

快速热退火多晶硅薄膜压阻特性研究

曹子祥 黄永宏 王思杰 陈怀溥

(西北大学电子科学系,西安,710069)

1991年8月20日收到,1991年11月12日修改定稿

本文首先系统的研究了用 LPCVD 工艺在温度为 625°C 、气相硼硅原子比分别为 1.6×10^{-3} 和 2.0×10^{-3} 时淀积的、其后又分别经 900°C 、 1050°C 、 1150°C 10 秒钟快速热退火 (RTA) 处理的多晶硅薄膜压阻特性。然后,基于上述结果,着重研究了气相硼硅原子比分别为 1.6×10^{-3} 、 2.0×10^{-3} 、 4.0×10^{-3} 和 5.0×10^{-3} 时淀积,其后只经 1150°C 10 秒钟快速热退火处理的多晶硅薄膜压阻特性。在上述淀积条件下,与 900°C 30 分钟常规热退火 (FA) 相比较,得到了快速热退火的最佳条件。

PACC: 8115H, 7360F, 8140E, 7220F

一、引言

用 LPCVD 工艺,在温度低于 650°C 下气相掺杂淀积的供压阻器件用的多晶硅薄膜,为了提高杂质原子的激活率和消除缺陷及晶粒再长大,一般都需要再在 $800-1100^{\circ}\text{C}$ 温度范围内进行热退火处理^[1]。常规热退火、激光退火与处于液相再结晶模式的扫描快速热退火多晶硅薄膜的压阻特性,国内外已有不少学者进行过研究^[2-4]。和相同温度 (1100°C) 下常规热退火作比较的快速热退火多晶硅薄膜压阻特性研究,国外也有过报道,并得出是效果不好的结论^[4]。但是,当今传感器件已进入集成化发展阶段,如果与多晶硅薄膜压力传感元件集成在一起的有用离子注入制造的作为其它功能用的浅结器件时,用激光退火或快速热退火,可以保证退火前后这些离子注入的浅结器件的结深和杂质分布不会发生明显改变,而快速热退火和激光退火相比较,有设备简单、价廉、操作方便、可在大面积上进行退火等优点,因此,系统研究快速热退火多晶硅薄膜压阻特性,找出最佳退火条件,就可使上述浅结器件的退火和多晶硅薄膜压力传感元件的退火一次完成,从而可缩短工艺流程,有利于成品率提高。所以,开展这方面的研究,是具有实用价值的。

二、样品制备和快速热退火条件

1. 多晶硅薄膜的淀积

衬底是 $\phi 50\text{mm}(100)$ 晶向的单面抛光硅片,厚度 $\sim 0.4\text{mm}$, 在其抛光面上先热生长一层 $\sim 8000 \text{ \AA}$ 厚的 SiO_2 , 然后在国产 LPCVD 设备中淀积 $\sim 5000 \text{ \AA}$ 的气相掺硼多晶硅薄膜,它们的淀积条件是: 温度 625°C , 系统总压力 $\sim 80\text{Pa}$, 氢稀释的 5% SiH_4 和 0.5%

B_2H_6 分别作源和掺杂源, 高纯 N_2 气流量是 2SLM, 源的流量 2SLM, 它相当于 SiH_4 的实际流量是 59SCCM, B_2H_6 的流量, 可根据本实验中选定的气相硼硅原子比 (B/Si) 的大小, 将杂质源 ($99.5\% H_2 + 0.5\% B_2H_6$) 的流量, 在 10—100SCCM 范围内进行调节而满足。在本实验中 B/Si 选用了 1.6×10^{-3} 、 2.0×10^{-3} 、 4.0×10^{-3} 和 5.0×10^{-3} 四种, 它们是在制造多晶硅薄膜压力传感元件时, 最常采用的气相掺杂条件。

