

06  
**Возможности метода ВИМС для анализа профиля имплантированного водорода в кремнии и примесного состава структур „кремний на изоляторе“**

© Н.Д. Абросимова,<sup>1</sup> М.Н. Дроздов,<sup>2</sup> С.В. Оболенский<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603600 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, 607680 Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт „Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского“, 603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: andnenastik@inbox.ru

Поступило в Редакцию 3 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 3 апреля 2020 г.

Принято к публикации 3 апреля 2020 г.

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования распределения водорода в кремнии и структурах SiO<sub>2</sub>–Si при имплантации в режимах, используемых при изготовлении структур „кремний на изоляторе“ по технологии водородного переноса. Предложена методика количественного анализа высоких концентраций имплантированного водорода в кремнии методом вторично-ионной масс-спектрометрии, включающая количественную калибровку концентрации атомов водорода и нормировку глубины анализа из времени распыления. Приведены результаты исследований распределения по глубине имплантированного водорода в кремнии и структурах Si–SiO<sub>2</sub>. Определен примесный состав имплантированных структур. Контролировались также латеральная однородность и временная стабильность имплантированных структур.

**Ключевые слова:** ВИМС, имплантация, водород, структуры „кремний на изоляторе“, „допороговое“, дефектообразование.

DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49973.114-20

## Введение

Структуры „кремний на изоляторе“ (КНИ), обладающие неоспоримыми преимуществами перед объемным кремнием за счет повышенной стойкости к термическим, барическим, ионизирующим воздействиям, остаются одним из перспективных материалов для полупроводниковой микроэлектроники. Имплантация водорода является одной из ключевых операций при формировании структур КНИ по технологии водородного переноса (SmartCut, DeleCut) и оказывает существенное влияние на качество готовых структур. Это может проявляться не только в положении и однородности скола, но и в изменении электрического состояния, энергетических уровней и коэффициентов диффузии примесей в приборном слое и захороненном диэлектрике. Целью настоящей работы являлось определение профиля концентрации водорода и примесного состава имплантированных структур SiO<sub>2</sub>–Si и Si.

## 1. Объекты исследований

Объектами исследования служили образцы кремния и структуры SiO<sub>2</sub>–Si, имплантированные водородом на

глубину от 100 до 1000 nm с энергиями от 30 до 120 keV, дозами  $4 \cdot 10^{16}$  и  $5 \cdot 10^{16}$  cm<sup>-2</sup>, а также структуры КНИ, изготовленные по технологии водородного переноса.

## 2. Методика определения концентрации водорода

Количественный анализ заключается в определении концентрации элементов в анализируемых образцах. Для элементов примеси следует использовать метод факторов относительной чувствительности. Этот метод основан на линейной зависимости интенсивности вторичных ионов для элементов примеси от их концентрации, что позволяет использовать небольшой набор тестовых структур для калибровки чувствительности в практических исследованиях. Для данной методики использовалась тестовая структура–подложка Si марки КДБ 12, имплантированная ионами водорода H<sup>+</sup> с энергией 50 keV, дозой  $4 \cdot 10^{16}$  cm<sup>-2</sup>. Имплантация проводилась под углом 90° к поверхности подложки. Профили концентрации атомов водорода (экспериментальный, полученный методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС), и теоретический, рассчитанный программой TRIM для условий имплантации тестовой

структуры) приведены на рис. 1. Анализируя данные рисунка, можно отметить небольшое расхождение положений максимумов рассчитанного и измеренного профилей, на 6%, что связывается со слабым проявлением эффекта каналирования ионов водорода. Калибровочный коэффициент для пересчета интенсивности вторичных ионов водорода в концентрацию определялся по дозе атомов водорода. Нормировка на элемент матрицы образца проводилась на интенсивность изотопа кремния  $^{30}\text{Si}$ , для исключения насыщения детектора вторичных ионов при регистрации основного изотопа  $^{28}\text{Si}$ , возможного из-за высокой чувствительности по кремнию в данном режиме измерений. Для определения концентрации атомов водорода  $N_{\text{H}}$  в Si по результатам измерений методом ВИМС использовалась формула

$$N_{\text{H}} (\text{cm}^{-3}) = 4.99 \cdot 10^{21} I(\text{H})/I(^{30}\text{Si}),$$

