

半导体硅片的 p-n 结和铜沉积行为的 电化学研究*

程璇 林昌健¹

(厦门大学化学系固体表面物理化学国家重点实验室, 厦门 361005)

(1 厦门大学材料科学系固体表面物理化学国家重点实验室, 厦门 361005)

摘要: 分别采用电化学直流极化和交流阻抗技术, 通过控制光照和溶液化学组分, 研究了半导体硅片/氢氟酸体系的电化学特性和半导体性能。对 p(100) 和 n(100) 两种硅片的研究结果均表明, 有光照条件下硅/氢氟酸界面上的电化学反应很容易发生且起着主导作用, 而黑暗条件下硅片则处于消耗期, 电化学反应难于发生, 因而其半导体性能起着重要的作用。当溶液中有微量铜存在时, 硅/溶液界面上的电化学反应将被加速。通过单独研究两种硅片的电化学行为, 讨论了半导体硅片在氢氟酸溶液中形成的 p-n 接点行为, 并通过考察溶液中的铜离子浓度、光照条件和沉积时间对铜在硅片上的沉积行为的影响, 探讨了铜沉积机理。研究结果表明, 电化学交流阻抗法对研究稀释氢氟酸溶液中 ppb 浓度水平的微量铜杂质对硅片表面的污染极为有效, 有望用于半导体硅片表面铜污染的检测。

关键词: 金属污染; 铜沉积; 极化电阻; 硅/溶液界面; p-n 结

PACC: 7340M; 8245; **EEACC:** 2550E

中图分类号: TN 305.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)05-0509-08

Electrochemical Investigations of p-n Junction and Copper Deposition on Semiconductor Silicon Wafers*

CHENG Xuan and L N Chang-jian¹

Department of Chemistry, 1 Department of Materials Science, State Key Laboratory for Physical Chemistry of Solid Surfaces, Xiamen University, Xiamen 351005, China)

Received 27 January 1999, revised manuscript received 17 June 1999

Abstract: Semiconductor silicon plays a significant role in microelectronic industries. This investigation is conducted to study electrochemical behavior of p-n junction and copper deposition on p(100) and n(100)

* 国家教委博士后科学基金及助学金(编号6415)和回国人员科研费资助[Project Supported by the Postdoctoral Science Foundation of the State Education Ministry of China (No. 6415)].

程璇 女, 1963年出生, 副教授, 目前从事电子材料和应用电化学方面的研究, 主要研究方向包括: 半导体硅片的微观污染机理及控制; 多孔硅的制备及表征等。

1999-01-27收到, 1999-06-17定稿

silicon wafers in dilute hydrofluoric acids. The silicon/solution interface is characterized using electrochemical DC polarization and AC impedance techniques under both illuminated and dark conditions. The results revealed that the electrochemical reactions take place favorably and become predominated at Si/solution interface under illuminated conditions, while silicon is in depletion region under dark conditions, accordingly, its semiconductor properties play an important role. It can be predicted from the electrochemical studies of p-type and n-type silicon that p-type silicon will behave as a cathode and n-type silicon as an anode in p-n junction under illumination. The reaction rate at the interface of p-n junction is significantly accelerated in the copper contaminated solutions. However, under the dark condition p-type silicon will be an anode and n-type silicon a cathode. The nature of copper deposition onto silicon wafer surfaces is investigated by ac impedance spectroscopy, and the effects of illumination and depositing time have been also examined. It has been demonstrated that ac impedance spectroscopy is effective to study the ppb level of copper contamination from dilute HF solutions onto silicon wafer surfaces.

