

衬底预非晶化对低能硼注入硅 形成浅结的影响*

卢 志 恒

(北京师范大学物理系)

李素杰 张朝明 罗 晏 张荟星

(北京师范大学低能核物理研究所)

1989年2月14日收到

本文研究了不同剂量，不同能量硅自注入预非晶化对低能硼注入硅形成浅结的影响。对于 10 keV 硼注入情形，只要含硼表面层是充分预非晶化的，都可得到结深为 $0.15\mu\text{m}$ 左右的浅结。

主题词 低能注入，浅结，预非晶化硅

一、引言

CMOS 电路集成度的提高有赖于硼浅结的研究。然而利用硼离子注入硅形成浅结受到很多因素的影响。首先由于硼原子半径较小，注入过程的沟道效应使注入杂质的浓度剖面延伸得很深；其次，硼具有较高的扩散子使得在退火过程中硼的浓度剖面有更深的扩展；第三，高剂量注入时所形成的损伤及硼原子的沉淀都会影响退火时硼的重新分布，并且限制着硼的激活率的提高。为了制备硼的浅结，降低硼的注入能量成了重要的研究课题。在具备中能离子注入机($50-500\text{ keV}$)的条件下，人们曾经建议用 BF_3^+ 注入硅制备硼浅结。但是，研究表明^[1]，用 BF_3^+ 注入制备硼浅结，无论在损伤恢复方面或者激活率提高方面都比不上具有相当能量的硼原子离子注入。为了避免沟道效应，目前正在广泛研究采用使单晶硅近表面层预非晶化的方法。

本工作在北京师范大学低能核物理研究所新近研制成功的低能离子注入机上，以 10 keV 能量的硼离子注入硅，研究硅自注入预非晶化对硼浅结特性的影响。由于对非晶层界面剩余损伤方面已经作过讨论^[2]，本文限于讨论电激活特性。

二、实验

作为衬底的 $\langle 100 \rangle$ 晶向 n 型硅，电阻率为 $8-10\Omega\cdot\text{cm}$ 。除少数几个样品采用硼直

* 国家自然科学基金资助项目。

接注入单晶硅，大部分都采用硅自注入进行预非晶化处理。为避免氧、碳、氮等元素离子的混入，自注入离子采用同位素 Si^{29} 。注入能量分别采用 50、100 和 180 keV。在不同注入能量下，注入剂量也不同。有的在室温下（RT）注入，有的用液氮（LN）冷却。非晶层厚度用背散射沟道效应进行检验。

硼的注入能量为 10 keV，剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。

退火处理采用卤钨灯快速热退火（RTA）。退火温度为 1000—1100°C，时间为 2、5、10 和 30 秒。退火温度由热电偶测量，每次退火以前采用银的熔化进行温度校正。

采用扩展电阻分析（SRP）来测定硼的浓度分布。虽然经过修正，对于不高于 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时可以得到硼的杂质浓度分布。但是这种测量，从根本上说，直接测定的是载流子浓度分布。

三、不同退火温度下激活的载流子浓度分布和扩散

这组实验分为两部分：样品号为 101#—107# 者采用 Si^{29} 以 100 keV 能量和 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 剂量在室温下注入单晶硅，进行预非晶化处理；样品号为 111#—116# 者的衬底为单晶硅。然后偏 7° 角进行 B 的低能注入。快速热退火温度为 1000°C 和 1100°C。

图 1 给出了在 1100°C 经 2、5、10 和 30 秒退火的样品用扩展电阻法测得的载流子浓度分布。可以看出：

(1) 剖面的右侧，即衬底的内部方向上经历不同时间退火后，浓度分布没有明显的变化。结深（以 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 浓度处剖面深度为标准）都为 0.22 μm 左右。这说明在退火过程中硼原子向内部扩散不明显。

(2) 由于注入剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ，而经 1100°C，2 秒退火所激活的载流子剂量为 $0.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。说明硼没有明显的沉淀现象。事实上，其峰值浓度 $7.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 远低于硼的电激活固溶度。