2. 快速热退火 (RTA) 条件

快速热退火装置是国产 KST-1 型卤钨灯快速退火炉, 该炉子的温度可在 700—1300°C 范围内选用, 它升到预定温度的时间在 4—8 秒之间, 退火过程中, 炉内通入高纯 N_2 气作保护气氛。对 B/Si 为 1.6×10^{-3} 、 2.0×10^{-3} 两种样品, 分别选用了三种集成电路工艺中常用的典型退火温度: 900°C、1050°C 和 1150°C, 恒温时间均为 10 秒钟。根据上述退火结果, 对 B/Si 为 4.0×10^{-3} 、 5.0×10^{-3} 两种样品, 快速热退火的条件只选用了 1150°C 10s 一种。

作为和快速热退火结果相比较, 常规热退火 (FA) 的条件选为 900°C 30 分钟, 这个条件也是制造一般的多晶硅薄膜压力传感元件时, 最常采用的退火条件。

3. 电学和压阻参数测量用的电阻制备

将经过退火后的大片样品, 先通过金属片刻制好的掩模, 蒸发上一层 ($\sim 1 \mu m$) 准备作为电极用的 Al 层, 然后在划片机上分割成两端包含 Al 电极的大小为 $12 \times 3 mm$ 的长条, 其中每端 Al 电极为 $3 \times 3 mm$ 大小, 再在 Al 电极上涂上一层银膏 (一定比例的银粉、粘合剂和有机溶剂组成), 在 500°C 温度, 用 N_2 气保护进行半小时的 Al 合金和烧银, 最后, 用高温焊锡将软导线焊在银面上, 测量用的电阻即告做成。在测量电学和压阻参数的过程中, 对每一种 B/Si 和退火条件的样品, 尽可能做到由一个测量电阻跟踪下去。

三、测量结果和讨论

1. 测量结果

(1) 多晶硅薄膜织构和晶粒尺寸测量 用理学 $D_{max} III C$ 型 X-射线衍射仪对其织构和晶粒尺寸进行了测量, 测得未退火前晶粒主要取向在 (111), (220) 和 (311) 晶向, 其中 (111) 衍射峰最强, (311) 次之, (220) 较弱, 这是和文献 [5] 中报道相一致。经各种退火条件处理后, (111) 衍射峰仍保持最强, 但 (220) 衍射峰相对于 (311) 衍射峰强度稍有增加, 图 1 给出了由谢尔公式计算出的 (111) 取向晶粒尺寸 D_{111} 和退火温度的关系。

(2) 电阻率和电阻温度系数 TCR 测量 测量过程中, 要求电阻测量能精确到万分之一, 温度精度控制在 $\pm 0.5^\circ C$ 。电阻率可由测得的电阻值通过该电阻的几何尺寸、膜厚换算出来, TCR 是根据它的定义, 先测出某一温度 T 时电阻 $R(T)$ 相对 $T = 25^\circ C$ 的电阻 R_{25} 的相对变化 $(R - R_{25})/R_{25}$ 与温度的关系, 然后, 对温度 T 时的电阻温度系数通过公式 $TCR = \frac{R - R_{25}}{R_{25}} / (T - 25)^\circ C$ 算出。图 2 是电阻率和 B/Si 的关系曲线, 图 3--6 是 B/Si 分别为 1.6×10^{-3} 、 2.0×10^{-3} 、 4.0×10^{-3} 、 5.0×10^{-3} 时的 $(R - R_{25})/R_{25}$ 与温度