Key words: metallic contamination; copper deposition; polarization resistance; silicon/solution interface; p-n junction

PACC: 7340M; 8245; **EEACC:** 2550E

Article ID: 0253-4177(2000)05-0509-08

1 前言

元素周期表中的第IV族元素——硅,在固态电子工业的发展中有很重要的地位。硅材料在信息系统大规模集成电路中的广泛应用已将“微电子”和“硅芯片”变成同义词,被称为“信息时代的基石”。硅是典型的元素半导体材料,与其他半导体材料如砷化镓和锗相比,其物理性质并不突出,有些性质甚至比砷化镓和锗还差,如电子迁移率较低,是间接带隙材料,载流子的复合过程需要声子参与,发光效率很低等。硅材料之所以能成为目前世界上最重要的功能材料的关键在于它的化学本性,特别是能生成结构稳定、性能优异的二氧化硅。在许多情况下,硅与溶液直接接触,固/液界面的化学/电化学反应及溶液的化学性质将直接影响硅的半导体性能。因而,研究硅的电极过程具有重要的科学意义和技术价值。氢氟酸被大量地用在硅片表面的刻蚀、摹制及清洗过程。硅片在氢氟酸中的刻蚀行为基本上是电化学属性,即氧化反应和还原反应分别发生在硅表面同时存在的阴极和阳极微区。

超大规模集成电路技术的迅猛发展,对硅片的表面预处理过程提出了严峻的挑战。微电子技术的发展趋势是在越来越小的硅芯片上存储越来越多的信息量和获得越来越好的分辨率。在表面预处理过程中获得超洁净和光滑均匀的硅片表面,是提高电子元器件性能和可靠性的重要保证。要获得近乎完美的均匀性和重现性的硅片表面,必须使用:(1)超洁净处理环境;(2)超洁净硅片表面;(3)完美的工艺参数控制^[1]。

超洁净硅片表面应具有如下六个特点:(1)无金属污染;(2)无颗粒污染;(3)无有机物污染;(4)无吸附分子污染;(5)无自然氧化物生长;(6)硅片表面以氢为终端。其中,金属污染是硅片表面预处理过程中最普遍发生的污染之一,而硅片表面的铜沉积是金属污染中最常见的一种,直接影响电子元器件的性能,近年来已成为国际研究的热点,引起世界范围内的广泛注意。

有关研究表明,氢氟酸中含有的微量铜、银或铂会在硅片表面直接沉积,而比硅电负性小的铁和镍等则不会发生沉积现象^[2-4]。尽管许多研究者对铜沉积现象大多局限于用分析仪器来定量地测试污染前后硅片的铜表面浓度变化或通过表面分析手段来定性地表征污染前后硅片的表面形貌变化。由于各种仪器都有精度和灵敏度的限制,同时受各种操作因素的影响,得到的结果差异很大,有的甚至互相矛盾。另外,硅片与溶液接触后,硅/氢氟酸的界面特性不容忽视,光考虑硅片的半导体性质是远远不够的。因而,用电化

学方法来研究硅片表面的铜沉积现象应是最理想的方法

通过室温下 p(100) 和 n(100) 硅片的电化学直流极化和交流阻抗对比实验, 改变光照条件和溶液化学组分, 研究了固/液体系的电化学特性和半导体性能, 并分析了两种硅片在氢氟酸溶液中形成 p-n 接点时的电化学行为. 本文从发生在硅/氢氟酸界面的电化学反应入手, 首次采用电化学交流阻抗法, 研究了铜在 p(100) 和 n(100) 硅片表面的沉积行为, 并通过等效电路的模拟分析, 表征了硅/氢氟酸的界面特性, 计算出电化学反应的重要参数, 探讨了硅片表面的铜沉积机理

2 实验部分

2.1 材料和试剂

实验用硅片分别为 p(100), 电阻率为 1—10Ω·cm; n(100), 电阻率为 2—4Ω·cm, 由美国 Texas Instruments 公司提供. 所用的试剂有: H₂SO₄ (98%), H₂O₂ (30%), HF (49%), 均为半导体纯度, 由美国 Olin 公司提供. 实验用的 ICP 铜标准溶液(1000 ppm)则从美国 Sigma Chemicals 公司购得.