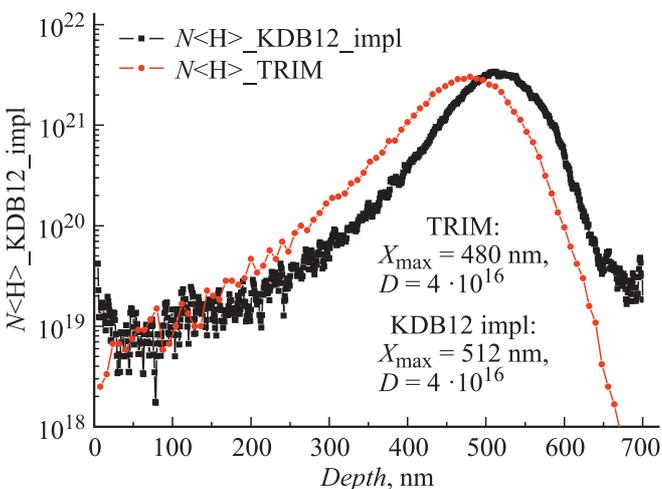
где  $I(\text{H})$  и  $I(^{30}\text{Si})$  — измеренная интенсивность вторичных ионов водорода и кремния.

Послойный элементный анализ проводился методом ВИМС на установке TOFSIMS-5 фирмы IONTOF (Германия) с времяпролетным масс-анализатором.

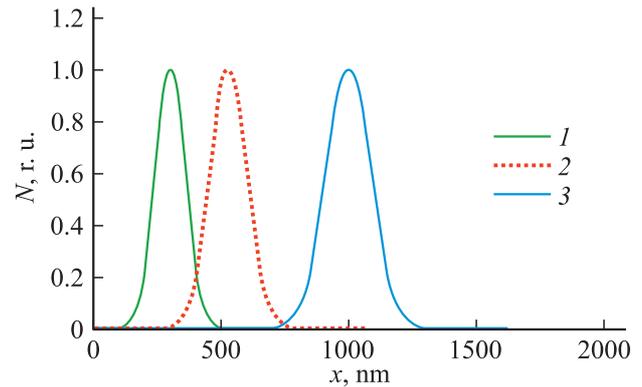
Профиль концентрации атомов водорода по глубине определяется с помощью послойного анализа зависимости интенсивности распыления вторичных ионов от времени распыления  $I(t)$ . Скорость травления вычислялась из соотношения  $S = Z/t$ , где  $S$  — скорость травления,  $Z$  — глубина кратера (была измерена с помощью оптического профилометра Talysurf CCI-2000).

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены профили концентрации атомов водорода, измеренные методом ВИМС в тестовой структуре, и рассчитанные методом TRIM для условий имплантации тестовой структуры. Рисунок показывает,



**Рис. 1.** Профили концентрации атомов водорода, измеренные методом ВИМС в тестовой структуре и рассчитанные методом TRIM для условий имплантации тестовой структуры.



**Рис. 2.** Нормированные на максимальные значения профили распределения водорода по глубине для энергии имплантации 30 (1), 60 (2), 120 keV (3) (TRIM).

Сравнение параметров распределения пробегов ионов и профиля вакансий

№	$E, \text{keV}$ $R_p, \text{\AA}$	Для ионов		Для вакансий	
		$\sigma, \text{\AA}$		$m_1, \text{\AA}$	$\sigma, \text{\AA}$
1	30	3050	580	3000	1130
2	60	5318	720	5000	140
3	120	10000	880	9510	1520

Примечание.  $R_p$  — средний проецированный пробег,  $m_1$  — первый статистический момент распределения вакансий,  $\sigma$  — дисперсия.

что измеренный профиль атомов водорода хорошо соответствует рассчитанному с помощью программы TRIM. На рис. 2 приведены нормированные на максимальные значения распределения имплантированных в кремний атомов водорода, рассчитанные для нескольких энергий имплантируемых ионов. Было установлено, что профили концентрации атомов водорода, измеренные методом ВИМС для имплантированного кремния, соответствуют теоретически рассчитанным с помощью программы TRIM за исключением имплантации с энергией 120 keV. Для энергии имплантации 120 keV профиль концентрации водорода имеет некоторую асимметрию и дополнительные максимумы, обусловленные, вероятно, обратным рассеянием. Концентрация водорода в максимуме составляет порядка  $10^{21} \text{cm}^{-3}$ . Из данных таблицы видно, что разница положений пиков распределений ионов и вакансий возрастает с увеличением энергии имплантации. Из этого следует, что при формировании структуры КНИ расщепление может пойти не по имплантированному слою, а по слою вакансий, а это приведет к тому, что толщина приборного слоя не будет соответствовать требуемому значению.

На рис. 3 приведены результаты экспериментального определения профилей отрицательных вторичных ионов изотопа кремния  $^{30}\text{Si}$ , водорода и основных примесей в структуре  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ , имплантированной водородом.

