

# 经 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{SiO}_x$ 钝化的多孔硅及 其光致发光特性<sup>\*</sup>

刘小兵<sup>1</sup> 熊祖洪 史向华<sup>1</sup> 袁 帅 廖良生<sup>\* \*</sup>

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室 上海 200433)  
(1 长沙电力学院物理系 长沙 410077)

**摘要** 在一定偏压下用  $\text{AlCl}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$  混合液对多孔硅进行了后处理。经过处理的多孔硅与未经处理的多孔硅相比, 其发光强且稳定。通过对样品进行红外吸收谱的测试和分析, 指出在后处理样品表面形成的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{SiO}_x$  结构是多孔硅发光增强和稳定性得到提高的原因。

**关键词:** 多孔硅, 光致发光, 钝化,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_x$

**PACC:** 7830, 7855, 8104, 8160, 8265

**文章编号:** 0253-4177(2000)01-0038-06

## Surface Passivation of Porous Silicon by $\text{SiO}_x$ and $\text{Al}_2\text{O}_3$ Films<sup>\*</sup>

LIU Xiao-bing<sup>1</sup>, XIONG Zu-hong, SHI Xiang-hua<sup>1</sup>, YUAN Shuai and LIAO Liang-sheng

(Surface Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433, China)  
(1 Physics Department, Changsha Electric Power University, Changsha 410077, China)

Received 13 October 1998, revised manuscript received 8 January 1999

**Abstract** Bright and stable photoluminescence from porous silicon samples immersed in  $\text{AlCl}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$  solution under a certain bias voltage has been obtained. FTIR spectra show that the enhancement and stabilization of the photoluminescence from the treated porous silicon are due to the formation of  $\text{SiO}_x$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films on the treated sample surfaces.

**Key Words:** Porous Silicon, PL, Passivation,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_x$

**PACC:** 7830; 7855, 8140, 8160, 8265

**Article ID:** 0253-4177(2000)01-0038-06

\* 国家自然科学基金(19525410)资助项目(Project Supported by National Natural Science Foundation of China under Grant No. 19525410).

\* \* 本文现在通讯联系人

刘小兵 男, 1949 年生, 副教授, 主要从事固体物理教学研究。

熊祖洪 男, 1970 年生, 博士生, 主要从事凝聚态物理研究。

1998-10-13 收到, 1999-01-08 定稿

## 1 引言

近几年来多孔硅(PS)在发光机理和应用研究两个方面取得了令人瞩目的进展<sup>[1]</sup>。人们在研究中发现, 多孔硅在全硅光电子集成中有着潜在的应用前景。1956年美国贝尔实验室的 Uhlig<sup>[2]</sup>报道了多孔硅后, 人们曾利用其高阻特性作为一种隔离介质做成 SOI 结构, 应用于硅集成电路中, 但当时多孔硅并未引起人们的高度重视。1990 年英国的 Canham 报道了多孔硅在室温下高效率的光致发光以后<sup>[3]</sup>, 人们对多孔硅的发光起因进行了广泛深入的研究, 结果表明多孔硅可能弥补硅材料不能有效发光的缺点, 从而有可能实现全硅光电子集成。人们在探讨多孔硅高效可见光发射机理<sup>[4,5]</sup>的同时, 也开展了研制有效的多孔硅电致发光器件<sup>[6,7]</sup>和通过离子注入硅单晶来控制形成多孔硅发光图形的工作<sup>[8]</sup>。1996年底, Hirschman 等人<sup>[9]</sup>报道了将多孔硅发光器件集成在硅基电子器件上的研究进展, 给多孔硅的研究又注入了新的活力。但是要使多孔硅投入实际应用, 目前尚有许多工作要做, 其中最重要的一点是如何解决多孔硅发光的不稳定性<sup>[10]</sup>。本文在我们以往通过后处理改善多孔硅发光特性研究的基础上<sup>[11,12]</sup>, 尝试采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{SiO}_x$  ( $x \leq 2$ ) 共同钝化多孔硅的方法对其进行表面后处理, 获得了光致发光(PL)强且稳定性好的效果。另外, 本文还研究了多孔硅经后处理的温度特性, 进而讨论了后处理对多孔硅的作用机制。