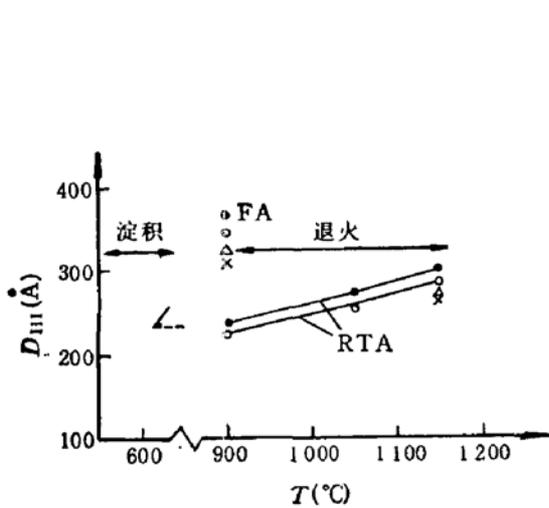


图1 (111)取向晶粒尺寸 D_{111} 和退火温度关系
图中符号 ●, ○, △, ×, 对应的 B/Si 是 1.6×10^{-3} , 2.0×10^{-3} , 4.0×10^{-3} , 5.0×10^{-3}

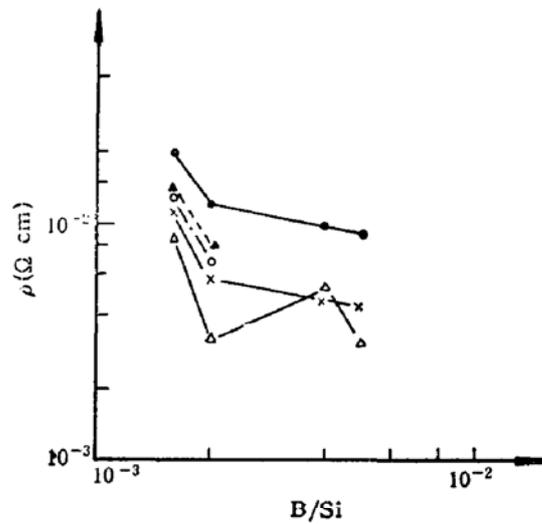


图2 电阻率与 B/Si 的关系, 图中符号 ●、▲、○、×、△, 分别对应退火前, 900°C RTA, 1050°C RTA, 900°C FA, 1150°C RTA

的关系曲线, 上述图中都以退火条件作参变量。

(3) 多晶硅薄膜压阻特性测量 在国产 YG-700 型高温应变计校验装置上, 对各种退火条件下的多晶硅薄膜应变计的纵向灵敏系数 K_L 及 K_L 的温度系数 TCK 进行了测量。温度为 10°C 时, 在 $0-300 \mu\text{s}$ 范围内测量了 K_L 。应变为 $200 \mu\epsilon$ 下, 在 $0-130^\circ\text{C}$

