

06;10

## Формирование наноразмерных частиц карбида кремния и алмазов в поверхностном слое кремниевой мишени при короткоимпульсной имплантации ионов углерода

© Г.Е. Ремнёв,<sup>1</sup> Ю.Ф. Иванов,<sup>2</sup> Е.П. Найден,<sup>3</sup> М.С. Салтымаков,<sup>1</sup> А.В. Степанов,<sup>1</sup> В.Ф. Штанько<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт высоких напряжений Томского политехнического университета, 634028 Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники ТФ СО РАН, 634055 Томск, Россия

<sup>3</sup> Сибирский физико-технический институт, 634050 Томск, Россия

<sup>4</sup> Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

e-mail: remnev@hvd.tpu.ru

(Поступило в Редакцию 5 августа 2008 г.)

Представлены результаты исследования синтеза наноразмерных частиц карбида кремния и алмазов при короткоимпульсной имплантации ионов углерода и протонов в кремниевую мишень. Эксперименты проведены с использованием источника импульсных мощных ионных пучков „ТЕМП“ на основе магнитоизолированного диода с радиальным магнитным полем  $B_r$ . Параметры пучка: энергия ионов 300 кэВ, длительность импульса 80 пс, состав пучка ионы углерода и протоны, плотность ионного тока 30 А/см<sup>2</sup>. В качестве мишени использованы пластины монокристаллического кремния. При последовательном воздействии более 100 импульсов наблюдалось формирование в поверхностном слое кремния наноразмерных частиц SiC и наноалмазов. Средний размер области когерентного рассеяния частиц SiC и наноалмазов 12–16 и 8–9 нм соответственно.

PACS: 78.67.Bf

Получение наноразмерных структур в кремнии является актуальной задачей, поскольку кремний является основным материалом для изготовления различных полупроводниковых приборов. Освоение широкозонного материала: кубического карбида кремния SiC на кремниевой подложке связано с разработкой светоизлучающих приборов в видимом и инфракрасном диапазонах [1–3]. Имеется большое количество работ, связанных с синтезом тонких пленок кубического SiC различными методами (магнетронное и газофазное осаждение, молекулярно-лучевая эпитаксия, ионная имплантация).

Метод ионной имплантации [4,5] с дозами ионов углерода более 10<sup>16</sup> предполагает последующий тепловой нагрев для синтеза частиц и отжига дефектов. В работах [3,5] для последующего нагрева и синтеза кубического SiC и FeSi<sub>2</sub> использовался импульсный ионный пучок. Метод короткоимпульсной имплантации, сопровождаемый импульсным нагревом поверхностного слоя, наряду с внедрением ионов при большом количестве импульсов обеспечивает и отжиг дефектов, формируемых при имплантации ионов [6–8]. Слои кубического SiC выращиваются на кремниевых подложках. Из-за большого рассогласования постоянных решетки между Si и SiC (~20%) выращенные слои имеют низкое структурное качество. Представляет интерес использование в качестве подложки других политипов SiC, постоянные решетки которых незначительно отличаются от Si, например гексагонального SiC. Возможности его

синтеза в поверхностном слое Si при короткоимпульсной имплантации ионов углерода посвящена настоящая работа.

В экспериментах использовался источник импульсных мощных ионных пучков на основе диода с внешней магнитной изоляцией с диэлектрическим анодом [9]. Ускоряющее напряжение магнитоизолированного диода (МИД) составляло 300 кВ, длительность импульса тока — 80 нс. Плотность тока была ниже порога абляции материала мишени и составляла 30 А/см<sup>2</sup>. При этом доза в импульсе была ~ 1.5 · 10<sup>13</sup> см<sup>2</sup>. Число импульсов варьировалось от 1 до 500. Разброс параметров пучка (плотности тока и энергии ионов) от импульса к импульсу не превышал 20%. Состав пучка включал наряду с ионами углерода и ионы водорода до 50%. Остаточное давление в камере — 10<sup>4</sup> мм Hg.

В качестве мишени использовались пластины из монокристаллического кремния с плоскостью среза (111). Для анализа мишени использовались рентгенографический метод в геометрии скользящего пучка (дифрактометр фирмы Shimadzu XDR=600 на CuK(α)-излучении), фотолюминесценция поверхностных слоев кремниевых мишеней и просвечивающая электронная микроскопия.