## 2 实验

多孔硅样品用常规方法制备, 电阻率为  $5 \sim 8.5 \Omega \cdot \text{cm}$ 、晶向为  $\langle 100 \rangle$ 、单面抛光的 P 型单晶硅片, 经清洗后在背面蒸镀一层铝膜以形成良好的欧姆接触。阳极氧化是在室温和无光照条件下进行的。以铂片为阴极, 所用腐蚀液为  $\text{HF}(> 40\%) : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1 : 1$  的溶液, 腐蚀电流密度为  $10 \text{mA/cm}^2$ , 通电 10min。新制备的多孔硅在紫外灯照射下发红橙光。

对多孔硅进行钝化处理的溶液为: 氯化铝( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )、无水乙醇( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )和去离子水( $\text{H}_2\text{O}$ )的混合溶液, 加入少许硝酸钴( $\text{Co}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )做为催化剂, 具体配比(体积比)为  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) : (\text{H}_2\text{O}) : (\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) : (\text{Co}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) = 60 : 30 : 9 : 1$ 。将混合溶液倒入制备多孔硅用的腐蚀槽中, 以硅衬底为负极加电压 18V, 可以观察到多孔硅表面有气泡产生。在同一条件下用该混合溶液对多孔硅分别进行 0.5、1、2h 的电化学后处理。热退火处理是在 KST-2 型快速退火炉中进行的, 退火时通入流量为  $3\text{L/min}$  的  $\text{N}_2$  气, 以提高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的致密性。经过处理的多孔硅在紫外灯辐照下发光强度都有不同程度的增强, 其中处理 2h 的样品发光亮度提高最明显。实验表明, 继续增加后处理时间会使多孔硅层脱落, 因此后处理时间以 1~2h 为宜。

我们对多孔硅和经过后处理的一系列样品进行了 PL 谱和傅里叶变换红外吸收(FTIR)谱的测量。PL 谱测量是用 He-Cd 激光器的 441.6nm 激光线激发的。激光功率为  $25\text{mW}$ , 光斑直径约为  $1\text{mm}$ 。样品发出的光经光栅单色仪分光后, 由硅探测器接受, 信号经锁相放大器放大后, 由电子计算机记录和处理。FTIR 谱的测量使用的是 FT-IRSDX 型红外光谱仪, 它的分辨率为  $4\text{cm}^{-1}$ , 波数为  $400 \sim 4000\text{cm}^{-1}$ 。

## 3 实验结果

### 3.1 PL 谱

图 1 是未经处理的多孔硅与分别经过 2、1、0.5h 钝化后处理的多孔硅样品的 PL 谱, 将它们依次编号为 (a)、(b)、(c)、(d)。将(b)、(c)、(d)与(a)相比, 可以看出经过钝化处理的样品, 其 PL 强度均有一定程度的提高, 其中经过 2h 钝化处理的样品(d)的发光强度提高最为显著, 约为未经处理 PS 样品(a)的 4 倍; 而且, 实验中没有观察到处理后样品的 PL 相对于未经处理的多孔硅有明显的峰位移动。

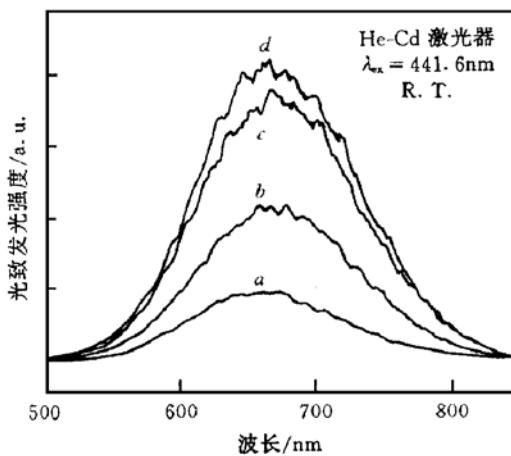


图 1 样品经钝化处理前后的 PL 谱  
曲线 a 对应未经钝化处理的 PS 样品;  
曲线 b、c、d 分别对应经钝化处理 2、1、0.5h 的 PS 样品.