2.2 电化学直流极化实验

直流极化实验采用美国 EG&G273A 型恒电位/电流仪和配套 PC 计算机及软件. 电解槽由美国 EG&G 的三电极平槽(K0235 Flat Cell)改装而成, 槽身用聚丙烯材料做成, 容积大约为 170ml. 工作电极为 n(100) 硅片(1.5 × 1.5cm²), 在电解槽中露出溶液的表面约为 1cm². 辅助电极为铂片, 参考电极为 Ag/AgCl 双层电极(内层为 Ag/AgCl 电极, 外层为聚丙烯材料). 实验前硅片均用 4:1 (体积比) 的 H₂SO₄·H₂O₂ 混合溶液浸洗 10min, 并用超纯去离子水(电阻率为 18MΩ·cm) 冲洗干净, 然后用氮气小心吹干. 光照条件的实验由 100W 白炽灯倾斜着直接照射在电解槽的工作电极一端, 无光照条件的试验则在关闭所有室灯后, 将电解槽置于有盖黑盒中进行. 所有实验均在室温(25 ± 1) 下进行.

2.3 电化学交流阻抗实验

电化学交流阻抗实验使用美国 EG&G273A 型恒电位/电流仪、6310 型频率响应分析仪和配套 PC 计算机及软件, 实验所用的电激励信号为 ± 5mV 的正弦波, 频率范围为 10⁵—10²Hz. 其他实验步骤同上. 等效电路的分析和交流阻抗实验结果的采集都使用美国 EG&G 公司提供的配套软件.

3 实验结果和讨论

3.1 硅片的电化学特性

图 1 为 p(100) 和 n(100) 硅片电极在稀释氢氟酸(0.5M HF) 溶液中通过直流极化实验得到的电势-电流密度特性图. 图(a) 为有光照条件, 图(b) 为黑暗条件下得到的极化曲线. 从图看出, 半导体硅片在 HF 溶液中的电化学极化行为与金属在酸性介质中的极化行为类似, 分为阳极极化(由平坦部分到高电位) 和阴极极化(由平坦部分到低电位) 两部分. 同一电极的两条极化曲线相交部分(即平坦线) 对应的电位即为硅片电极的开路电位(E_o). 在 Tafel 区域(偏离 E_o ± 25mV) 通过延长阳极和阴极极化曲线使两线相交可求得极化电阻(R_p), 该数值大小与固/液界面上的电化学反应速度成反比, 即 R_p 越小, 电化学反应速度越快.

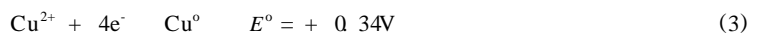
一般认为, 当硅片置于洁净的 HF 溶液中, 氧化反应通常是硅的溶解, 生成较稳定的氢化硅氟酸(H₂SiF₆). 发生在硅片/溶液界面的氧化反应式可简写成:



硅片的氧化反应发生在 Si/HF 界面的阳极微区, 并产生电子(即消耗空穴), HF 溶液中的氢离子会从硅片表面直接获得电子(即提供空穴), 在 Si/HF 界面的阴极微区发生对应的还原反应, 并析出氢气



溶液含有微量的金属铜, 硅的氧化反应将被加速, 因为铜的沉积反应电位比氢的还原反应电位高



由以上分析推断,当溶液中有铜污染时,其 E_0 值将提高(极化曲线上移), R_p 值将降低(即反应速度加快,极化曲线右移)。图1证实了这一点,所有的极化曲线整体右上移,尤其是在有光照时更为明显。铜在硅片表面上的沉积,加剧氢在硅片表面的还原,导致硅的溶解加速,从而加速消耗硅体中的空穴。在 Tafel 区域,硅的溶解主要是二价硅的溶解(SiF_2),在高电位时才生成稳定的四价硅(H_2SiF_6),因而阳极极化曲线呈现出二段不同的斜率。硅片在纯净 HF 溶液中(图1中实线)的阴极极化为典型的 Tafel 线性行为,此时发生在硅片表面的电化学反应是活化控制。当在洁净的 HF 溶液中加入100ppb 铜离子时(图1中虚线),有光照时阴极极化曲线在低过电位下仍近似为线性行为(图1(a)中的虚线),但在高过电位时有个突变,表明电极上的反应机理发生了变化,受到铜离子从溶液中迁移到电极表面的影响,反应从活化控制转变成浓差控制,并出现限制电流密度,即电流密度不随电位的增加而变化。在黑暗条件时不出现明显的限制电流密度,因为此时硅片处于消耗区。这一点将在下面的交流阻抗结果中详细讨论。

