

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-74

P14-95-74

В.С.Вариченко¹, П.И.Гайдук¹, А.Ю.Дидык, Н.М.Казючич¹

МИКРОСТРУКТУРА ДЕФЕКТОВ
В ИМПЛАНТИРОВАННЫХ
ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ СЛОЯХ КРЕМНИЯ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОТЖИГА
В ВАКУУМЕ

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

1. ВВЕДЕНИЕ

Наряду с традиционной ионной имплантацией, применяемой в технологии создания полупроводниковых приборов, все большее значение приобретает ионное легирование полупроводниковых монокристаллов с использованием ионов с энергиями, превышающими 1 МэВ/а.е.м. /1-4/.

Поэтому понимание процессов, происходящих при послерадиационных обработках (в основном при высокотемпературном отжиге), представляет важную и актуальную задачу как для современной технологии, так и для технологии ближайшего будущего. В первую очередь это касается термостабильности созданных ионным легированием проводящих слоев, изучения процессов сорбирования вредных технологических примесей и ряда других /5/.

Цель настоящей работы - исследование эволюции дефектной структуры образцов кремния, облученных ионами бора с энергией 13.6 МэВ, в процессе отжига при различных температурах.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Облучение образцов кремния проводилось на ускорителе тяжелых ионов ИЦ-100 Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова.

Вторичные дефекты, возникающие при термообработке в имплантированных ионами высоких энергий слоях кремния, исследовали методом просвечивающей микроскопии поперечных слоев (сечений - ХТЕМ-метод типа метода cross-section). Указанный метод позволяет устанавливать однозначную связь дефектообразования, распределения различных фаз по глубине в зависимости от режима обработки образцов. Для исследований приготавливались тонкие образцы, представляющие собой поперечное сечение исходной пластины. Образцы склеивались "лицом к лицу" и утонялись до 10-30 мкм, после чего проводилась двухсторонняя ионная полировка (ионами Ar^+ с энергией 6-10 кэВ) до толщины 0.1-0.2 мкм. Полученные таким путем образцы исследовались на электронном микроскопе ЭМ-125 с напряжением 100 кВ в режимах двухлучевой дифракции и "слабого" пучка.

На рис. 1 - 5 представлены фотографии микроструктуры образцов кремния, облученных ионами бора до флюенса $Ft = 10^{15}$ ион/см² (здесь F - плотность потока ионов (ион/(см²/с)), а t - время облучения), после термического отжига в вакууме в течение 30 мин при температурах 800°С (рис. 1), 900°С (рис. 2), 1000°С (рис. 3) и при 1050°С (рис. 4 и 5).

Из приведенных результатов видно, что в слоях кремния, имплантированного ионами ^{11}B при термическом отжиге в температурном интервале 800 – 1050 $^{\circ}\text{C}$, формируются дефекты дислокационного типа (стержнеобразные (рис.1,2); дислокационные петли (полные или частичные), дислокационные конфигурации (рис.2-4), дефекты упаковки). При этом с увеличением температуры происходит последовательное формирование стержнеобразных дефектов; затем дислокационных петель и дислокационных конфигураций.

Следовательно, можно сделать вывод, что основные закономерности превращений дефектов аналогичны таковым для кремния, имплантированного ионами бора с низкой энергией.

Однако температурные условия формирования тех или иных дефектов структуры оказываются несколько сдвинутыми по температуре в более высокотемпературную область (примерно на 50 – 100 $^{\circ}\text{C}$). Возможное объяснение этого факта заключается в том, что:

- а) при высокоэнергетической имплантации радиационные дефекты формируются в значительно большем объеме кремния;
- б) слои радиационных дефектов значительно удалены от поверхности (до 20 мкм), и, следовательно, формирование собственных междоузельных атомов на поверхности образцов не оказывает сколь-нибудь существенного влияния на преобразование вторичных дефектов.