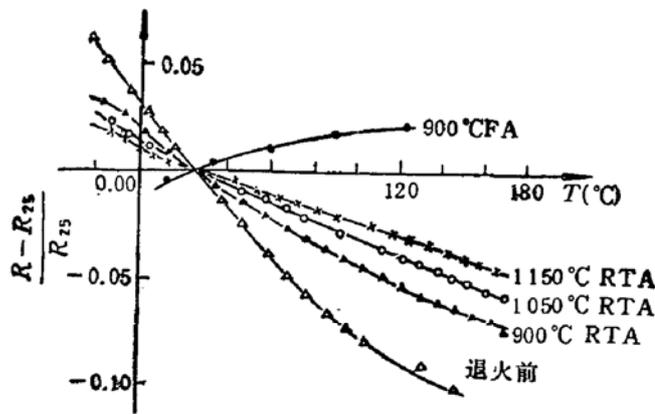


图3 B/Si 为 1.6×10^{-3} 的 $R(T)$ 相对于 R_{25} 的相对变化与温度的关系

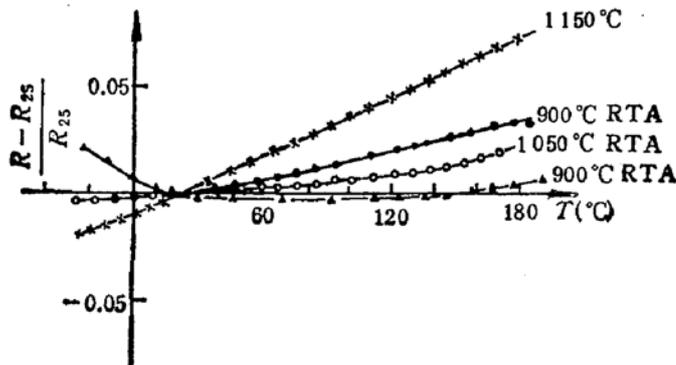


图4 B/Si 为 2.0×10^{-3} 的 $R(T)$ 相对于 R_{25} 的相对变化与温度的关系

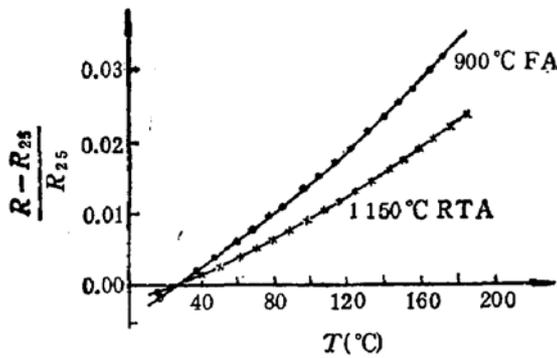


图5 B/Si 为 4.0×10^{-3} 的 $R(T)$ 相对于 R_{25} 的相对变化与温度的关系

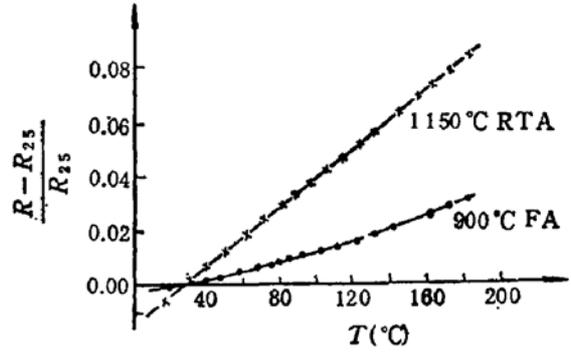


图6 B/Si 为 5.0×10^{-3} 的 $R(T)$ 相对于 R_{25} 的相对变化与温度的关系

范围内测量了 TCK。所测得结果示于表 1 中,该仪器测量 K_L 的误差小于 1%, 所测得的 K_L 在上述应变范围内的非线性在 0.1—0.2% 之间。图 7 是 K_L 与 B/Si 的关系曲线。

2. 结果讨论

1) 多晶硅薄膜的电阻一般可写为: $R_{poly} = R_b + R_{GB}$, R_b 是与晶体区域对应的电阻, R_{GB} 是晶粒边界垒引起的电阻。因此, R_{poly} 是与晶粒大小、掺杂浓度、边界垒高度

表 1 不同 B/Si 和退火条件的 K_L 和 TCK

退火条件 K _L TCK B/Si	30minFA		10s RTA					
	900°C		900°C		1050°C		1150°C	
	K _L	TCK 10 ⁻³ /°C						
1.6×10^{-3}	29.3	-5.5	18.5	-1.3	20.8	-1.9	27.5	-3.2
2.0×10^{-3}	25.2	-4.1	20.1	-0.4	20.3	-1.1	23.0	-6.0
4.0×10^{-3}	24.5	-3.9					25.0	-3.7
5.0×10^{-3}	23.5	-2.3					22.5	-7.1