Анализируя данные, представленные на рис. 3, можно отметить наличие узких максимумов концентрации водорода на границах раздела SiO<sub>2</sub>. Причинами появления таких максимумов могут быть [1] миграция дефектов к поверхности, повышенный темп генерации радиационных дефектов, пассивация поверхностных дефектов, „допороговые“ механизмы дефектообразования, вызванные, в частности, генерацией упругих волн при имплантации. Распределение водорода в объеме SiO<sub>2</sub> может иметь максимум или монотонно спадать в направлении от поверхности. Из рис. 3 видно, что нормированные на максимальное значение профили ВИМС и TRIM в объеме кремния при имплантации через SiO<sub>2</sub> в линейном масштабе практически совпадают. Профиль распределения вакансий по глубине, как видно из рис. 3, немного смещен в сторону поверхности образца. Отличие от аппроксимирующей по распределению Гаусса кривой состоит также в наличии более пологого, чем у нормального распределения, „хвоста“ со стороны поверхности.

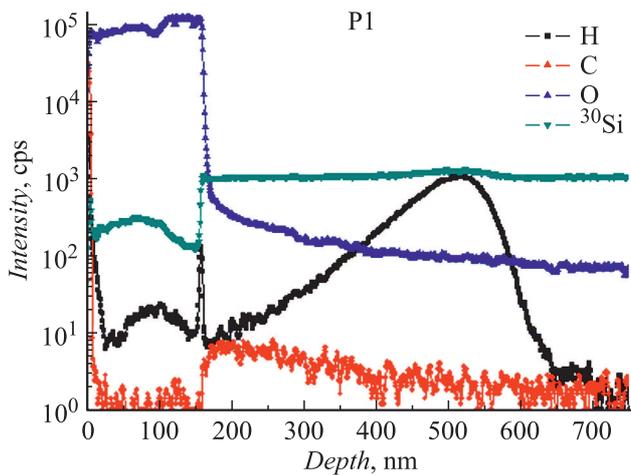


Рис. 3. Профиль интенсивности основных элементов и примесей в структуре SiO<sub>2</sub>-Si, имплантированной водородом.

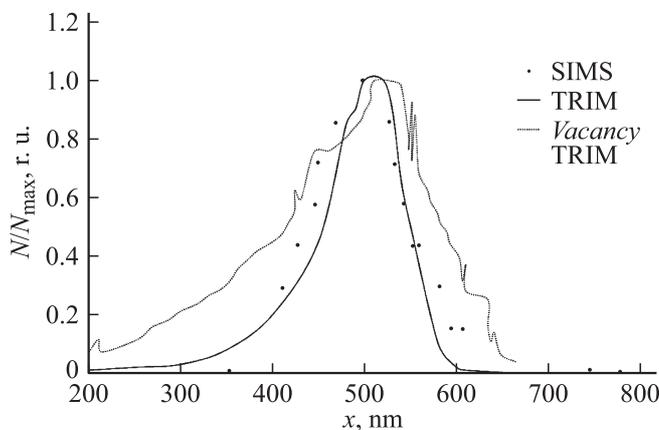


Рис. 4. Сопоставление нормированных на максимальное значение профилей ВИМС, TRIM для водорода и вакансий в области Si, имплантированного с энергией 60 keV в структуру Si-SiO<sub>2</sub>.

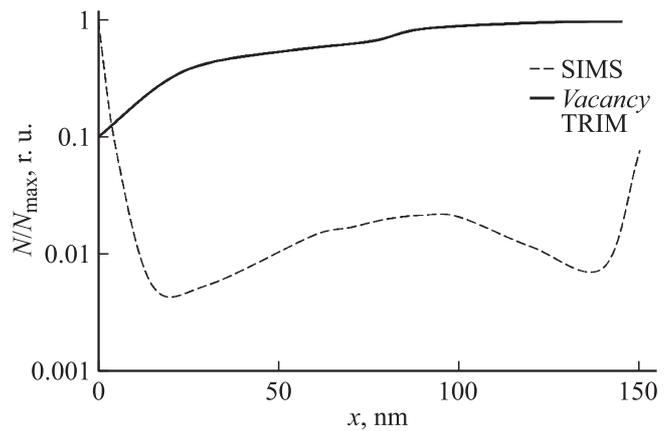


Рис. 5. Сопоставление нормированных на максимальное значение профилей ВИМС, TRIM для водорода и вакансий в области SiO<sub>2</sub>, имплантированного с энергией 60 keV в структуру Si-SiO<sub>2</sub>.