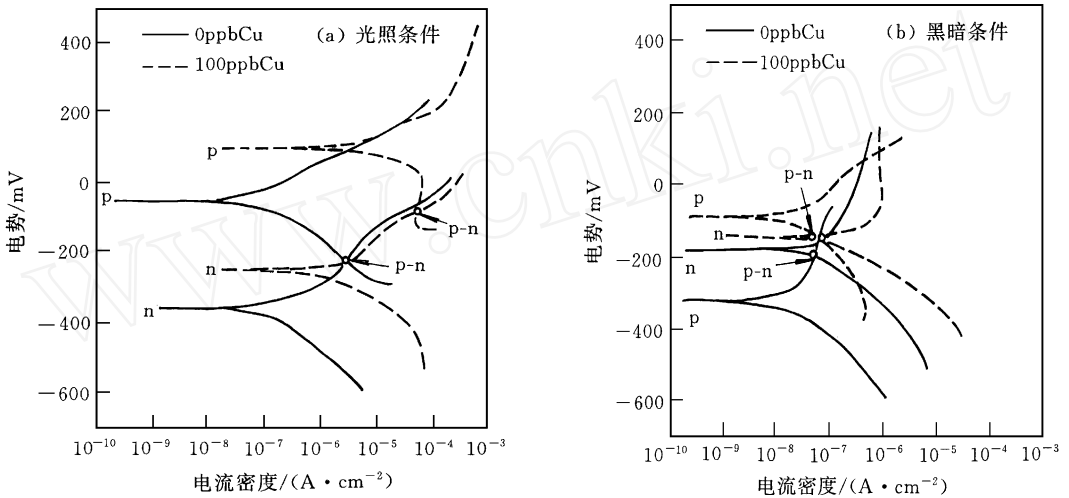


图1 硅片在洁净(0ppb Cu)和含有微量铜(100ppb Cu)的氢氟酸溶液中的极化曲线
图中 p 和 n 型硅片的阴极和阳极曲线 p-n 构成两种硅片在溶液中
相接触时形成的电偶对。

FIG. 1 Typical Polarization Curves of Silicon in Clean (0ppb Cu) and Copper
Containing (100ppb Cu) HF Solutions
(a) Under Illumination; (b) Under Dark

与电化学直流极化法相比,交流阻抗法用以研究电化学系统能获得较多的研究信息,因为只需对所研究的体系施加很小的电激励信号,就可以同时得到电化学反应速度及其它重要参数,如双电层充电电容等。图2显示的是分别用 p(100) 和 n(100) 硅电极从洁净 HF 溶液或被铜不同程度污染的 HF 溶液中得到的 Nyquist 阻抗图(即阻抗虚部的负数 $[-Z'']$ 对应阻抗实部 $[Z']$),图2中的曲线与频率有关,频率从左向右逐步减小。在图3的等效电路中, R_0 为溶液电阻,包括溶液电阻和硅块样品电阻, R_s 和 C_s 分别为接触电阻和接触电容,由硅块背面与工作电极接头间的非欧姆接触造成, C 为空间电荷电容(C_{sc})和双电层充电电容(C_{dl})串联时的总电容, R_t 为界面电荷迁移电阻, L 和 R_L 分别为电感和电感电阻,由铜在硅片表面沉积导致。表1给出了通过图3的等效电路模拟图2的结果计算得到的各参数值。