注: B/Si 1.6×10^{-3} 未退火样品 K_L :14.5, TCK:-0.3%/°C

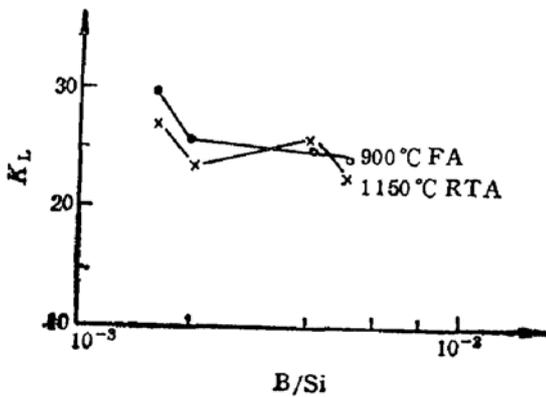


图7 K_L 与 B/Si 的关系

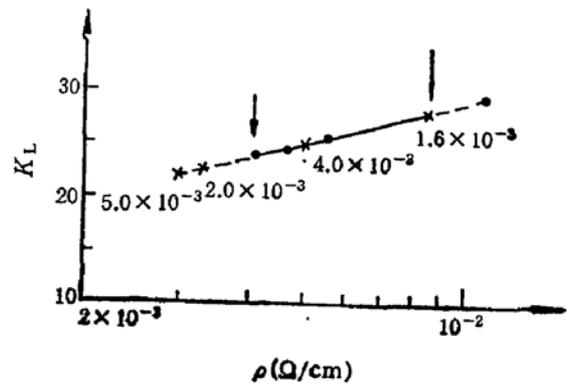


图8 K_L 与 ρ 关系图中符号 \bullet 、 \times , 对应于 900°C FA 和 1150°C RTA

有关^[6],随着掺杂浓度增加和晶粒尺寸增大, R_b 将起主导作用,此时, $(R - R_{25})/R_{25}$ 是正的,其正值随掺杂浓度(实际是应指载流子浓度)和晶粒尺寸增大而增加. 反之 R_{GB} 起主导作用,此时的 $(R - R_{25})/R_{25}$ 是负,它随掺杂浓度和晶粒尺寸减小更负. 图 3—6 清楚的看到了这一点. 对 B/Si 为 2.0×10^{-3} 的 900°C 10s RTA 样品的 $(R - R_{25})/R_{25}$, 在 $40-140^\circ\text{C}$ 范围内是一条与 T 轴非常接近的水平线,这说明在此范围内 R_b 与 R_{GB} 分别随温度的变化是相互抵消了.

2) 从 ρ -B/Si 图中可以看到,对于 1150°C 10s RTA 样品,在 B/Si 从 2.0×10^{-3} 到 4.0×10^{-3} 之间出现了 ρ 增加现象. 文献 [1] 中认为这种现象的出现,是因为此范围内载流子浓度减小大于迁移率增加,文献 [7] 中认为是由于硼原子和空位(V)之间形成了 B_2V 络合物使载流子浓度减少所致. 从本文图 5 中看到, B/Si 4.0×10^{-3} 的 1150°C RTA 样品的 $(R - R_{25})/R_{25}$ 是比它的 900°C FA 样品的 $(R - R_{25})/R_{25}$ 小,但是,从图 4 和图 6 中却看到了相反的情况,依据讨论(1),我们认为这就可以说明: B/Si 4.0×10^{-3} 的 1150°C RTA 样品中载流子浓度的确是比 B/Si 2.0×10^{-3} 的 1150°C RTA 样品中载流子浓度减少了.