(3) 随着退火时间的增加，激活的载流子剂量降低。经 30 秒退火的样品（107#）的峰值浓度和 2 秒相比，降低了将近一个数量级。如同刚刚指出的，由于峰值浓度远低于电激活固溶度，没有理由认为这种情形下硼原子的激活率会因退火时间加长而降低。载流子浓度的降低只能是硼原子在退火过程中的损失造成的。注意到峰值位置的不断右移，这也许表明硼原子的损失是在退火过程中外扩散的结果。

图 1 10 keV, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ B 注入预非晶化硅经 1100°C 不同时间退火后载流子分布
--- 2 秒 —— 5 秒 -·-- 10 秒 ×— 30 秒

表 1 给出了各种样品的结深，峰值浓度，峰值位置和激活的载流子剂量等数据。从预非晶化衬底经 1000°C 退火的样品（101#—103#）和经 1100°C 退火的样品（104#—107#）

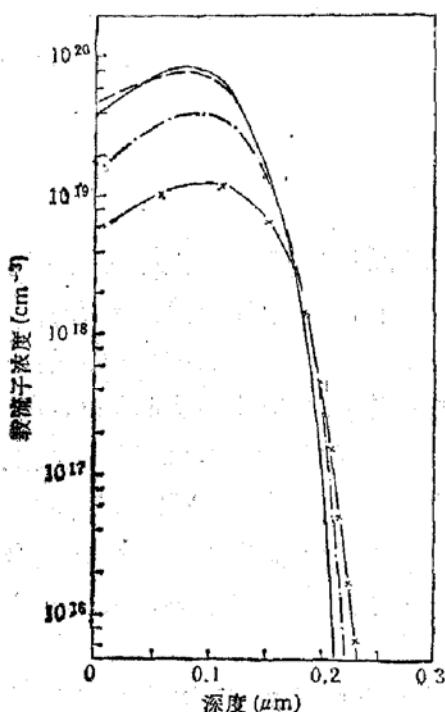


表1 各种退火条件下预非晶化和单晶衬底电激活特性的比较*

样品号	退火温度(℃)	退火时间(秒)	结深(μm) ($1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$)	峰值浓度(cm^{-3})	峰位置(μm)	激活剂量(cm^{-2})
101	1000	2	0.15	7.0×10^{19}	0.065	0.7×10^{19}
102	1000	5	0.16	9.5×10^{19}	0.06	1.0×10^{19}
103	1000	10	0.15	1.0×10^{20}	0.06	1.0×10^{19}
104	1100	2	0.22	7.5×10^{19}	0.08	0.9×10^{19}
105	1100	5	0.21	8.5×10^{19}	0.08	1.0×10^{19}
106	1100	10	0.22	4.0×10^{19}	0.09	0.4×10^{19}
107	1100	30	0.23	1.2×10^{19}	0.10	0.17×10^{19}
111	1000	2	0.19	6.5×10^{19}	0.06	
112	1000	5	0.28	4.2×10^{19}	0.10	
113	1000	10	0.29	4.5×10^{19}	0.12	
114	1100	2	0.25	6.5×10^{19}	0.10	
115	1100	5	0.24	5.0×10^{19}	0.10	
116	1100	10	0.26	4.0×10^{19}	0.11	

* 101#—107# 样品的衬底经预非晶化处理

111#—116# 样品的衬底为单晶硅

的比较中看出：

- (1) 经 1000℃ 退火处理的样品，结深要浅得多，并且都与退火时间关系不大。
- (2) 经 1000℃ 退火处理的峰值浓度（以及剂量）与退火时间的关系并不完全和 1100℃ 相同。经 2 秒退火的样品，其激活载流子剂量只有 $0.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ，峰值浓度也较低。而经 5 秒和 10 秒退火的样品，其激活剂量都接近注入杂质剂量。峰值也高于 2 秒情形。这可能是由于 1000℃ 温度下，2 秒的退火时间不足以使硼原子充分激活。而 5 秒或者 10 秒的退火时间已经使硼原子充分激活，并且说明在 1000℃ 下，硼原子没有明显的外扩散。事实上，峰值位置在 1000℃ 下没有明显变化这一点从另一个角度证明没有明显的外扩散发生。