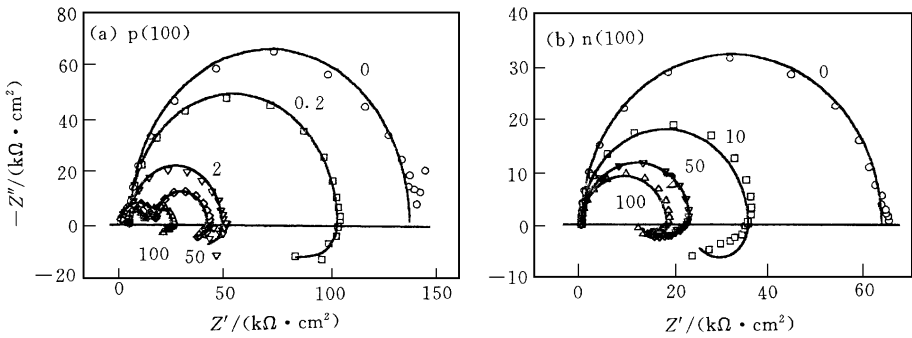


图2 光照条件下分别用p型和n型硅片电极在0.5M 氢氟酸溶液中得到交流阻抗图
 符号为通过实验获得的数据,对应实线为计算模拟得到的结果;
 曲线上的数字表示溶液中所含铜的ppb浓度

FIG. 2 Typical AC Impedance Results Obtained Under Illumination

The symbols represent the experimental data, while the solid lines the best-fitting results

The numbers in the curves indicate the copper concentrations in solutions (ppb).

(a) p-Type Si; (b) n-Type Si

表1 模拟计算得到的硅/溶液界面的参数

Table 1 Calculated Parameters for Silicon/Solution Interface

[Cu ⁺⁺] /ppb	R ₀ /(kΩ·cm ²)	R _s /(kΩ·cm ²)	C _s /(nF·cm ⁻²)	R _t /(kΩ·cm ²)	C _{dl} /(μF·cm ⁻²)	R _L /(kΩ·cm ²)	L /(kH·cm ²)	R _p /(kΩ·cm ²)
0	0.27	4.3	1.0	130	0.45	-	-	130
0.2	0.30	4.1	1.7	98	0.42	280	7300	73
2	0.26	4.0	1.1	45	0.27	150	2200	35
50	0.23	17	1.2	25	0.21	75	590	19
100	0.26	12	0.9	13	0.10	33	77	9
0	0.13	-	-	64	0.40	-	-	64
10	0.13	-	-	36	0.26	67	700	23
50	0.13	-	-	22	0.09	58	110	16
100	0.13	-	-	18	0.08	46	38	13

由图2可知,无论是p型还是n型硅片,在没有铜污染时,阻抗图上只出现电容环(即纵轴上方的半圆),低频区与横轴的交点即为极化电阻 R_p,

$$R_p = |Z(j\omega)|_{\omega \rightarrow 0} - |Z(j\omega)|_{\omega \rightarrow \infty} \quad (4)$$

高频区与横轴的交点为溶液电阻 R₀。当溶液中加入不同浓度的铜离子后,其阻抗图发生明显的改变,且两种硅片在低频区的阻抗响应非常相似,低频区向左移动,电容环缩小,同时在低频处出现特征电感环(即纵轴下端出现的半圆)。这种现象随着铜在溶液中的浓度增加而变得更为显著,表明铜已不同程度地沉积在硅片表面上。此时, R_p 不能直接从图中得到,而需根据下式及图3等效电路中的参数求得^[5],

$$R_p = \frac{R_t R_L}{R_L + R_t} \quad (5)$$

HF 溶液中铜离子浓度的增加导致硅表面电化学反应速度加快的主要原因是:铜在硅片表面的沉积,加速了氢气在硅上的析出,加速了硅的腐蚀速度。研究表明,反应(3)虽与反应(2)形成竞争,可能同时存

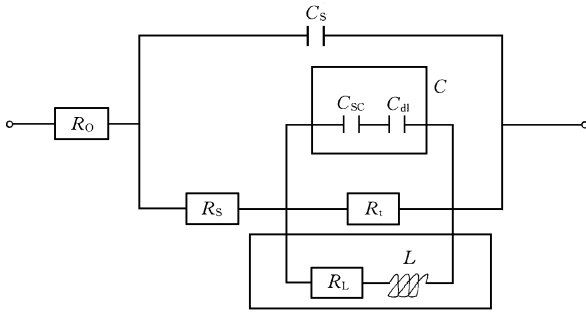


图3 硅/溶液界面的等效电路图

FIG 3 Equivalent Circuit of Silicon/Solution Interface

氧化反应进行得很慢 随着空穴的不断耗尽, 硅的溶解速度也逐渐减小, 直到硅表面的空穴全部消耗为止 图1(b)的结果证实了这种分析, 阳极极化曲线基本没有 Tafel 区域, 且出现饱和电流密度(受铜污染时尤为明显).

