

05;06;10

Радиационно-индуцированный выход водорода из кремния в процессе облучения ионами висмута с энергией 710 MeV

© В.Ф. Реутов, С.Н. Дмитриев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Моск. обл.

E-mail: reutov@jinr.ru

Поступило в Редакцию 4 сентября 2006 г.

Понимание особенностей поведения водорода в твердых телах в интенсивных полях ионизирующего излучения представляет определенный интерес, особенно при решении многих проблем ядерного, термоядерного и космического материалообразования, водородной энергетики, микроэлектроники.

Приводятся прямые экспериментальные результаты, свидетельствующие о радиационно-индуцированном выходе водорода из монокристаллического кремния при облучении ионами висмута с энергией 710 MeV.

PACS: 61.82.-d, 61.82.Fk, 67.80.Mg

В работе [1] впервые обнаружен эффект аномального неравновесного выхода водорода из ряда металлов в процессе облучения электронами и рентгеновскими лучами. Авторы предположили [2], что выход водорода при комнатной температуре инициируется возбуждением водородной подсистемы ионизирующим излучением. В этой связи представляет определенный практический и научный интерес изучение поведения водорода в материалах в условиях интенсивного ионизационного излучения.

Известно, что наиболее интенсивное ионизационное воздействие имеет место при облучении материалов высокоэнергетичными тяжелыми ионами. Эта величина может составлять несколько десятков MeV/ μm . Высокая скорость выделения энергии в электронную подсистему инициирует ряд специфических эффектов радиационного повреждения, таких как, например, формирование ионных треков, в об-

ласти которых могут инициироваться процессы: локального плавления, аморфизации, генерации ударных волн и разрушения материала.

В настоящей работе приводятся результаты исследования поведения водорода в кремнии при облучении ионами Bi с энергией 710 MeV. Состояние водорода в кремнии контролировалось с помощью оптического микроскопа по особенностям развития водородной пористости (блистеров) на облучаемой поверхности.

В качестве объекта был взят кремний марки КЭФ-4.5 (100). Легирование водородом на глубину $0.23 \mu\text{m}$ осуществлялось путем облучения образца ионами водорода с энергией 12.5 KeV при комнатной температуре до дозы $5 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-2}$ в ЭЦР-источнике.

Облучение ионами Bi с энергией 710 MeV при комнатной температуре до дозы $1.3 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-2}$ проводилось на циклотроне У-400М (ОИЯИ, Дубна). С целью формирования на образце облученных и необлученных зон использовались поглощающие фильтры в виде молибденовой проволоки диаметром $18 \mu\text{m}$ и алюминиевой фольги толщиной $7 \mu\text{m}$, а также молибденовая фольга толщиной $100 \mu\text{m}$. Использование поглощающих фильтров цилиндрической формы [3,4] обеспечивает условия формирования на поверхности облучаемого образца поперечного энергетического профиля ионов висмута в интервале от 0 до 710 MeV. Это позволяет иметь на поверхности облучаемого образца зоны как упругого, так и неупругого взаимодействия заряженных частиц с атомами твердого тела, а следовательно, оценить их вклад в изучаемое явление. Известно, что в зоне упругого взаимодействия формируются и накапливаются радиационные дефекты. В зоне неупругого взаимодействия происходят в основном интенсивные ионизационные эффекты с возможным образованием так называемой трековой повреждаемости.

Схема облучения образца кремния, легированного водородом, высокоэнергетичными ионами висмута приведена на рис. 1. На рисунке видны особенности формирования в образце кремния (Si) с приповерхностным слоем, легированным водородом (Si+H), облученные (B) и необлученные (A) области при облучении ионами висмута через поглощающие фильтры в виде молибденовых проволочек (1) и фольги (2).

Регистрация блистерообразования в кремнии проводилась в оптическом микроскопе с использованием метода Номарского.

Исследования образцов кремния в оптическом микроскопе как после имплантации ионов водорода, так и после облучения высокоэнергетичными ионами висмута не показали заметных структурных

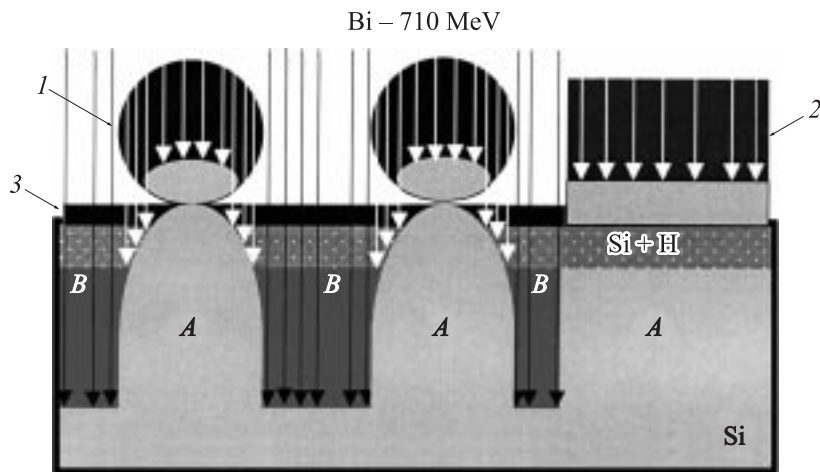


Рис. 1. Схема облучения образца кремния (Si) (с областью (Si+H), легированной водородом) высокоэнергетическими ионами Bi^+ через поглощающие фильтры в виде сборки (Al-фольга (3) + Mo-проволока (1)) и Mo-фольги (2). Конец стрелок — область конца пробега ионов Bi^+ . A — области образца, не подвергнутые облучению ионами Bi^+ ; B — области образца, облученные ионами Bi^+ .