FIG. 1 PL Spectra of Sample Before and  
After Passivation

Curve a for PS Sample Before Passivation,  
Curve b, c, d for PS Samples After 2, 1, 0.5h  
Passivation respectively

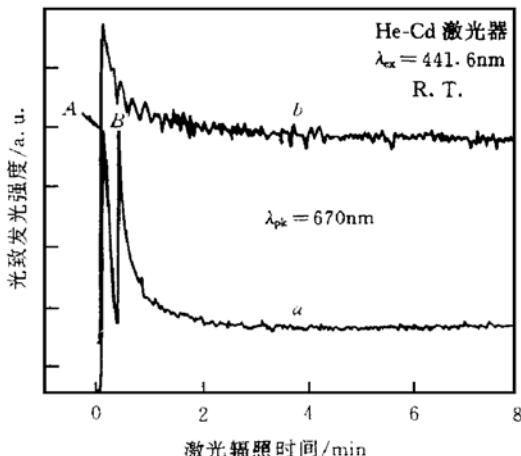


图 2 样品的 PL 谱随激光辐照时间的变化  
曲线 a 为未经钝化处理的 PS 样品;  
曲线 b 经过钝化处理 2h 的 PS 样品.

FIG. 2 PL Intensity of Sample versus  
Rediation Time

Curve a without Passivation  
Curve b with Passivation

### 3.2 PL 随激光辐照时间的变化谱

为了分析研究钝化处理的效果, 我们测量了多孔硅样品经钝化处理前后随激光照射时间变化的 PL 谱. 如图 2 所示, 样品(a)和样品(b)由同一块新制备好的多孔硅分割而成, 而样品(b)经过了 2h 的钝化处理. 测量该连续谱时, 单色仪的位置放在样品分立 PL 谱峰值波长处附近(即  $\lambda_{pk} = 670\text{nm}$ ). 为了检验作为参考样品(a)的发光均匀性(在讨论处理后样品 PL 的变化时有一个更好的参考标准), 在激光打在样品上和 PL 谱仪的记录系统进行计数的同时, 通过移动样品台使激光光斑打在样品上不同的位置 A、B 处, 就得到图 2 的曲线 a. 测量结果表明, 本文制作的多孔硅表面平整, 结构比较均匀, 所以在同一样品上不同点的 PL 几乎没有差别, 如图 2 中曲线 a 的 A、B 两点所示. 由图 2 可以看出, 经钝化后处理的多孔硅样品(b)与未经钝化的多孔硅样品(a)相比, 其在激光辐照下

发光基本稳定, 发光强度衰减很小. 而未经处理的 PS 样品(a)则由于 SiH 在激光照射下不稳定, 容易断键从而形成非辐射复合中心, 使其 PL 衰减很大, 如曲线 a 所示. 这说明本文后处理能使 PS 的发光稳定.

### 3.3 FTIR 谱

图 3 是未经处理的多孔硅样品(a)与经过在一定电压下  $\text{AlCl}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$  溶液处理 2h 的多孔硅样品(b)的 FTIR 谱. 采用透射法测量, 扫描次数为 300 次, 测量的波数范围是  $400\sim 4000\text{cm}^{-1}$ . 样品(a)在所测量的波

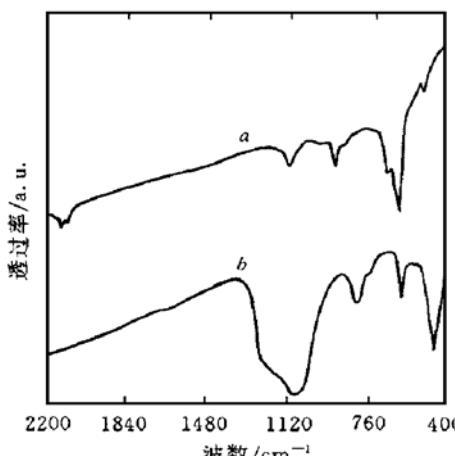


图 3 PS 样品经钝化处理前后的 FTIR 谱  
曲线 a 对应未经钝化处理 PS 样品;  
曲线 b 对应经过钝化处理 2h 的样品.