在, 但反应(3)并非主要的阴极反应 实际上, 肉眼观察到硅电极表面上有气泡逸出, 而场扫描电镜也证明硅片上有铜晶粒存在 铜在硅片表面的沉积, 造成硅表面的光滑度和均匀性也急剧下降

用 p(100) 和 n(100) 硅片电极在黑暗条件下得到的交流阻抗图见图4, 通过模拟计算得到的各参数列于表2中. 由于 n 型半导体以电子为主要载流子, 空穴为少数载流子, 而根据反应式(1)可知, 硅的溶解反应需要消耗硅表面的空穴 在黑暗条件下, 硅片表面的空穴数量很少. 因而, 硅的阳极

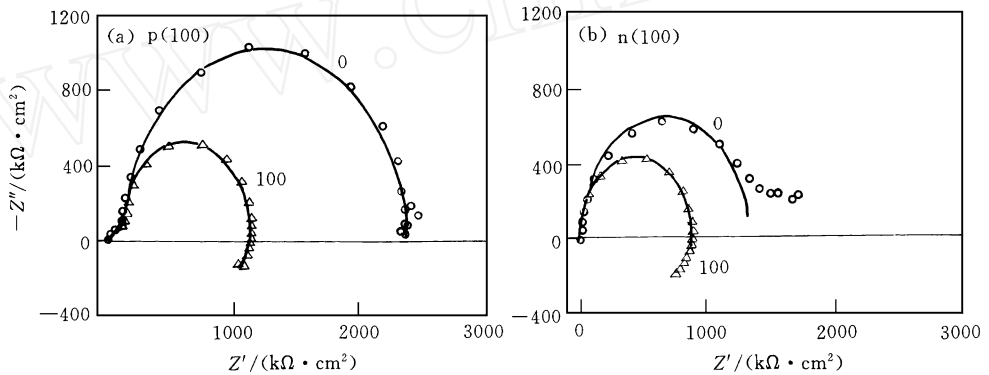


图4 黑暗条件下分别用 p 型和 n 型硅片在洁净(0ppb)和含铜(100ppb) 0.5M 氢氟酸溶液中得到的交流阻抗图

FIG 4 Typical AC Impedance Results Obtained Under Dark

(a) p-Type Si; (b) n-Type Si

表2 通过图3等效电路模拟图4的结果计算得到的参数

Table 2 Parameters Calculated by Simulating Results in Fig 4 Using Equivalent Circuit Shown in Fig 3

Silicon	p(100)		n(100)	
[Cu ⁺⁺]/ppb	0	100	0	100
R ₀ /(kΩ·cm ²)	0.21	0.26	0.15	0.16
R _s /(kΩ·cm ²)	107	106	7.7	-
C _s /(nF·cm ⁻²)	0.93	0.98	0.66	-
R _t /(kΩ·cm ²)	2200	1030	1300	870
C _{dl} /(nF·cm ⁻²)	10.6	10.5	180	25
R _L /(kΩ·cm ²)	-	2700	-	1100
L/(kH·cm ²)	-	75000	-	36000
R _p /(kΩ·cm ²)	2200	750	1300	480

当溶液受到铜污染时, 高电位区的阴极反应没有象图1那样出现限制电流密度, 表明铜在黑暗条件下的沉积比光照时的沉积要缓慢。这与图4的交流阻抗实验结果一致, 无光照条件下的 R_p 值很大。有铜存在时, 阻抗图发生明显变化, 横轴下端出现电感环, R_p 值有所减小, 但仍维持在几万欧姆范围。 R_p 值很大反映出硅/溶液界面的电化学反应速度很慢。在纯净 HF 溶液中测得硅片的电容值接近硅耗尽区域的空间电荷电容 (C_{sc}) 值范围^[6], 可以推断此时硅处于消耗期, 因而硅的半导体性质应占主导作用。