Сравнение фотографий на рис.1 – 4 показывает, что наряду с качественными преобразованиями дефектов структуры (изменениями типа вторичных дефектов) происходит уменьшение их концентрации, а также заметное сужение слоя, содержащего дефекты структуры. В таблице приведены результаты измерений ширины слоя дефектов в зависимости от температуры отжига, из которых следует, что при изменении температуры от 800 до 1050 $^{\circ}\text{C}$ происходит сужение слоя дефектов более чем в два раза. В таблице представлены также данные по измерению глубины залегания слоя дефектов, определенной как расстояние от поверхности образца до середины слоя дефектов. Результаты таких измерений могут быть недостаточно точными в смысле абсолютных значений, поскольку их определение проводилось по панорамным снимкам с малым увеличением, которые дают изображение структуры с некоторым искажением (до 10-15%). Кроме того, в ряде случаев происходило травление поверхности при препарировании образцов для ХТЭМ-исследований. Однако тенденция на сдвиг дефектного слоя в направлении поверхности при увеличении температуры отжига прослеживается достаточно однозначно. Максимальный сдвиг слоя дефектов к поверхности происходит

при температуре выше 1000 $^{\circ}\text{C}$, что хорошо коррелирует как с изменением типа дефектов (стержнеобразный дефект – дислокационная петля – дислокационная конфигурация), так и с литературными данными по трансформации дефектов структуры в случае имплантации ионов с низкими и средними энергиями имплантации.

Таблица. Значения глубины залегания и ширины дефектного слоя вторичных дефектов (по результатам панорамных съемок ХТЭМ-образцов).

| Режим отжига, $^{\circ}\text{C}$ | Глубина залегания максимальной кон- центрации дефек- тов, мкм | Ширина дефектного слоя, мкм | Тип дефектов |
|-------------------------------------|--|--------------------------------|-------------------------------------|
| 800 | 16.7 | 2.5 | стержнеобразные дефекты (СД); |
| 900 | 15.7 | 1.9 | СД, дислокацион- ные петли (ДП); |
| 1000 | 14.5 – 14.9 | 1.8 | СД, ДП, преци- питаты (П); |
| 1050 | 13.9 – 14.6 | 1.2 | ДП, П. |

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим (см. рис.5), что наблюдается преципитация примесей (предположительно кислорода) на дефектах структуры. Этот процесс начинается, по-видимому, уже при температуре отжига более 900 $^{\circ}\text{C}$. При высоких температурах отжига преципитация кислорода приводит также к особенностям в изображении дислокаций.

В принципе, данная методика может рассматриваться как методика создания изолирующих слоев в глубине имплантированных полупроводниковых монокристаллов и для радиационной очистки объема монокристалла от вредных технологических примесей.



Рис. 1. ХТЕМ-светлопольное изображение структуры слоя кремния [111], имплантированного ионами бора с энергией $E=13.6$ МэВ до флюенса $Ft=3 \cdot 10^{15}$ ион/см². Температура отжига 800°C в течение 30 мин. Стрелка указывает направление на поверхность образцов

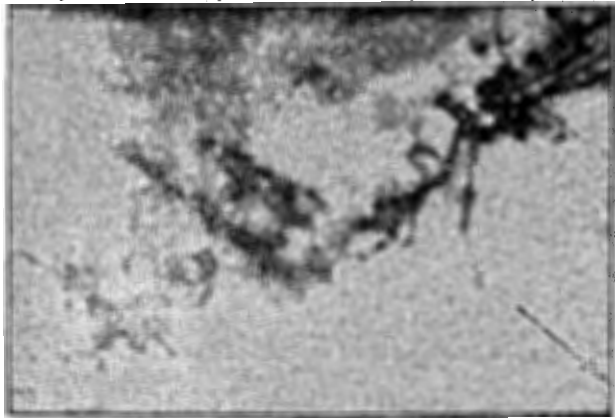


Рис. 2. ХТЕМ-светлопольное изображение структуры слоя кремния [111], имплантированного ионами бора с энергией $E=13.6$ МэВ до флюенса $Ft=3 \cdot 10^{15}$ ион/см². Температура отжига 900°C в течение 30 мин. Стрелка указывает направление на поверхность образцов

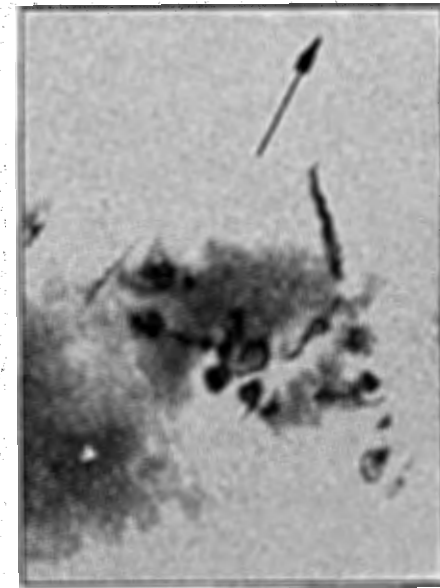


Рис. 3. ХТЕМ-светлопольное изображение структуры слоя кремния [111], имплантированного ионами бора с энергией $E=13.6$ МэВ до флюенса $Ft=3 \cdot 10^{15}$ ион/см². Температура отжига 1000°C в течение 30 мин. Стрелка указывает направление на поверхность образцов

