

红外区熔再结晶 SOI 中形貌缺陷的 产生与抑制*

张鹏飞 侯东彦 杨景铭 钱佩信

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

罗台秦

(香港科技大学 香港)

摘要 本文在研究多晶薄膜熔化前沿推进行为的基础上,指出 SOI 晶膜形貌缺陷的产生与固液界面的温度梯度有密切关系,从而提出了一种通过减小石墨条与样品间距以抑制缺陷产生的措施。

EEACC: 0520

采用高频感应石墨作为红外热源^[1], 可以实现二氧化硅绝缘衬底上多晶硅薄膜的区熔再结晶,正是由于较薄(500nm 以下)的多晶薄膜在区熔过程中表现出许多特殊性,从而使再结晶得到的 SOI 晶膜容易出现诸如空洞,收球和表面起伏等形貌缺陷,本文在分析其原因的基础上,提出一种抑制上述缺陷产生的措施。

1 “爆炸式”熔化现象

研究表明^[2], 多晶硅薄膜的熔化过程并不能简单地看作是由炽热石墨条产生的条状熔区连续而匀速地扫过整个硅片的过程,实际上随着石墨条均匀地扫描,硅膜的熔化前沿却以迸发式、波浪式的特殊方式向前推移,称之为“爆炸式”熔化,整个过程可以分为三个阶段。

第一阶段是部分熔化过程。在多晶薄膜中各晶粒大小不同,因而有不同数值的自由能,晶粒间自由能的差可表示为:

$$\Delta G = \Delta G_{\text{Si-SiO}_2} + \Delta G_{\text{GB}}, \quad (1)$$

式中第一项代表晶粒与 SiO₂ 隔离层、覆盖层的界面能,第二项是晶粒间界形成的表面能。这就决定了各晶粒具有不同的熔化温度,因此熔化前沿推进的起始状态是已熔液态硅为高熔点晶粒所包围,随着石墨条的扫描,熔化前沿的前方一定距离范围内,低熔点的晶粒开始熔化,而高熔点晶粒保持固态,从而在熔化前沿形成一个固液共存区。

第二阶段是重新固化过程。在第一阶段形成的固液共存区中已熔硅处于过冷状态,主要因为得不到强的辐射加热而其反射率又由于熔化而大大提高,所以倾向于以未熔晶粒为结晶核,重新固化,这样就使得固液共存区前沿向扫描方向相反的方向推移,因而形

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题
1993 年 3 月 11 日收到初稿, 1993 年 6 月 2 日收到修改稿

成一种波浪式效果。

第三阶段是完全熔化过程。随着石墨条的扫描,辐射能流峰值向前推移,使得该区完全熔化,而在更远的地方产生新的“爆炸式”熔化。

2 形貌缺陷的产生

长期以来,人们多致力于固化前沿的研究,认为结晶质量完全取决于固化过程,熔化前沿无论有何种变化都会因熔区的扫过而彻底消除,不会对最后结晶的结果造成影响,从而忽略了对熔化情况的研究。而实际上在多晶薄膜熔化这一特殊情况下,特别是由于一个较厚的(1000nm 以上) SiO_2 覆盖层的存在,使得熔化前沿的情况对于 SOI 晶体质量,具有很重要的影响。

首先在“爆炸式”熔化的第一阶段,低熔点晶粒熔化并出现体积收缩,而 SiO_2 覆盖层在未熔晶粒的支撑下维持原来空间的大小不变,所形成的微小空隙倾向于集聚成较大体积以减小表面能,当增大到某一临界值时,就会出现上层覆盖层的坍塌,这样即使熔区扫过,由于 SiO_2 膜的“记忆”作用,也不可能恢复原状,从而在再结晶 SOI 膜上出现了空洞,图 1(a) 即为空洞的 SEM 显微照片(见图版 I)。