图5是有光照条件下 HF 溶液中添加10ppb 铜时, 两种硅片在沉积时间分别为60s 和600s 时得到的交流阻抗图。由图可知, 当沉积时间从60s 增加到600s 时, n 型硅的阻抗响应基本没有受到影响, 但 p 型硅的阻抗响应却在高频区出现另一个电容环 (由参数 R_s 和 C_s 决定), 然而其低频区的特征电感环的大小和形状却基本保持不变。可见沉积时间的增加, 仅提高了 p 型硅片的接触电阻和接触电容, 并没有影响铜沉积行为。图5的结果进一步表明, 无论是 p 型硅片还是 n 型硅片, 铜在硅片表面的沉积基本发生在前60s。

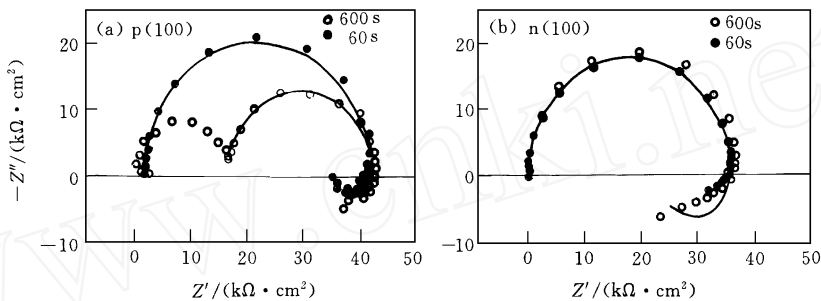


图5 光照条件下不同硅片对应于不同铜沉积时间的交流阻抗图

(a) p 型硅片; (b) n 型硅片。

FIG. 5 AC Impedance Results Obtained at Different Depositing Time Under Illumination

(a) p-Type Si; (b) n-Type Si

3.2 p-n 接点的电偶行为

在制造超大规模集成电路时, p 型硅和 n 型硅通常一起使用, 构成所谓的 p-n 接点。这种接触在溶液中构成电偶, 在 p-n 界面产生微区电化学作用, 影响电子元器件的性能。根据本文对 p(100) 和 n(100) 硅片单个电极在 HF 溶液中的电化学特性研究, 并考虑到光照和溶液化学组分的影响, 这里将对 p-n 接点电偶行为的特点进行初步讨论。由图1(a)的极化曲线可知, 光照对半导体硅片的极化行为影响极大。无论是洁净还是铜污染溶液, 有光照时 p 型的极化曲线总是高于 n 型的极化曲线, 这意味着如果它们形成 p-n 接点 (即图中对应 p 型和 n 型极化曲线的交点“p-n”), 就会形成电化学电偶, p 型硅片将成为阳极, n 型硅片则为阴极, 其界面将有电子 (或空穴) 得失, 从而发生电化学反应, 使得 p 型硅片表面发生氧化溶解, n 型硅片表面发生氢阴极还原, 最终导致 p 型硅片的剧烈腐蚀, 而 n 型硅片表面却几乎不受影响。显然, 在有微量铜污染溶液中, 光照导致 p-n 接点的电流密度要比在洁净溶液中的高近两个数量级, 而 p-n 接点的电位则要比在洁净溶液中的上移了将近100mV。无光照时 (图1(b)), 两种溶液中 p-n 接点的电流密度几乎没有发生变化, 只是有铜污染溶液中的 p-n 接点电位上移了近100mV。洁净溶液中 n 型硅片的极化曲线却高于 p 型硅片的极化曲线, 与有光照时观察到的现象正好相反。这时, n 型成为阳极, 而 p 型成为阴极。也就是说, n 型硅片要比 p 型硅片腐蚀得厉害。以上分析说明, 光照会加剧半导体硅片 p-n 接点间的电化学相互作用, 特别是当溶液中含有100ppb 铜时, p-n 接点间的反应速度显著增大 (p-n 接点的电流密度与反应速度成正比)。