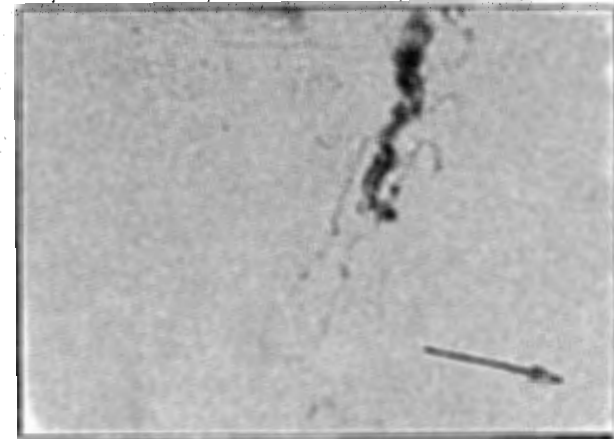


Рис. 4. ХТЕМ-светлопольное изображение структуры слоя кремния [111], имплантированного ионами бора с энергией $E=13.6$ МэВ до флюенса $Ft=3 \cdot 10^{15}$ ион/см². Температура отжига 1050°C в течение 30 мин. Стрелка указывает направление на поверхность образцов



Рис.5. ХТЕМ-светлопольное изображение структуры слоя кремния [111], имплантированного ионами бора с энергией $E=13.6$ МэВ до флюенса $F_t=3 \cdot 10^{15}$ ион/см². Температура отжига 1050°C в течение 30 мин. Стрелка указывает направление на поверхность образцов

ЛИТЕРАТУРА

1. Ziegler J.F. High energy ion implantation. - Nucl. Instr. & Meth., 1985, v. B6, p. 270-290.
2. Ziegler K. Materials Research with Beams at Cyclotron Energies. In.: Proceedings of 13th International Conference, Vancouver, 1992, p. 149-157.
3. Зайцев А.М. Высокоэнергетическая ионная имплантация в полупроводники. - Поверхность, № 10, 1991, с. 5-26.
4. Зайцев А.М. Ионная имплантация в полупроводники со сверхпрочной ковалентной связью. - В кн.: Алмаз в электронной технике, под ред. Б.Б. Кваскова. М.: Энергоатомиздат, 1990, с. 211-227.
5. Adawi M. A., Didyk A. Yu. Damage Formation in Silicon Irradiated by Heavy Ions with Energy more than 1 MeV/amu. JINR Communication E14-94-334, Dubna, 1994, 11 p.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 февраля 1995 года.

Вариченко В.С. и др.

P14-95-74

Микроструктура дефектов в имплантированных ионами высоких энергий слоях кремния при различных температурах отжига в вакууме

Изучена микроструктура образцов кремния, облученных тяжелыми ионами ^{11}B (с энергией 13,6 МэВ) в зависимости от температуры послерадиационного отжига в вакууме. Показано, что в температурном интервале отжига от 800 до 1050°C происходит трансформация дефектов структуры, аналогичная низкоэнергетической имплантации. Температурные условия формирования тех или иных дефектов структуры сдвинуты в более высокотемпературную область (на 50—100°C). Обсуждаются возможные причины такого поведения. Показано, что по мере повышения температуры отжига, наряду с качественными преобразованиями, происходит уменьшение концентрации дефектов структуры и заметное сужение слоя, их содержащего. Обнаружена тенденция сдвига этого слоя к поверхности.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1995

Varichenko V.S. et al.

P14-95-74

The Defect Micro Structure of the Silicon Layers Irradiated by High Energy Ions at the Different Temperature of Vacuum Annealing

The microstructure of silicon irradiated by heavy ions ^{11}B (with the energy 13.6 MeV) on the dependence of the annealing temperature in vacuum is studied. It is shown that the defect transformation takes a place at the temperature interval from 800 up to 1050°C like low energy boron implantation. The temperature conditions of these effects have the temperature shift about 50—100°C. The possibilities of this phenomenon is discussed. It is shown that at the increasing of annealing temperature together with the qualitative transformations the structure defect concentration decreases with the noticeable narrowing of the their contented layer. The shift tendency of this layer to the surface is discovered.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1995