

## ПРИМЕСНЫЕ МИКРОПРЕЦИПИТАТЫ В КРЕМНИИ

Б.М. Ибраев, Е.Г. Ильина, Г.А. Калюжная, А.К. Кузаков,  
С.П. Кузнецов, И.В. Мешков, А.Д. Перекрестенко

*С помощью рассеяния очень холодных нейтронов, лазерной масс-спектрометрии, масс-спектрометрии вторичных ионов обнаружены объемные микро-неоднородности различных типов в промышленных кристаллах кремния, выращенных методами Чохральского и бестигельной зонной плавки.*

Основным рабочим материалом в микроэлектронике является кремний. К однородности его состава и структуры в объеме предъявляются повышенные требования. Микронеоднородности на основе собственных точечных дефектов и примесей оказывают решающее воздействие на электрофизические, оптические и другие свойства кремния. Целью настоящей работы является исследование микронеоднородностей в промышленных монокристаллах Si, полученных методами Чохральского (p-Si, легированный бором марок КДБ-1, КДБ-0,03, КДБ-0,05) и бестигельной зонной плавки /1/. Параметры образцов приведены в табл.1; поверхности образцов полировались с помощью химико-механической обработки. Удельное сопротивление измерялось на верхних и нижних поверхностях образцов с шагом 10 мм. Использовались следующие методы анализа: лазерная масс-спектрометрия, масс-спектрометрия вторичных ионов (ВИМС), а также метод рассеяния очень холодных нейтронов (ОХН) с длиной волны  $40 \text{ \AA} < \lambda < 10^3 \text{ \AA}$  при пропускании нейтронов через образец на времяпролетном спектрометре ОХН /2/, позволяющий определять концентрацию и размер precipитатов.

Комплекс экспериментальных методов позволил выявить в бездислокационных исследованных монокристаллах кремния, выращенных методом Чохральского, неоднородности по составу нескольких типов.

1. Локальные неоднородности на основе легирующей примеси В размерами 3–5 мкм с содержанием В больше  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , причем их количество и распределение по поверхности носят случайный характер. Применение неразрушающих методов контроля, таких как лазерная масс-спектрометрия и метод низкотемпературной фотолюминесценции /3/, позволяет отбирать кристаллы без таких макровключений, приводящих к неравномерности электрического рельефа подложек Si.

2. Большое количество газовых примесей, главным образом кислорода и водорода, и комплексов на их основе, например, SiH, SiOH и т.д.

3. Количество атомов В в Si, определенное методом ОХН, значительно меньше (табл.1), чем определенное по зависимости удельного сопротивления. Этот факт свидетельствует о наличии в исследованных кристаллах неконтролируемой акцепторной примеси в концентрациях, сопоставимых с основной примесью. В работе /4/ высказано предположение об электрической активности Н, находящегося в атомарной форме в Si, однако этот вопрос требует дальнейших исследований.

4. Precipитаты размерами 60–120 Å с плотностью  $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$  (табл.1), не связанные непосредственно с атомами легирующей примеси В, так как их размеры и плотность не зависят от концентрации В. В монокристаллах Si, полученных методом бестигельной зонной плавки, precipитатов не обнаружено. Метод ОХН, являющийся прямым методом определения полной объемной концентрации микронеоднородностей, имеет порог чувствительности  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, можно утверждать, что бездислокационные кристаллы Si, полученные двумя различными методами, сильно различаются по своей микронеоднородности.