3.3 硅片表面铜沉积的检测

图6比较了由交流阻抗法分别得到的 p 型和 n 型硅片的极化电阻 R_p 和 HF 溶液中铜离子浓度的关系。

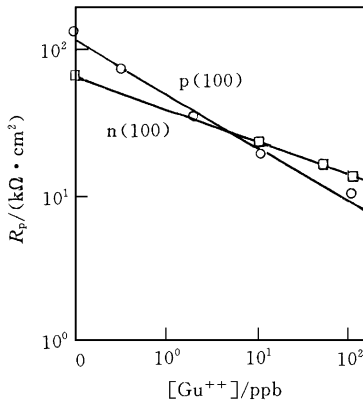


图6 光照条件下硅片的极化电阻(R_p)和溶液中铜离子浓度($[Cu^{++}]$)之间的关系

FIG. 6 Polarization Resistance (R_p) of Silicon as a Function of Copper Concentration ($[Cu^{++}]$) in Solutions Under Illuminated Condition

重。在黑暗条件下, p 型硅将成为阳极, 而 n 型硅则成为阴极, 加剧 p 型硅的刻蚀, 而 n 型硅几乎不被刻蚀。溶液中含有微量铜时, p-n 接点的电流密度急剧增加, 两种硅片之间的电化作用增强, 反应速度加剧。当溶液中有微量铜存在时, 无论有无光照, 都会不同程度地加快硅片的溶解反应速度。随着溶液中铜离子浓度的增加, 反应速度也加快, 导致硅片表面微观粗糙度的增加和铜在硅片表面的沉积, 造成金属污染。

本研究还表明, 铜在硅表面的沉积为电化学属性, 电化学交流阻抗技术可能成为检测硅片表面微量铜污染的有效手段。硅片表面发生铜沉积时阻抗图上出现特征电感环和压缩的电容环, 导致 R_p 显著降低。

随着 HF 溶液中铜离子浓度的增加, R_p 值迅速降低, 表明铜在硅其表面的沉积速度随着溶液中铜污染的程度增加而不断加快, 再次证实铜在硅表面的沉积是电化学属性。另外, 图2和图6的结果还说明, 交流阻抗法对检测 HF 溶液中含有的微量铜(ppb 浓度水平)很敏感。只要溶液中含有 ppb 浓度水平的铜离子, 洁净硅片表面很快就会被微量铜污染, 阻抗图上出现特征电感环, R_p 急剧降低, 并随着溶液中铜含量的增加而减小, 加速硅/溶液界面的电化学反应, 其表面微洁净度和微粗糙度将迅速恶化。

4 结论

采用电化学直流极化和交流阻抗技术, 分别研究了 p(100) 和 n(100) 硅片在洁净和有铜污染 HF 溶液中的电化特性。研究表明, 有光照条件下, 硅片在 HF 溶液中发生溶解反应, 其表面性质主要受到硅/溶液界面的电化学反应的影响; 黑暗条件下, 硅片则处于消耗期, R_p 值变得很大, 固体物理和半导体性质占主导作用, 界面的电化学反应可以忽略。上述结果可直接用以分析 p-n 接点在 HF 溶液中形成的电偶行为。有光照时, p 型硅将成为阴极, 而 n 型硅将成为阳极, n 型硅的刻蚀比 p 型硅的严重。

参 考 文 献

- [1] H. Morinaga, M. Suyama, M. Nose *et al.*, *IECE Trans Electron.*, 1996, **E79-C**: 343—362
- [2] L. Mouche, F. Tardif, J. Derrien, *J. Electrochem. Soc.*, 1995, **142**(12): 2395—2401.
- [3] G. Li, E. A. Kneer, B. Vemeire *et al.*, *J. Electrochem. Soc.*, 1998, **145**(1): 241—246
- [4] L. Torcheux, A. Mayeux and M. Chemla, *J. Electrochem. Soc.*, 1995, **142**(6): 2037—2046
- [5] J. R. Macdonald, *Impedance Spectroscopy, Emphasizing Solid Materials and Systems*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1987.
- [6] D. D. Macdonald, *J. Electrochem. Soc.*, 1978, **125**(12): 2062—2066