实验中观察到,由于空洞的产生而造成多余的硅常常会以突出物的形式出现在结晶后 SOI 膜上的晶粒间界附近(图 1(b)) (见图版 I)。

在微小空隙长大时,如果熔融 Si 与上,下两层绝缘层的浸润性都很差,空洞就会增大至整个熔区,从而出现极为严重的硅膜收球,图 1(c) 即为收球情况的金相显微照片(见图版 I)。

最后在“爆炸式”熔化的第二阶段——重新固化过程,已熔晶粒由于处于过冷状态而以未熔晶粒为核固化,固化时体积膨胀而引起质量转移,其中某些局部足以使覆盖层发生范性形变,这样即使有熔区扫过,也将部分地保留这种表面不规则起伏,从而在结晶后 SOI 晶膜上留下起伏不平的表面,图 1(d) 为出现了表面起伏的 SOI 晶膜的 TEM 剖面照片(见图版 I)。这种表面起伏对 SOI 半导体器件性能也极为不利。

上述分析表明,空洞、收球及表面起伏等形貌缺陷的产生与区熔过程中出现“爆炸式”熔化有着密切的关系,对多晶硅薄膜的熔化前沿推移行为的研究,对于得到良好的 SOI 晶膜具有重要意义,也就是说,要想消除上述形貌缺陷,必须对熔化过程进行严格控制。

实际上,硅膜熔化前沿的温度梯度可以作为这一过程控制的控制参量,因为当该温度梯度较小时,固液界面附近的固液共存区较宽,微空洞出现的机率大,并有更多的机会集聚长大,所以对空洞的产生有促进作用,因而也增大了收球出现的机会,同时产生更多更严重的表面起伏。相反地,若在熔化前沿建立一个较大的温度梯度以缩小固液共存区的宽度,预计将会大大减小各种形貌缺陷出现的机率,从而得到高质量的 SOI 晶膜。

3 形貌缺陷的抑制

红外区熔再结晶系统中,采用双石墨条及条板同侧结构石墨加热器(图 2),设石墨条

在垂直于扫描方向上为无限长, 侧面尺寸为 $W \times H$, 与 SOI 样片间距为 D , N 为辐射能流分布的归一化常数, 建立如图坐标即 $x = 0$ 位于条 B 的中心, 假设石墨为绝对黑体, 则 x 处得到石墨条 B 的辐射能量可以通过积分求得^[3]:

$$P_B(x) = \begin{cases} P_{1B}(x) & 0 \leq x \leq \frac{W}{2} \\ P_{1B}(x) + P_{2B}(x) & \frac{W}{2} \leq x \end{cases} \quad (2)$$

$P_{1B}(x)$, $P_{2B}(x)$ 分别对应于 B 条底面与侧面的辐射

$$P_{1B}(x) = N \left\{ \frac{x + \frac{W}{2}}{\left[\left(x + \frac{W}{2} \right)^2 + D^2 \right]^{\frac{3}{2}}} - \frac{x - \frac{W}{2}}{\left[\left(x - \frac{W}{2} \right)^2 + D^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (3)$$

$$P_{2B}(x) = N \left(x - \frac{W}{2} \right) \left\{ \frac{1}{\left[\left(x - \frac{W}{2} \right)^2 + D^2 \right]^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{\left[\left(x - \frac{W}{2} \right)^2 + (D + H)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (4)$$

条 A 对于 x 处的辐射加热, 只有底面加热的贡献, 其右侧面由于条间距 S 很小 (约 0.5 mm) 而被条 B 所遮挡, 所以 $P_{2A}(x_0)$ 很小, 可以忽略. 而