Причины возникновения precipитатов, по-видимому, следует связывать с собственными точечными дефектами – вакансиями и межузельными атомами Si, взаимодействующими с преобладающими примесями. Такой примесью в Si является О. В кристаллах Si, выращенных по методу Чохральского, концентрация О достигает  $10^{18} \text{ ат/см}^3$ , но на порядок меньше в кристаллах, полученных методом бестигельной зонной

Таблица 1

## Характеристики исследованных образцов кремния

Параметры	Номер образца, марка кремния					
	1, КДБ-1	2, КДБ-0,03	3, КДБ-0,005	4, Зонно-очищенный	5 /5/	
Исследованная площадь, см <sup>2</sup>	8,75	7,04	7,04	7	3,92	
Толщина, см	стопка из 23 пластин 0,038 ± ±0,002	1,010 ± ±0,002	0,965 ± ±0,002	1,009 ±0,002	(1,024 ± ±0,010) · 10 <sup>-1</sup>	
Удельное сопротивление, Ом · см	1,01 ± ±0,02	0,0306 ± ±0,0007	0,0050 ± ±0,0001	3000	—	
Концентрация бора, ат/см <sup>3</sup>	из удельного сопротивл.	1,5 · 10 <sup>16</sup>	2 · 10 <sup>18</sup>	2 · 10 <sup>19</sup>	—	3 · 10 <sup>19</sup>
	из пропускания ОХН	(4 ± 7) · 10 <sup>17</sup>	(1,1 ± 0,2) · 10 <sup>18</sup>	(1,62 ± 0,02) · 10 <sup>19</sup>	—	(1,14 ± 0,08) · 10 <sup>19</sup>
Диаметр преципитатов, нм	T = 300 К	7	6,4	11,6	—	—
	T = 200 К	—	7,4	7,6	—	—
Концентрация преципитатов, см <sup>-3</sup>	T = 300 К	3,8 · 10 <sup>14</sup>	1,5 · 10 <sup>15</sup>	2 · 10 <sup>14</sup>	—	—
	T = 200 К	—	4,4 · 10 <sup>14</sup>	1,1 · 10 <sup>15</sup>	—	—
Объемная доля преципитатов, %	T = 300 К	0,007	0,015	0,017	—	—
	T = 200 К	—	0,01	0,025	—	—

плавки. Поскольку растворимость собственных дефектов и О при температуре плавления Si существенно больше, чем их растворимость при всех более низких температурах (как говорят, растворимость носит ретроградный характер), то избыточные для более низких температур точечные дефекты и примесь О, взаимодействуя, выпадают в виде преципитатов весьма малых размеров. Именно они являются гетерогенными центрами зарождения микродефектов разных типов, которые получают развитие при различных режимах охлаждения, термообработках различных типов, окислениях и т.д. при изготовлении приборов. Такие преципитаты размерами 10–100 Å, не несущие заряда в равновесном или закаленном кристалле, проявят себя при любых дальнейших технологических операциях не только вследствие роста их размеров до микрон и более, но и изменения зарядовых свойств при процессах перестройки этих микродефектов.

В работе /6/ измеряли малоугловое рассеяние нейтронов от преципитатов О в кристаллах Si, выращенных по Чохральскому и отожженных при различных температурах в области 600–800 °С. Сопоставление результатов, полученных в настоящей работе и в работе /6/, показывает, что преципитаты образуются на основе примесных атомов О в результате их взаимодействия с собственными дефектами, прежде всего,

межузельным Si. Вопрос об участии H в этих преципитатах остается открытым. На процессы возникновения и развития преципитатов оказывает большое влияние и тепловая предыстория образцов. Все эти факторы должны учитываться при создании приборов на основе Si. Особенно высокие требования с точки зрения микронеоднородности должны предъявляться к Si при создании лавинных МДП-приборов, характерными особенностями которых являются сильные электрические поля и наличие горячих носителей тока. Поэтому преципитаты могут являться источниками значительных сквозных токов на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> вплоть до локальных пробоев.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ибраев Б.М. и др. Препринт ФИАН № 149, М., 1988.
2. Антонов А.В. и др. ФТТ, **26**, 1585 (1984).
3. Журкин Б.Г., Октябрьский С.Р. Тезисы Всесоюзной конференции по физике полупроводников, **1**, 171, Баку, сентябрь 1982.
4. Pontelides S.T. Appl. Phys. Letters, **50**, 995 (1987).
5. Антонов А.В. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 1, 6 (1986).
6. Toshi Takeda et al. Jap. J. of Appl. Phys., **26**, 106 (1987).

Поступила в редакцию 12 апреля 1989 г.