度很薄,和电子平均自由程相当.这一点将在后面的模型中详细阐述.

3.3. 薄膜介电击穿模型讨论

综合上述分析,根据实验结果可以从理论上建立BST薄膜随外加直流电压增大,而处于不同状态的模型如图7所示.

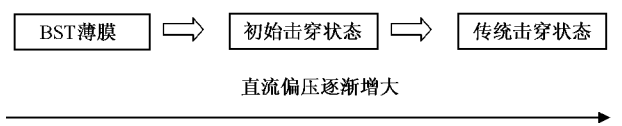


图7 随直流偏压增大,BST薄膜状态变化模型简图

首先,当BST薄膜没有被击穿时,由于薄膜体内结构因素,导致阴极发射的电子数超过阳极能够接纳的数目,从而在薄膜中形成负的空间电荷,形成空间电荷限制电流^[10]如图1中 J - V 特性曲线所示.

初始击穿状态 当电压逐渐增大,根据空穴注入模型^[11],空穴陷阱俘获空穴的正反馈行为将导致薄膜内部出现了连续的导电通道,此时阴极每秒注入的电子数完全可以被阳极所接纳,导电机理也不再是空间电荷限制电流.根据实验所观测到的 J - V

曲线,此时成肖特基发射电流机理,为电极限制.由于薄膜内部的空穴浓度大于薄膜表面的空穴浓度^[12],所以空穴陷阱在薄膜内部更容易俘获空穴,则在薄膜内部更容易形成连续导电通道,因而薄膜内部结构首先被破坏,起体限制的空间电荷限制电流作用消失,但是,电压还不足够大以至于破坏靠近表面的薄膜结构,薄膜表面和金属电极之间形成的肖特基势垒仍然存在,所以导电机理表现出肖特基

发射机理.当然,出现该种状态的微观证据正在研究中.

传统击穿状态 当电压继续增大到一定程度时,薄膜内部和界面均受到破坏,界面势垒也不再存在,因而此时成欧姆导电规律,并且由于迁移率对电流密度的影响,使电流密度随温度升高而下降.

表 1 更详细地说明初始击穿状态和传统击穿状态特征.

表 1 BST 薄膜初始击穿状态和传统击穿状态特征比较

	初始击穿状态	传统击穿状态
导电机理	肖特基发射电流 $\ln J \propto E^{1/2}$	欧姆导电规律 $J \propto V$
薄膜性能	薄膜介电性能被破坏	薄膜介电性能被破坏
状态改变时特征	J - V 特性中没有电流瞬时增大情况	J - V 特性中存在明显电流瞬增情况
电流密度温度特性	电流密度随温度升高而增大 $\ln\left(\frac{J}{T^2}\right) \propto \frac{1}{T}$	电流密度随温度升高而减小 $J \propto T^{-n}$

从上述分析可以看出,既然初始击穿状态的出现已经造成薄膜的性能破坏,所以在衡量薄膜的击穿电压时,不应以传统的电流密度瞬时增大时的电压作为击穿电压,而应该以薄膜性能被破坏时的电压为击穿电压,即出现初始击穿状态时的电压.

4. 结 论

本文对射频溅射制备的 BST 薄膜介电击穿性能研究,得到结论主要如下:

- 1. 发现在电压增大到传统的击穿电压之前,薄膜介电性能已经被破坏,并且存在另一个状态——初始击穿状态.
- 2. 处于初始击穿状态的薄膜漏电机理为肖特基发射机理: $\ln J \propto E^{1/2}$, 电流密度和温度关系满足

$\ln\left(\frac{J}{T^2}\right) \propto \frac{1}{T}$, 而处于传统击穿状态下的薄膜漏电流密度则更大,并且服从欧姆导电规律 $J \propto V$, 电流密度和温度的关系满足 $J \propto T^{-n}$.

3. 建立了薄膜结构、漏电性能随电压增大而变化的模型,随着电压增大,首先发生的是初始介电击穿,然后才是传统介电击穿,即首先被破坏的是内部的薄膜结构,其次才是靠近界面的薄膜结构.当然,为了更清楚地反映击穿过程,更深入的微观研究正在进行.

4. 根据初始击穿状态的分析可知,确定击穿电压不应按传统的方法(电流密度瞬时增大时的电压为击穿电压),而应找出薄膜结构最初被破坏时的电压,即初始击穿电压.

[1] Berman A 1981 *International Reliability Physics Proceeding* (Piscataway , NJ) p 204

[2] Dumin D 2002 *Oxide Reliability : A Summary of Silicon Oxide Wearout , Breakown , and Reliability*(World Scientific , London)23 1

[3] Kumar V , Jain S C , Kapoor A K *et al* 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 1283

[4] Kao K C , Hwang W 1991 *Electrical Transport in Solid* (Science Press)(in Chinese)[高观志、黄维著 ,雷清泉译 ,钟维烈校 1991 固体中的电输运 (科学出版社)]

[5] Yang H , Tao K , Chen B *et al* 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 4817

[6] Shimada Y , Inoue A , Nasu T *et al* 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* (part 1)**35** 140

[7] Zafar Z , Jones R E , Jiang B *et al* 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 3533

[8] Chen B , Yang H , Miao J *et al* 2005 *Appl. Phys. Lett.* **97** 024106

[9] Simmons J G 1965 *Phys. Rev. Lett.* **15** 967

[10] Sudhama C , Campbell A C , Maniar P D *et al* 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 1014

[11] Kimura M 1999 *IEEE Transactions on Electron Device* **46** 220

[12] Meyer R , Liedtke R , Waser R 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 112904

Dielectric breakdown of BST thin films prepared by RF sputtering^{*}

Lu Xiao Wu Chuan-Gui Zhang Wan-Li Li Yan-Rong

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics , University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 610054 , China)

(Received 7 September 2005 ; revised manuscript received 10 November 2005)

Abstract

Dielectric breakdown of BST thin films prepared by RF sputtering is studied in this paper. It is found that , the BST thin films will have already broken before the voltage reaches to conventional breakdown strength , which is normally tested by ramping the voltage and recording the voltage at which an abrupt rise in leakage current is observed. Accordingly , another state of BST thin films , i. e. the incipient breakdown , is found instead. The model which describes the films ' configuration changes with the increase of voltage is established , and a new method to determine the practical breakdown strength is proposed.

Keywords : BST thin films , dielectric breakdown , leakage current

PACC : 7340R , 7360H

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China(Grant No. 513102) and the Foundation of Defence(Grant No.51412020505DZ0202).