FIG. 3 FTIR Spectra of PS Sample Before  
and After Passivation

Curve a PS Sample without Passivation  
Curve b PS Sample with Passivation

FTIR 谱. 采用透射法测量, 扫描次数为 300 次, 测量的波数范围是  $400\sim 4000\text{cm}^{-1}$ . 样品(a)在所测量的波

数范围内观察到了七个红外吸收峰, 其中六个峰与 H 有关, 表明刚制备好的多孔硅其表面是被 H 饱和的<sup>[13]</sup>。文献[14]指出 Si—O—Si 中的伸张振动的频率范围是  $900\sim 1100\text{cm}^{-1}$ , 伸张带与  $\text{SiO}_x(x \leq 2)$  中的成分有线性关系, 从  $\alpha$ -Si 的低氧浓度的  $940\text{cm}^{-1}$  到化学配比  $\text{SiO}_2$  的  $1075\text{cm}^{-1}$ 。比较图 3 的曲线 b 与 a 可知, PS 经过钝化处理, 不仅在  $900\sim 1100\text{cm}^{-1}$  范围内出现了  $\text{SiO}_x$  的吸收峰, 而且还在  $445\text{cm}^{-1}$  处出现了一个很强的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的吸收峰<sup>[14]</sup>, 这表明后处理在多孔硅层中形成了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_x$  的化学成分。从处理后样品的发光强度有明显的增强(如图 1 的曲线 b、c、d)且发光稳定性高(如图 2 的曲线 b)的变化特征来看,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_x$  对多孔硅具有钝化作用。在  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  如何具体改善多孔硅发光强度和稳定性的机制方面仍需进一步的实验和理论研究。

### 3.4 温度特性实验

为了促进后处理在多孔硅层上形成的薄膜进一步氧化和看其对温度的敏感性, 我们对样品进行了快速热退火处理。退火处理时通入流量为  $3\text{L}/\text{min}$  的  $\text{N}_2$  气, 退火时间 60s。图 4 是 PS 样品经 2h  $\text{AlCl}_3$  溶液电化学处理后再进行热退火处理的 PL 随温度的变化曲线, 其中曲线 a~f 对应的退火温度分别为: R. T.、100°C、200°C、300°C、400°C、500°C。测量结果表明, 当温度从室温升到 200°C 时, 退火处理后样品的 PL 强度进一步提高, 温度继续增加, PL 强度才逐渐减少直到淬灭; 温度在 400°C 以下, 实验中没有观察到明显的峰位移动。值得注意的是, 即使温度升到了 400°C, 经过后处理样品的 PL 强度几乎还可以与未经处理 PS 的 PL 相比。

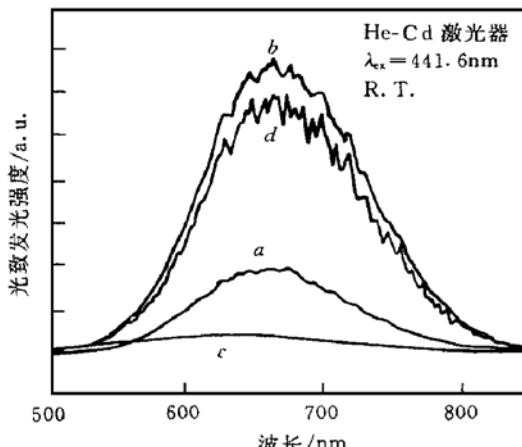


图 5 样品存在 40d 前后的 PL 谱

曲线 a 新制备的 PS 样品(a);

曲线 b 经  $\text{AlCl}_3$  溶液电化学处理 2h 后的 PS 样品(b);

曲线 c 样品(a)存放了 40d;

曲线 d 样品(b)存放了 40d。

FIG. 5 Time Evolution of PL Spectra

Curve a As Etched, Curve b with Electrochemical Treatment for 2h, Curve c as Sample (a) After Storage 40 Days, Curve d Sample (b) After Storage for 40 Days