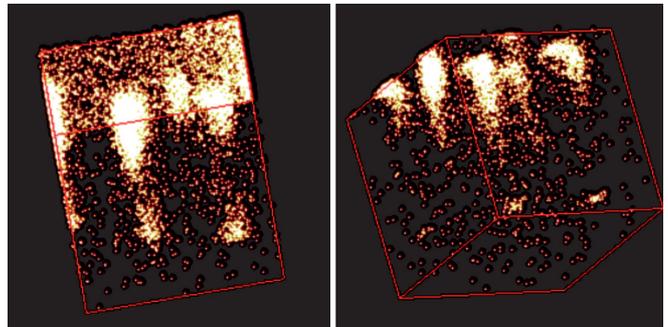


Рис. 6. Трехмерное изображение области анализа во вторичных ионах водорода (слева) и углерода (справа).

В [2] показано, что водород активно взаимодействует с вакансионными комплексами и в зависимости от положения в решетке, определяющего его зарядовое состояние, может модифицировать как донорные, так и акцепторные уровни. Но сопоставляя данные рис. 3–5, можно отметить, что поведение водорода в SiO<sub>2</sub> не соответствует рассчитанному с помощью программы TRIM и не коррелирует с распределением вакансий, показанном на рис. 5. Данный факт необходимо учитывать при моделировании. Модель, используемую в программе TRIM, можно дополнить на основе представлений о генерации упругих волн при имплантации [3–6].

Очень необычным является регистрация вкраплений углерода и кислорода, отсутствовавших на поверхности образца, на глубине около 500 nm (в области максимума профиля N<sub>H</sub>). Трехмерная реконструкция вкраплений приведена на рис. 6. Наиболее вероятным объяснением этих результатов является наличие загрязняющих ионизированных примесей кислорода и углерода в пучке ионов водорода в этих процессах имплантации. Только этим можно объяснить появление примесей С и О вдали от поверхности образца в виде отдельных вкраплений.

На поверхности таких образцов наблюдается возникновение дефектов морфологии поверхности в виде ямок глубиной около 280 nm и латеральным размером в несколько микрон.

При воздействии ионизирующих излучений различной природы как корпускулярных (ускоренные ионы), так и волновых (рентгеновское, лазерное, свет) в твердом теле возникают деформационные (упругие) волны, а в некоторых работах сообщается об ударно-акустических эффектах [3–5]. Их источниками могут являться переменные механические напряжения, возникающие из-за разогрева и появления нарушенного слоя у поверхности, каскады атомных смещений и рекомбинация пар Френкеля и (или) электронно-дырочных пар. Дефекты являются центрами генерации вторичных упругих волн, которые компенсируют затухание первичной волны и даже усиливают ее интенсивность. Так как расстояние между рассеивателями мало, такие волны считают когерентными. В результате такого взаимодействия изменения структуры материала наблюдаются на глубинах, значительно превышающих пробег ионов (эффект дальнего действия), а также при энергиях ниже пороговой („допороговое“ дефектообразование) [6]. Имплантация водорода в монокристаллический кремний является ключевым процессом при формировании структур КНИ. Характер распределения профиля водорода может оказывать существенное влияние на однородность толщины приборного слоя кремния.

## Заключение

В работе рассмотрены статистические характеристики распределения ионов водорода в кремнии в режимах, применяемых при формировании структур КНИ методом водородного переноса. Рассчитан профиль распределения вакансий при имплантации ионов водорода различных энергий. Рассчитаны статистические моменты распределений ионов водорода и вакансий при имплантации с различными энергиями. При оценке поведения водорода в SiO<sub>2</sub> необходимо учитывать упругие волны, возникающие при имплантации, а также механизмы „допорогового“ дефектообразования.

Профили концентрации водорода, определенные по предложенной методике, совпадают с теоретически рассчитанными для образцов кремния. Для объяснения профилей водорода в SiO<sub>2</sub> требуется коррекция модели, используемой в программе TRIM.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Козловский В.В., Козлов В.А. // ФТП. 1999. Т. 23. Вып. 12. С. 1409–1410.

- [2] Варенцов М.Д., Гайдар Г.П., Долголенко А.П., Литовченко П.Г. // ВАНТ. 2010. Т. 27. Вып. 5. С. 27–35.
- [3] Павлов П.В., Семин Ю.А., Скупов В.Д., Тетельбаум Д.И. // ФТП. 1986. Т. 20. Вып. 3. С. 503–507.
- [4] Скупов В.Д., Тетельбаум Д.И. // ФТП. 1987. Т. 21. Вып. 8. С. 1495–1496.
- [5] Семин Ю.А., Скупов В.Д., Тетельбаум Д.И. // ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 3. С. 273–276.
- [6] Воротынцев В.М., Перевоицков В.А., Скупов В.Д. Базовые процессы микро- и наноэлектроники. М.: Проспект, 2017. 358 с.