3) 由 K_L -B/Si 曲线看到它的形状和 ρ -B/Si 曲线形状基本相同,如改画为 K_L - ρ 曲线,如图 8 所示. 对于 1150°C 10s RTA 样品,由于它的电阻率不是随 B/Si 增加单调下降,而是在 B/Si 从 2.0×10^{-3} 到 4.0×10^{-3} 之间出现了 ρ 增加现象,因此,对这个退火条件下的 K_L - ρ 曲线上每一个点,都标明了对应的 B/Si,从图 8 中看到,上述两个退火条件的 K_L - ρ 曲线有一段是相重合的,如图中箭头所夹的实线范围,在此范围内两种退火条件得到的 K_L 值是相等的,但是,将此图和图 2、图 7 对照起来,却发现此区域对不同的退火条件是属于不同的 B/Si,对 900°C 30min FA 样品,它的 B/Si 在 $1.7-5.0 \times 10^{-3}$ 范围,对 1150°C 10s RTA 样品,它的 B/Si 在 $1.6-1.9 \times 10^{-3}$ 和 $3.7-4.3 \times 10^{-3}$ 范围,根据文献^[6]的 K_L 的理论公式(16),对出现这个实验现象并不难理解,重要的是这个实验事实说明了,若要将 B/Si 为 $1.7-5.0 \times 10^{-3}$ 范围淀积的多晶硅薄膜的 900°C 30min FA 改变为 10s RTA,并且要求快速退火后样品的 K_L 值接近或相同于 900°C 30min FA 样品的 K_L 值时,除快速热退火温度应选为 1150°C 外,在淀积多晶硅薄膜时就应先先将 B/Si 在 $1.6-1.9 \times 10^{-3}$ 和 $3.7-4.3 \times 10^{-3}$ 范围内作相应调整. 如果还要要求两种退火条件所得到 TCK 接近,特别是要使快速退火样品的 TCK 比 900°C 30min FA 样品的 TCK 为小时,最佳的条件是 B/Si 为 1.6×10^{-3} 和 4.0×10^{-3} 的 1150°C 10s RTA,因为,前者 and 同一 B/Si 的 900°C 30min FA 样品的 K_L 与 TCK 相比较, K_L 仅下降了 6%, TCK 却减小了 41%,后者和同一 B/Si 的 900°C 30min FA 样品的 K_L 与 TCK 相比较,两种退火条件下所得到的 K_L 和 TCK 基本相同.

4) 对于 B/Si 为 1.6×10^{-3} 、 2.0×10^{-3} 的 900°C 10s 和 1050°C 10s RTA 样品与 900°C 30min FA 样品相比较,它们的 K_L 值虽较常规热退火的 K_L 值小,但 TCK 却有明显的减少,特别是 B/Si 2.0×10^{-3} 的 900°C 10s RTA 样品,它的 K_L 虽比 900°C 30min FA 样品的 K_L 小了 20%,但 TCK 却减小了一个数量级,而且该样品在 $40-140^\circ\text{C}$ 范围内,它的电阻基本上不随温度变化而改变. 对这个样品在进行 X-射线衍射分析中发现 Si(111) 峰的衍射角 $2\theta_{(111)}$ 和(220)峰的衍射角 $2\theta_{(220)}$, 分别相对无织构粉末样品的标

准衍射角 28.46° 和 47.34° 移动了 -0.12° 和 -0.18° (该样品中(311)峰不明显), 但是, 在本实验装置中, 样品表面和测试架表面高度差很容易做到在 $\pm 0.1\text{mm}$ 之内, 因这个高度差, Si(111)、(220)、(311)晶向引起 Cu 靶的 $K_{\alpha 1}$ 线的衍射角的最大移动量是在 $\pm 0.06^\circ$ 内, 因此, 我们可以定性的判断出(要做精确的定量计算, 需要测出高角度衍射峰的移动量, 在我们的样品中, 因这些峰太弱, 因而或不明显、或不出现), 在该样品的多晶硅薄膜内存在较大的宏观压应力。对于四个 B/Si 的 1150°C 10s RTA 样品, 它们的 TCK 不像 900°C 30min FA 样品的 TCK 随着 B/Si 增加而减小, 由这些样品的 X-射线衍射角 2θ 的移动量, 也能定性判断出, 其中 TCK 较小的样品比 TCK 较大的样品中存在较大的宏观应力(或压应力、或张应力)。Germer^[3] 在研制晶粒大小在 $40\text{--}120\text{\AA}$ 的微晶硅敏感元件时, 他能将这种薄膜的 TCK 做到小于 0.03% K, 但从喇曼光谱分析中, 他却发现该薄膜内存在较大的压应力, Germer 对如此小的 TCK 与薄膜内有较大的压应力之间是否有必然的联系并未作明确交待, 他的结论仅指出: 晶粒度越大, 应力越小, 高掺杂也可减小应力。我们在经过快速退火后晶粒尺寸仍小于 300\AA 的多晶硅薄膜上, 又一次观察到了 TCK 较小的薄膜内存在较大的应力这一现象, 至于它们之间是否存在必然的联系, 还有待作进一步研究。