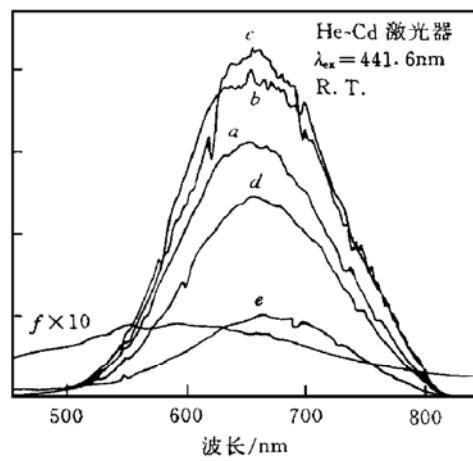


图 4 PS 样品经 2h  $\text{AlCl}_3$  溶液电化学处理后再经 60s、100~500°C 快速热退火后的 PL 谱随温度的变化

曲线 a~f 对应的退火温度分别为: R. T.、100°C、200°C、300°C、400°C、500°C。

FIG. 4 PL Intensity versus Annealing Temperature

因此, 这对以后 PS 的实际器件应用也是行之有效的;而且由样品的温度特性可知, 对于未经处理的 PS 样品(a), 当在一定电压下用  $\text{AlCl}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$  溶液处理 2h 后再经 200°C、60s 的退火处理效果更佳, 多次重复实验所得结果一致。

### 3.5 发光稳定性实验

图 5 是样品(a)和经 2 小时  $\text{AlCl}_3$  溶液电化学处理后的样品(b)在大气环境中存放 40d 前后的 PL 谱。为了使测量结果有可比性, 测量时采用了与图 1 中 PL 谱测量时相同的条件, 即相同的激光功率( $25\text{mW}$ )和相同的光路。曲线 a 为未经处理多孔硅样品(a)的 PL 谱, 曲线 b 为经 2h  $\text{AlCl}_3$  溶液电化学处理后的多孔硅样品(b)的 PL 谱, 曲线 c 为样品(a)在大气环境下存放 40 天的 PL 谱, 曲线 d 为样品(b)在大气环境下存放 40d

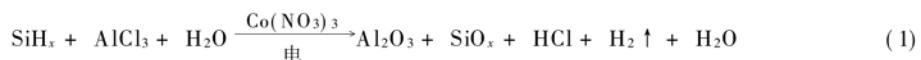
的 PL 谱. 由图 4 可以看到, 原样腐蚀的多孔硅在空气中存放, 其 PL 谱强度衰减很明显(> 80%); 而经过 AlCl<sub>3</sub> 处理的样品, 其 PL 谱强度衰减很小(< 12%). 说明本文这种后处理方法生成的 SiO<sub>x</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 钝化膜对自然光和大气中的氧气、水汽是较稳定的.