对于硼直接注入单晶硅情形（样品 111#—116#）其共同之处是峰值浓度普遍低于，而结深普遍大于相应的预非晶化情形（样品 101#—106#）。这也正是目前各国广泛研究采用预非晶化以提高激活率和降低结深的原因。对于 1100℃ 退火情形，单晶直接注入和预非晶化的样品退火趋向一致：随着退火时间加长，峰值浓度不断下降。单晶直接注入的这种行为和前面讨论类似，同样可能是由于外扩散造成的。

然而单晶直接注入样品在 1000℃ 温度下退火，退火时间由 2 秒变化到 5 秒，载流子分布发生了明显的变化：峰值浓度明显下降，结深也增加了 50% 左右。这既不同于单晶样品 1100℃ 退火情形，也不同于预非晶化样品 1000℃ 退火情形。由于这组数据不是取自二次离子质谱分析，我们不能十分确切知道硼杂质的浓度分布。如果杂质浓度分布与本文用扩展电阻测得的没有重要不同，那么在 1000℃ 下退火时间从 2 秒变到 5 秒浓度分布所发生的变化可能是属于 Sedgwick 等观察到的硼的瞬时扩散现象^[3]。他们指出，这种瞬时扩散是由于硼注入过程造成大量的硅填隙原子所产生的增强扩散效应。如果这个结论是正确的，那么可以看出，在 1000℃ 快速热退火下，填隙原子寿命是以秒为数量级的。

四、不同预非晶化条件对浅结的影响

上面的讨论表明,从硼原子的激活和扩散来看,预非晶化硅衬底明显优于单晶硅,并且1000℃下退火,只要时间足够长(5秒或10秒),就可能使硼原子全部激活,并且没有明显的外扩散。因此,下面取退火温度为1000℃,讨论不同预非晶化条件对硼的激活特性的影响。

表2 非晶化条件对激活特性的影响*

样品号	自注入能量 (keV)	自注入剂量 ($\times 10^{15} \text{cm}^{-2}$)	退火时间(秒) (1000℃)	结深(μm) ($\times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)	峰值浓度 ($\times 10^{20} \text{cm}^{-3}$)	峰位置 (μm)
201	180	0.9	10	0.18	0.31	0.10
202	180	2.0	5	0.17	0.55	0.10
203	180	2.0	10	0.20	0.40	0.10
204	180	5.0	5	0.18	0.90	0.07
205	180	5.0	10	0.19	0.90	0.07
211	100	2.0	5	0.16	0.95	0.065
212	100	2.0	10	0.18	0.90	0.09

* 预非晶化自注入靶温为液氮温度

预非晶化注入能量分别为180keV, 100keV 和 50 keV. He 离子背散射沟道效应分析测得上述注入能量下形成的非晶层厚度分别约为0.35, 0.20 和 0.09 μm. 180keV 和 100 keV Si²⁹ 自注入预非晶化条件下所得的硼激活数据列于表2. 由于50 keV 自注入预非晶化所得的非晶层较浅, 硼原子扩散到未非晶化的单晶区, 使得硼的激活特性明显不及上面两种情形, 所以没有列入表2之中. 在这一组实验中, 所有样品预非晶化注入时都采用液氮冷却.

对于180 keV 能量预非晶化注入时, 采用的剂量分别为0.9, 2.0 和 $5.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$. 样品在注入硼以后经1000℃温度5秒和10秒退火. 列在表2的数据表明, 随着非晶化自注入剂量的提高, 激活特性变好. 当剂量为 $5.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 时, 激活特性接近表1中最好数据. 这里所说的激活特性变好, 主要是指峰值浓度和峰位置. 但是当自注入剂量为 0.9×10^{15} 和 $2.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 时, 峰值浓度分别只有 $5.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 情形的三分之一和一半. 峰位置也较深. 和前面讨论类似, 这同样可能与硼原子在退火过程外扩散相关.