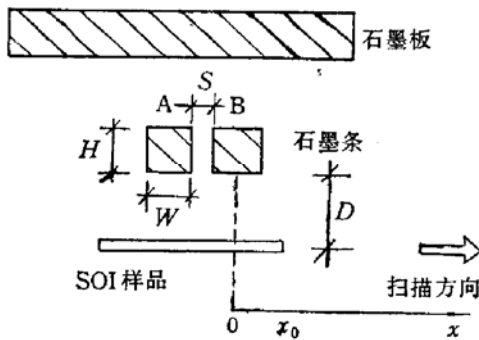


图 2 红外区熔再结晶系统工作原理示意图

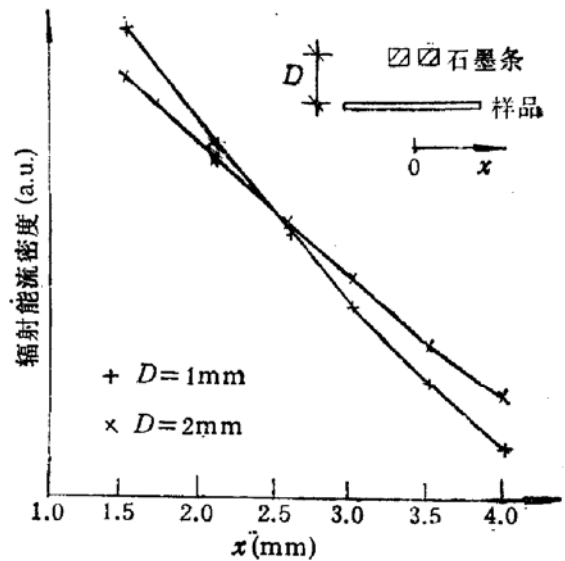


图 3 不同 D (石墨条与样品间距) 值时辐射能流密度分布图

由于两几何尺寸及结构均相同的石墨条处于同一高频场, 其辐射能流密度分布完全相同, 所以

$$P_{1A}(x_0) = P_{1B}(x_0 + W + S) \quad (5)$$

即

$$P(x_0) = P_{1B}(x_0) + P_{1B}(x_0 + W + S) + P_{2B}(x_0) \quad (6)$$

实验中采用 $W = H = 3\text{mm}$, $S = 0.5\text{mm}$, 计算得到的辐射能流分布曲线示于图 3 中, 显然对于不同的 D 值, 在 $x > \frac{W}{2}$ 处, 辐射能流的分布梯度不同, 石墨条与 SOI 样片的间距减小, 辐射能量分布梯度增大, 此处硅片上横向温度梯度增大, 因而有利于缩小熔化前沿的固液共存区宽度, 从而抑制空洞等形貌缺陷的产生.

实验结果与理论计算预测符合得很好,当采用条与样品间距 $D = 2\text{mm}$ 时,由于熔化前沿温度梯度较小,固液共存区较宽,因而容易出现空洞、收球及表面起伏(图 1, 见图版 I)。而当我们把条与样品间距减小至 $D = 1\text{mm}$ 时,熔化前沿温度梯度增大,固液共存区变窄,减小了空洞出现的机率,得到了无空洞、不收球、表面平整、厚度均匀的良好 SOI 晶膜(图 4, 见图版 I)。

4 结论

通过减小石墨条与样品间距而增大熔化前沿温度梯度的措施,可以减小“爆炸式”熔化对再结晶 SOI 晶膜的影响,从而抑制形貌缺陷的产生,实验证明该技术是行之有效的。

参 考 文 献

- [1] 张鹏飞,钱佩信,林惠旺,柳连俊,半导体学报,1991,12: 673.
- [2] D. Dutartre, M. Haond and D. Bensahel, MRS Symp. Proc., 1986, 53: 89.
- [3] C. K. Chen, M. W. Geis, B-Y. Tsaur, R. L. Chapmen and John C. C. Fan, J. Electrochem. Soc., 1984, 131: 1707.

Formation and Inhibition of Morphological Imperfections in Infrared ZMR-SOI

Zhang Pengfei, Hou Dongyan, Yang Jingming and Tsien Pei-Hsin
(*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Tai-Chin Lo
(*The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong*)

Abstract The Formation of morphological imperfections such as voids, agglomeration and surface roughness has been attributed to the explosive melting effect of thin Si film. It is proved by calculations that the temperature gradient at the melting front decreases with the heater-sample separation. However the explosive melting effect would be reduced with increased temperature gradient. Therefore, an approach of decreasing the heater-sample separation has been proposed to inhibit the morphological imperfections.

EEACC: 0520