## 4 讨论

为了提高多孔硅的发光强度及其稳定性, 人们对制备好的多孔硅进行了各种后处理, 从而使多孔硅的发光特性得到了不同程度的改善<sup>[11, 12, 15]</sup>. 迄今为止的半导体薄膜介质工艺中, 研究较为深入、应用较为广泛的是 SiO<sub>2</sub>、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三种无机化合物钝化膜, 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜颇受人们重视<sup>[16, 17]</sup>, 实验与研究表明 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是一种较为理想的钝化膜. 在研究多孔硅的微结构时发现, 一类多孔硅的微结构类似于单晶硅, 一类与微晶硅相近; 如果设想多孔硅在一定程度上保留了单晶硅的特性, 则可以把半导体工艺中的钝化技术应用于多孔硅的后处理, 对多孔硅的各种氧化处理<sup>[11, 15]</sup>以及氮钝化<sup>[18]</sup>就是在此基础上发展起来的. SiO<sub>2</sub> 的缺点是抗辐射能力不强, 抗离子沾污, 特别是抗 Na<sup>+</sup> 离子能力差, 但其主要优点是界面态密度少. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的抗辐射和抗 Na<sup>+</sup> 离子能力都很好, 但沉积温度比较高, 必须在 900℃ 左右, 因此在应用上受到一定限制. 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜由于其特殊结构, 使其具有比 SiO<sub>2</sub> 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 更高的抗辐射能力和更强的阻挡 Na<sup>+</sup> 离子侵蚀的能力; 此外, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜还具有较好的机械强度. 由图 3 处理前后样品的 FTIR 谱可知, 本文后处理在多孔硅层中形成了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>x</sub> 两种化学成分. 因此, 在后处理多孔硅中, SiO<sub>x</sub> 既可以饱和由于氢脱附而在界面形成的悬挂键, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 又可以保护 SiO<sub>x</sub>, 还能加强多孔硅机械强度来阻止纳米硅柱和纳米硅粒脱落和塌陷, 提高多孔硅的机械稳定性. 这两种钝化膜的界面态密度少、抗辐射和抗离子侵蚀强以及有好的机械强度等综合作用使经过后处理的 PS 样品的 PL 强且稳定. 实验结果(如图 1、图 2、图 4 和图 5 所示)也表明 SiO<sub>x</sub> 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的确能对多孔硅进行优质钝化. 就我们所知, 国内外还未见到采用类似方法对多孔硅进行钝化后处理的报道.

钝化前后样品发光峰位变化很小(如图 1), 高斯拟合 a、b、c 和 d 四条曲线得峰位分别为 663.81、672.93、674.05 和 672.08 nm, 即钝化前后峰位只有 10 nm 的移动. 相对于约 140 nm 的半峰宽而言, 变化很小. 最近, 中国科技大学的 Zhang<sup>[19]</sup> 发表了一篇用 Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 溶液对 PS 进行钝化处理的文章, 钝化处理前后的 PL, 和存放实验以及温度效应的 PL 结果(量子限制效应能很好解释)与本文的结果非常类似: 处理后的 PL 强度相对于处理前有几倍的增加; PL 温度效应是先增加、后降低、最后淬灭(Zhang 的温度只加到 250℃, 所以看不到淬灭); 处理前后以及处理后样品的存放实验和温度效应的 PL 峰位都没有明显移动, 这是由于 Si—O 与 Fe 或 Si—O 与 Al 等硅—氧—金属原子键不同于 Si—O 键所致. 金属原子 Fe、Al 既可以饱和 PS 内表面 Si 原子的悬挂键, 而且其氧化物 α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 还可以在 PS 外表面作为氧化涂层阻止 PS 颗粒的进一步氧化, 使处理后 PS 颗粒的尺寸相对于处理前变化很小, 在 PL 谱图上表现为处理前后样品的 PL 峰移很小. 值得重视的是: 这种使 PS 发光峰位在钝化前后没有什么变化的后处理方法对 PS 的潜在应用是很有意义的. 因为这种后处理除了增强 PS 发光强度和稳定性外, 对 PS 较脆弱的物理结构还起到了加固的作用. 这也正是具有高抗辐射能力和大机械强度的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 钝化膜作用的体现<sup>[16, 17]</sup>.

将多孔硅在(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH):(H<sub>2</sub>O):(AlCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O)=60:30:10 溶液中进行钝化时, 还加了少许 Co(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 作为催化剂. 溶液与多孔硅之间的相互作用是一个复杂的过程, 一个可能的化学反应过程是:



钝化后的多孔硅样品的俄歇电子能谱(AES)表明, O 与 Al 确已存在于多孔硅层中, 但由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 SiO<sub>x</sub> 不导电, 容易造成电荷积累, AES 测量给出的只是定性结果; 而 FTIR 谱测量的结果表明多孔硅层中确已形成了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>x</sub> 钝化膜. PL 谱结果表明, 经过 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>x</sub> 钝化的多孔硅的 PL 峰值强度约为未经处理的多孔硅样品的 4 倍; 在 N<sub>2</sub> 气氛中进行 200℃ 快速热退火 60 s 后, 发光强度则进一步提高; 而 PL 强度随激