Данные рентгенографического анализа, с учетом того что глубина анализа составляет 5–6 мкм, а глубина проникновения ионов углерода в Si мишень составляет около 1 мкм, свидетельствует о появлении поликристал-

Содержание фаз SiC и наноалмаза в поверхностном слое мишени

Число импульсов	Обнаруженные фазы	Содержание фаз в поверхностном слое, %	Параметры решетки, Å	Размеры ОКР, nm	$\Delta d/d \cdot 10^{-3}$
1	Si(111)	100			
10	Si(111)	> 90	$a = 5.429$		
	SiC	Следы	$a = 3.0988$ $c = 15.017$		
	C — наноалмаз	Следы	$a = 3.5625$		
100	Si(111)	70	$a = 5.429$	> 500	0.1
	SiC	20	$a = 3.0988$ $c = 15.017$	12	3
	C — наноалмаз	10	$a = 3.5625$	8	5
500	Si(111)	50	$a = 5.429$	70	1
	SiC-moissanite	24	$a = 3.0988$ $c = 15.017$	16	8.9
	C — наноалмаз	26	$a = 3.5625$	9	6

лического образований SiC и наноалмазов в поверхностном слое мишени.

В таблице приведены результаты рентгенографических исследований для образцов кремния, облученных 1, 10, 100 и 500 импульсами ионного пучка. Из таблицы видно, что в поверхностном слое мишени образуются два соединения SiC и синтетический наноалмаз. При возрастании числа импульсов воздействия до 100 поверхностный слой кремниевой мишени переходит из монокристаллического состояния в поликристаллическое. Дальнейшее увеличение числа импульсов приводит к повышению доли данных веществ в поверхностном слое мишени и росту размеров кристаллитов.

Расчетная доза имплантации при 100 и 500 импульсов воздействия равна  $1.87 \cdot 10^{19}$  и  $1.33 \cdot 10^{20}$  ion/cm<sup>3</sup> соответственно.

Измерения фотолуминесценции (ФЛ) образцов Si, имплантированных углеродом, были выполнены на импульсном спектрометре. Возбуждение образцов проводилось при температуре 300 К излучением импульсного азотного лазера с длиной волны 337 nm. Энергия в импульсе возбуждения 30 μJ, длительность ~ 8 ns.

Спектры ФЛ образцов, представленные на рис. 1, исправлены на спектральную чувствительность тракта. Интенсивность ФЛ образца после воздействия 100 импульсов облучения ускоренными ионами углерода примерно в пять раз меньше, чем после 500 импульсов.

Из представленных спектров на рис. 1 следует, что спектр ФЛ сложен и состоит, по крайней мере, из двух перекрывающихся полос. Это видно из сопоставления данных для двух образцов. Пик ФЛ при энергии 2.8–2.9 eV соответствует гексагональной модификации SiC.

Методами электронной дифракционной микроскопии проведены исследования структуры и фазового состава

порошков, приготовленных с поверхности кремниевой мишени, облученной 500 импульсами. Образцы для электронно-микроскопического анализа готовились следующим образом: порошок тонким слоем наносили на предметное стекло и напыляли на него слой графита, используя прибор ВУП-2к. Далее готовили экстрактивные угольные реплики, которые анализировали на электронном микроскопе ЭМ-125. Проведенные исследования показали следующее: фазовый состав порошка — SiC (гексагональной модификации), графит гексагональной плотноупакованной (ГПУ) модификации и графит кубической модификации ( $a = 0.5545$  nm), основной фазой исследованного порошка является SiC. Относительное содержание графита ГПУ и кубической модификаций примерно одинаково и составляет по ~ 20% объема исследованного порошка. Частицы SiC в большинстве случаев имеют огранку, форма частиц — тонкие пластинки или многоугольники (многогранники) (рис. 2, a, b).