изменений. Это свидетельствует о том, что температура образцов как при имплантации водорода, так и при облучении высокоэнергетическими ионами висмута не превышала, по крайней мере, 200°C . Заметим, что предварительные исследования образца кремния, легированного водородом, показали образование блистеров лишь после отжига при 300°C в течение 30 min.

После отжига при температуре 500°C в течение 30 min образца, легированного атомами водорода и облученного высокоэнергетическими ионами висмута, наблюдалось (рис. 2, а) образование поверхностных водородных пор в виде так называемых блистеров только в участках образца, защищенных от облучения ионами висмута поглощающими фильтрами (участки A, см. рис. 1). В зоне воздействия ионов висмута (участки B, см. рис. 1) водородные поры-блистеры не образуются. Отсутствие увеличения диаметра и уменьшения плотности блистеров вблизи границы раздела необлученного (A) и облученного (B) участков

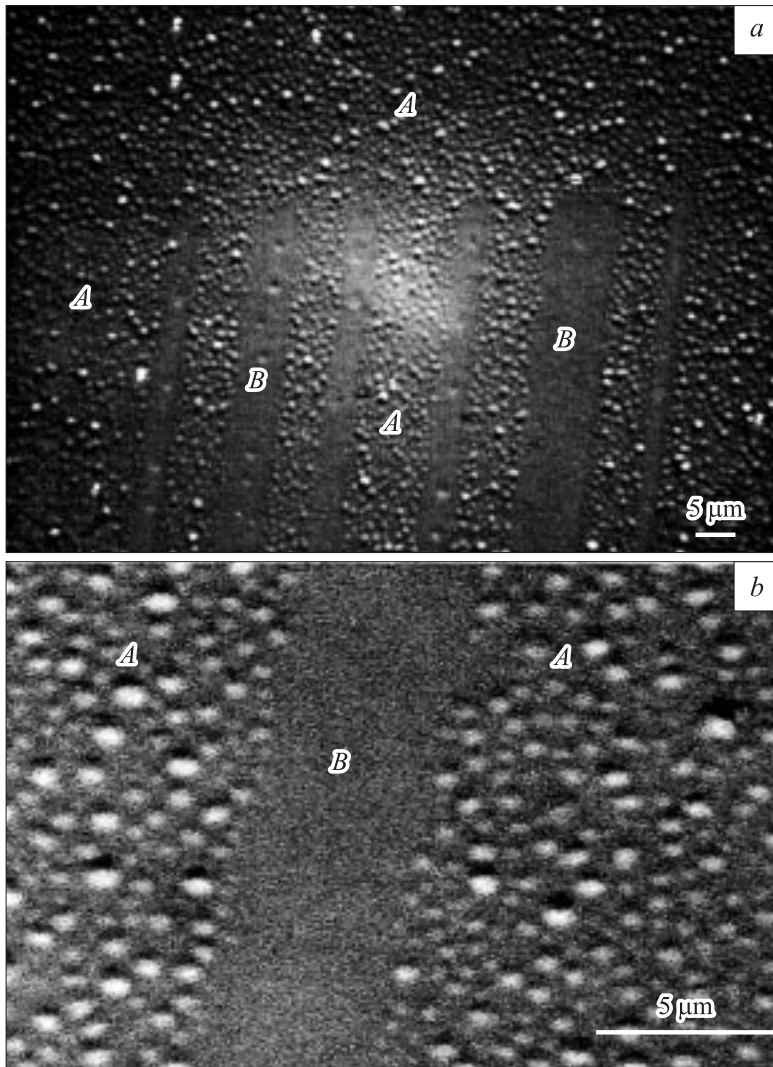


Рис. 2. Водородные поры (блистеры) на поверхности образца кремния, легированного водородом и облученного по схеме (см. рис. 1) ионами Bi, после отжига при 500°C в течение 30 min. *A* и *B* — участки образца, соответственно не облученные и облученные высокоэнергетичными ионами висмута.

(рис. 2, *b*) указывает на факт отсутствия термического эффекта в участках образца, подвергнутых ионизационному воздействию пучка ионов висмута. Этот же факт свидетельствует и об отсутствии вклада в формирование водородных пор радиационных дефектов от упругой составляющей потери энергии ионов висмута.

Наиболее важный результат проведенного исследования заключается в том, что впервые экспериментально обнаружен радиационно-индуцированный выход водорода из кремния в области ионизационного воздействия высокоэнергетичных тяжелых ионов висмута. Этот факт представляет интерес с точки зрения понимания поведения водорода в материалах в условиях интенсивного радиационного излучения ядерного или термоядерного реакторов, а также особенностей его накопления и сохранения в полупроводниковых материалах в условиях реализации, например, метода радиационно-газового скалывания [5] в технологии производства структур типа „кремний на изоляторе“ [6].

Список литературы

- [1] Тюрин Ю.И., Чернов И.П. // ДАН. 1999. Т. 367. № 3. С. 328–332.
- [2] Чернов И.П., Коротеев Ю.М., Тюрин Ю.И., Черданцев И.П. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2006. № 3. С. 51–57.
- [3] Реутов В.Ф., Вагин С.П. Способ создания профилей ионной повреждаемости. // А.с. № 1865063. БОИПОТЗ. 1985. № 8. С. 199.
- [4] Reutov V.F. // Journal of Nuclear Materials. 1996. V. 233–237. P. 1586–1589.
- [5] Реутов В.Ф., Ибрагимов Ш.Ш. Способ изготовления тонких пластин кремния: А.с. СССР 1282757. 30.12.1983.
- [6] Bruel M. // Electronics Letters. 1995. V. 31. N 14. P. 1201–1202.