光照射时间的变化曲线则表明经  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_x$  钝化后的多孔硅其发光稳定性明显提高; 在大气中存放 40d 后的 PL 谱测量进一步表明钝化后的多孔硅发光稳定性较好, 存放 40d 后衰减较小, 而未经钝化的多孔硅其发光强度有很大降低。虽然  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_x$  钝化膜在多孔硅层中的作用机制尚有待于进一步研究, 但它们是对多孔硅钝化处理的优质钝化膜则是肯定的, 因为它们提高了多孔硅的发光强度和稳定性。

## 5 结论

多孔硅在一定偏压下经过  $\text{AlCl}_3$  处理后可提高其发光强度和发光稳定性。在钝化过程中形成的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_x$  膜有可能起到饱和多孔硅由于 H 脱附而形成的悬挂键, 减少表面缺陷, 增加辐射复合中心, 增强抗辐射和抗离子侵蚀以及提高机械强度等的作用。因此, 它是对多孔硅进行后处理的优质钝化膜, 这对多孔硅的实际应用也是很有意义的。

## 参 考 文 献

- [1] A. G. Cullis, L. T. Canham and P. D. J. Calcott, *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**: 909~ 965.
- [2] A. Uhlig, *Bell Syst. Tech. J.*, 1956, **35**: 333~ 335.
- [3] L. T. Canham, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**: 1046~ 1048.
- [4] A. G. Cullis and L. T. Canham, *Nature*, 1991, **353**: 335~ 338.
- [5] M. S. Brandt, H. D. Fuchs, M. Stutzmann *et al.*, *Solid State Commun.*, 1992, **81**: 307~ 312.
- [6] A. Richter, P. Steiner, F. Kozlowski *et al.*, *IEEE Electron Device Lett.*, 1991, **12**: 691~ 692.
- [7] A. Loni, A. J. Simons, T. I. Cox *et al.*, *Electron. Lett.*, 1995, **31**: 1288~ 1289.
- [8] X. M. Bao and H. Q. Yang, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**: 2246~ 2247.
- [9] K. D. Hirschman, L. Tsysheskov, S. P. Duttagupta and P. M. Fauchet, *Nature*, 1996, **384**: 338~ 341.
- [10] Reuben T. Collins, Philippe M. Fauche and Michael A. Tischler, *Physics Today*, 1997, **50**: 24~ 31.
- [11] Huajie Chen, Xiaoyuan Hou, Gubo Li *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**: 3282~ 3285.
- [12] 熊祖洪, 刘小兵, 廖良生, 等, *半导体学报*, 1998, **19**: 458~ 462[Xiong Zuhong, Liu Xiaobing, Liao Liangsheng *et al.*, *Chinese Journal of Semiconductors*, 1998, **19**: 458~ 462(in Chinese)].
- [13] G. Lucovsky, P. D. Richard, D. V. Tsu *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1986, **A4**: 681~ 687.
- [14] Sadtler Commercial Spectra IR Grating INORGANICS, U. K.: SADTLEK Research Laboratories, Inc., 1965, Vol. 1: 175~ 176.
- [15] V. Petrova-Koch, T. Muschik, A. Kux *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**: 943~ 945.
- [16] 梁鹿亭, 等, *半导体器件表面钝化技术*, 北京: 科学出版社, 1979, 467~ 469[Liang Luting *et al.*, *Surface Passivation Technology for Semiconductor Devices* (Science Press, Beijing 1979), p. 467~ 469(in Chinese)].
- [17] 管绍茂, 王迅, *半导体表面钝化技术及应用*, 北京: 国防工业出版社, 1981, 107~ 130[Guan Shaomao, Wang Xun, *Surface Passivation Technology and Its Application for Semiconductor Device* (National Defence Industry Press, Beijing 1981), p. 107~ 130(in Chinese)].
- [18] Gubo Li, Xiaoyuan Hou, Huajie Chen *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1996, **80**: 1~ 4.
- [19] Yu Heng Zhang, Xin Jian Li, Let Zhang and Qian Wang Chen, *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**: 1710~ 1713.