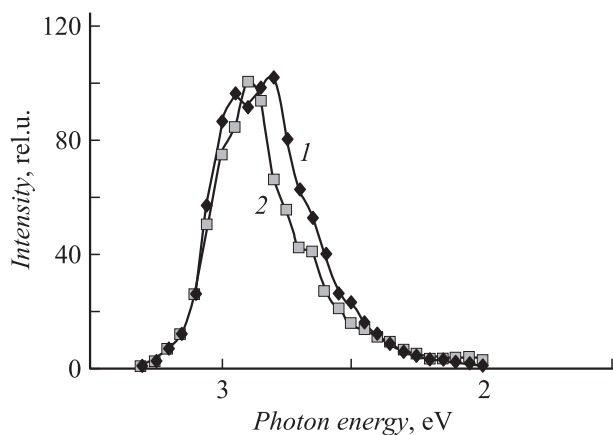
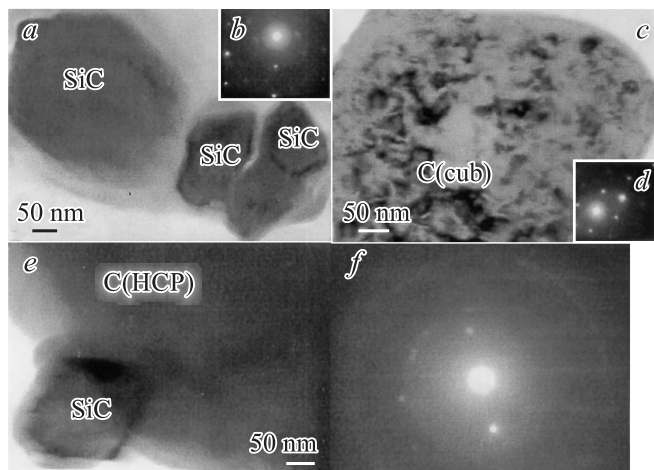


Рис. 1. Спектры ФЛ ( $\lambda = 337$  nm) образцов SiC после 500 (1) и 100 импульсов (2) при температуре 300 К.



**Рис. 2.** Электронно-микроскопические изображения (*a, c, e*) частиц порошка; *b, d, f* — микроэлектронogramмы данных частиц соответственно.

Частицы графита кубической модификаций имеют овальную форму и четкие границы (рис. 2, *c, d*). На электронно-микроскопических изображениях частиц сравнительно больших размеров присутствует дифракционный контраст в виде темных полос различной формы и протяженности, который может указывать как на наличие упругих напряжений кристаллической решетки графита, так и на различную толщину участков частицы (рис. 3, *c*). При этом микроэлектронogramма, полученная с такой частицы, является монокристаллической и дифракционных особенностей не содержит (рис. 2, *d*). Частицы графита ГПУ модификаций огранки, как правило, не имеют (рис. 2, *e, f*).

В работе показана возможность формирования в поверхностном слое монокристаллической кремниевой мишени поликристаллов карбида кремния и наноалмазов при импульсной ионной имплантации. Эксперименты проведены с использованием источника мощных ионных пучков типа „ТЕМП“ на основе магнитоизолированного диода.

Показано, что увеличение числа импульсов приводит к повышению объемной доли частиц в поверхностном слое мишени и незначительному росту размеров кристаллитов. Средний размер области когерентного рассеяния частиц SiC и наноалмазов 12–16 и 8–9 соответственно.

## Список литературы

- [1] Лебедев А.А., Зеленин В.В., Абрамов П.Л. // ФТП. 2007. № 41. С. 273.
- [2] Иванов П.А., Левинштейн М.Е. // ФТП. 2005. № 39. С. 897–898.
- [3] Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Нурутдинов Р.М. // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2006. № 1. С. 28–34.

- [4] Li N.S., Wu X.H., Liao L.S., Bao X.M. // Nuclear Instr. and Meth. In Phys. Res. B. 1998. Vol. 142. N 3. P. 308–312.
- [5] Canham L.T., Barraclough K.G., Robbins D.J. // Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 51. N 19. P. 1509–1511.
- [6] Hodson R.T., Baglin J.E.E., Pal R. et al. // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 37. N 2. P. 187–189.
- [7] Комаров Ф.Ф., Новиков А.П. // Новые методы ионно-лучевой обработки полупроводниковых материалов. Итоги науки и техники. Сер.: Физические основы лазерной и пучковой технологии. 1989. Т. 5. С. 113–159.
- [8] Иванов Ю.Ф., Опекунов М.С., Музыревич А.Г., Ремнёв Г.Е. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 24. С. 60–65.
- [9] Лопатин В.С., Ремнёв Г.Е., Фурман Э.Г. и др. // ПТЭ. 2004. № 4. С. 70–75.