根据Richmond^[4]方法进行计算表明: 当自注入能量为180 keV时, 剂量为 $0.9 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 就应该能够使非晶化层到达表面. 但是沟道效应实验结果显示, 表面以下还有200—300 Å没有非晶化. 可以理解, 这一层是重损伤区, 硼原子将快速扩散到表面, 造成外扩散. 对于剂量为 $2.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 情形, 虽然沟道效应实验结果已经表明非晶层已经达到表面, 但是表2的数据表明, 仍然可能存在严重的外扩散. 因此, 不能排除这样的可能性: 沟道效应对非常严重的损伤区和非晶区之间的鉴别是受限制的. 也就是说, 在近表面层, 虽然沟道效应检出为无序, 但不是真正的非晶. 这里的实验结果表明, 根据沟道效应求得的最低非晶化剂量需要乘以某个因子才可能得到比较理想的非晶层. 对于180 keV 自注入能量, 这个因子大约等于2.

对于 100 keV Si^{29} 自注入剂量为 $2.0 \times 10^{15}\text{ cm}^{-2}$ 在液氮冷却下预非晶化的样品在硼注入后经 1000°C , 5秒或10秒快速热退火所得到的电激活特性与 $180\text{ keV}, 5 \times 10^{15}\text{ cm}^{-2}$ 以及表1中 $100\text{ keV}, 5 \times 10^{15}\text{ cm}^{-2}$ 室温下自注入情形相接近。它们之间的偏差并不超出实验数据重复测量时的离散值。这个结果一方面说明这种自注入条件预非晶化是充分的, 另一方面也说明这种预非晶化条件同样可以获得较好的激活特性。

最后, 应当指出, 扩展电阻分析所得的硼的浓度分布是按照微分电导法通过Irvin曲线求得的, 因而从根本上说是载流子分布。不过数据处理计算机程序在 $1 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 浓度值附近作了一定的修正。其目的是为使所得的浓度值更加接近杂质浓度。不过修正量不超过5%^[5]。我们曾经在另一篇文章对扩展电阻法作过较详细的讨论^[6], 实验表明数据的重复性可以控制在10%左右。

五、总 结

综上所述, 样品经预非晶化处理所得的结深和电激活特性明显优于单晶硅衬底的直接注入。 1000°C 温度下退火, 浓度剖面变化小, 硼原子没有明显的外扩散。退火时间大于5秒时, 硼原子可以充分被激活。

在 1000°C 下经5秒或10秒快速热退火的样品, 预非晶化自注入能量之间的差异(比如 180 keV 和 100 keV)并不重要, 只要整个含硼表面层被充分非晶化, 就能得到最好的激活特性。

使硼原子充分激活的预非晶化自注入剂量明显大于通常由沟道效应测出的最低非晶化剂量。在 180 keV 自注入时, 前者大约是后者的两倍。

平均来看, 浓度为 $1 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 处可以得到的最浅结深大约为 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- [1] 张朝明, 卢志恒, 张荟星, 李素杰, 罗晏, 北京师范大学学报(自然科学版), No. 1, 56 (1989).
- [2] 卢志恒, 李素杰, 罗晏, 张朝明, 张荟星, 固体电子学研究与进展, 8, 368 (1988).
- [3] T. O. Sedgwick, A. E. Michel, V. R. Deline and S. A. Cohen, *J. Appl. Phys.*, 63, 1452 (1988).
- [4] E. D. Richmond and A. R. Knudson, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 51, 375 (1986).
- [5] W. R. Thurber, R. L. Mattis, Y. M. Lin and J. J. Filliben, *Semiconductor Measurement Technology*, NBS Special Publication 400—40 (April, 1981).
- [6] 卢志恒, 罗晏, 王大椿, 半导体学报, 10, 441 (1989).

低能硼离子注入硅中浅结的形成与预非晶化的关系
——
Lu Zhiheng et al.

Influence of Preamorphization on Shallow Junction Formed by Low Energy Boron Ion Implantation into Silicon

Lu Zhiheng

(Department of Physics, Beijing Normal University)

Li Sujie, Zhang Chaoming, Luo Yan and Zhang Huixing

(Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing)

Abstract

The influence of preamorphization on shallow junction of low energy boron implanted silicon is studied with self-implantation in different energies and doses. The shallow junction with depth of about $0.15\text{ }\mu\text{m}$ can be obtained if the surface layer containing boron is sufficiently amorphized.

Key words Low energy ion implantation, shallow junction, preamorphized silicon