四、结 论

对 B/Si 为 1.6×10^{-3} 、 2.0×10^{-3} 、 4.0×10^{-3} 、 5.0×10^{-3} 、温度 625°C 时淀积的厚度 $\sim 5000\text{\AA}$ 多晶硅薄膜, 进行了 1150°C 10s 快速热退火处理。测得了 K_L 值分别为: 27.5、23.0、25.0、22.5, TCK 值分别为: -0.32% 、 -0.6% 、 -0.37% 、 -0.71% , 与同一范围 B/Si 的 900°C 30min FA 样品相比较, 在这两种退火条件下, 在 $K_L \sim \rho$ 图中, 存在一个与薄膜电阻率相等区域对应的 K_L 相等区域, 其中 B/Si 为 1.6×10^{-3} 和 4.0×10^{-3} 的 1150°C 10s RTA 样品的压阻特性接近甚至优于同一 B/Si 的 900°C 30min FA 样品的压阻特性, 这是在上述 B/Si 范围 900°C 30min FA 需要改变为 RTA 的最佳条件。

与 900°C 30min FA 相比较, B/Si 为 1.6×10^{-3} 和 2.0×10^{-3} 的较低温度 (900°C 、 1050°C) 快速热退火, 虽然 K_L 值下降了, 但它有利于 TCK 的改善, 特别是 B/Si 2.0×10^{-3} 的 900°C 10s RTA 样品, K_L 仅下降了 20%, TCK 却减小了一个数量级, 而且它的电阻, 在 $40\text{--}140^\circ\text{C}$ 范围内几乎不随温度而改变。如果我们也能像 Germer^[3] 所采用的在器件机械结构设计上对低的 K_L 值做一些弥补的话, 作为能改善 TCK 的工艺条件, 较低温度的快速热退火, 应受到重视。

作者感谢西安电子科技大学张廷庆同志提供了快速退火设备和给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] J.Y.W. Seto, *J. Appl. Phys.*, **47**, 4780(1976).
- [2] J. Detry *et al.*, 3rd inter. conf. Solid State Sensors and Actuators 278 (1985).
- [3] D.P.Vu *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **54**, 437(1983).
- [4] J. Suski *et al.*, *Sensors and Actuators*, **17**, 405(1989).

- [5] G. Harbeke *et al.*, *RCA Review* 44, 287(1983).
[6] G. Baccarani *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 49, 5565(1978).
[7] 王阳元等编著“多晶硅薄膜及其在集成电路中应用”科学出版社,39(1988).
[8] W. Germer, *Sensors and Actuators*, 7, 135(1985).

Study of Piezoresistance Properties of Rapid Thermal Annealed Polycrystalline Silicon Films

Cao Zixiang, Huang Yonghong, Wang Sijie and Chen Huaipu

(Department of Electronic Science, Northwest University, Xi'an 710069)

Abstract

This paper systematically studies the piezoresistance properties of polysilicon films deposited by LPCVD process at temperature of 625°C and with vapour phase boron-silicon atomic ratios of 1.6×10^{-3} and 2.0×10^{-3} and treated with rapid thermal annealings(RTA) at temperatures of 900°C, 1050°C, 1150°C for 10 seconds. Based on the results, the paper gives special emphasis to the piezoresistance properties of polysilicon films deposited with vapour phase boron-silicon atomic ratios of 1.6×10^{-3} , 2.0×10^{-3} , 4.0×10^{-3} and 5.0×10^{-3} , and treated with rapid thermal annealing at 1150°C for 10 seconds only. Under the conditions mentioned above, as compared with conventional furnace annealing (FA) at 900°C for 30 minutes, the optimum conditions of RTA have been obtained.

PACC: 8115H, 7350F, 8140E, 7220F