

Влияние ионизационных потерь энергии высокоэнергетических ионов висмута на развитие гелиевых блистеров в кремнии

© В.Ф. Реутов*[¶], С.Н. Дмитриев*, А.С. Сохацкий*, А.Г. Залужный⁺

* Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, 141980 Дубна, Россия

⁺ Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, 115409 Москва, Россия

(Получена 17 марта 2015 г. Принята к печати 26 марта 2015 г.)

Понимание особенностей поведения гелия в твердых телах в условиях воздействия интенсивного ионизирующего излучения представляет определенный интерес при решении многих проблем ядерного, термоядерного и космического материаловедения, а также в микроэлектронике. В работе описывается обнаруженный эффект подавления образования гелиевых блистеров на поверхности ионно-легированного гелием кремния в результате облучения высокоэнергетическими ионами висмута. Сделано предположение о возможном уменьшении концентрации атомов гелия в кремнии за счет их радиационно-индуцированной десорбции из зоны легирования в условиях ионизационного воздействия от высокоэнергетических ионов висмута.

1. Введение

Инертные газы, в частности атомы гелия, обладают малой растворимостью в твердых телах. Ввести гелий в материал можно либо при его облучении нейтронами, за счет соответствующих каналов ядерных реакций типа (n, α) , либо при облучении ионами гелия на ускорителях. При нагреве, вплоть до температур плавления, большая часть введенного гелия удерживается в материале. Наблюдаемая незначительная (несколько процентов от полной концентрации) термодесорбция гелия из материалов связывается с его „выносом“ из материала теми или иными подвижными дефектами (вакансиями, дислокациями, границами зерен, газовыми порами и т.п.) под действием тех или иных градиентов температур и (или) напряжений [1]. Такое стабильное состояние гелия в материалах, его активное взаимодействие с дефектами является причиной многих катастрофических явлений в конструкционных материалах ядерного и термоядерного реакторов. Достаточно небольшой концентрации гелия (10^{-7} ат%) для проявления термически необратимой потери пластичности конструкционных материалов (так называемое явление высокотемпературного радиационного охрупчивания) [2]. При относительно более высоких концентрациях инертных газов (более 10^{-2} ат%) конструкционные и делящиеся материалы катастрофически изменяют свои геометрические размеры за счет так называемого радиационно-газового распухания [3]. Ослабление проявления этих радиационных эффектов в данных объектах связывают с необходимостью решения проблемы уменьшения в них концентрации инертных газов.

Можно привести много примеров отрицательного влияния атомов инертного газа на свойства материалов. Однако это явление используется и во благо. Один из примеров проиллюстрирован в работе [4], в которой

впервые было предложено использовать облучение легкими заряженными частицами, в частности ионами гелия, для безотходного скалывания монокристаллических пластин кремния, что нашло широкое применение при производстве структур типа кремний-на-изоляторе [5,6], а также при производстве „солнечного кремния“ [7]. В отколотой пластинке имеется приповерхностная зона, легированная гелием, который может оказать нежелательное действие на свойства пластинки кремния. Поэтому и в этом случае встает вопрос об удалении (десорбции) атомов гелия из отколотой пластины. Однако, как мы уже указывали, удалить гелий из образца в результате только термического воздействия не удастся. Именно это обстоятельство требует поиска способов стимулирования десорбции инертных газов, в частности гелия, из материалов.

В работах [8,9] были продемонстрированы результаты, свидетельствующие об атермической радиационно-индуцированной десорбции водорода из кремния в процессе облучения высокоэнергетическими тяжелыми ионами. В этой связи представлялось интересным исследовать возможность проявления данного эффекта и на системе „кремний + гелий“.

В настоящей работе приводятся результаты исследования поведения атомов гелия в кремнии при облучении ионами Вi с энергией 710 МэВ. Состояние гелия в кремнии контролировалось особенностями развития гелиевой макропористости в виде блистеров или флэкингов на облучаемой поверхности.

2. Результаты и обсуждение

В качестве объекта были взяты два образца монокристалла кремния марки КЭФ-4.5 (100). Один из образцов облучался в ЭЦР-источнике (ОИЯИ, Дубна) ионами гелия с энергией 14 кэВ (образец А), а другой (образец Б) — ионами гелия с энергией 25 кэВ. В обоих

[¶] E-mail: reutov@jinr.ru

случаях температура облучения не превышала 50°C , доза облучения составляла $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Образцы, легированные гелием на глубину 0.15 мкм (образец А) и глубину около 0.25 мкм (образец Б), были подвергнуты дополнительному облучению ионами висмута с энергией 710 МэВ через поглощающую металлическую маску в виде сетки с ячейками диаметром 300 мкм . Толщина поглощающего фильтра была выбрана из необходимости обеспечить в них полное поглощение ионов висмута с энергией 710 МэВ . Это позволило сформировать на образцах области как облученные, так и необлученные высокоэнергетичными ионами висмута. Образец А был облучен при комнатной температуре ионами Вi до дозы $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а образец Б — до дозы $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Более того, отметим, что проективный пробег ионов гелия указанных энергий в кремнии составляет десятые доли микрометра, в то время как проективный пробег ионов висмута с $E = 710 \text{ МэВ}$ составляет около 40 мкм . Это обстоятельство использовалось для определения влияния облучения ионами висмута с высоким уровнем удельных ионизационных потерь энергии (около 22.5 кэВ/нм) на десорбцию гелия в кремнии, который был предварительно имплантирован в исследуемый материал.

На рис. 1 приведены энергетические профили концентрации дефектов (сна) в кремнии после облучения до дозы $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ионами гелия с энергиями 14 и 25 кэВ . Прежде всего следует отметить достаточно высокий уровень концентрации радиационных дефектов, достигающий в пике повреждения величины около 8 сна (смещений на атом).

В процессе последующего облучения ионами висмута с энергией 710 МэВ слоя кремния, легированного атомами гелия, в нем выделяется высокий уровень (около 22.5 кэВ/нм , рис. 2) величины удельных ионизационных потерь энергии ионов висмута. При этом вклад радиационных дефектов от канала упругих потерь энергии незначителен (около 10^{-4} сна , см. вставку на

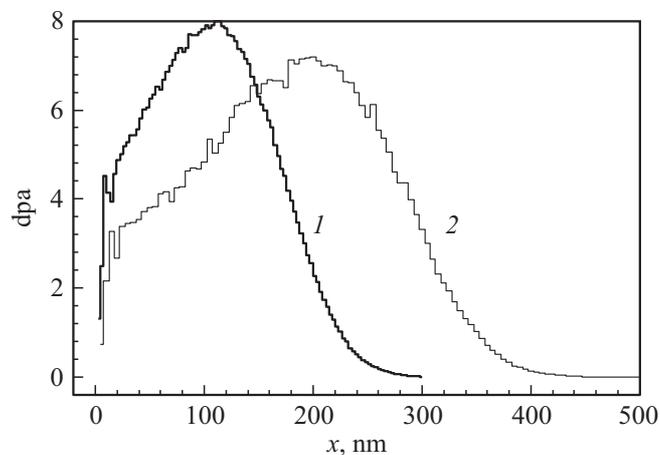


Рис. 1. Концентрационные профили радиационных дефектов по глубине образца кремния, облученного ионами гелия с энергиями 14 (1) и 25 кэВ (2) до дозы $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

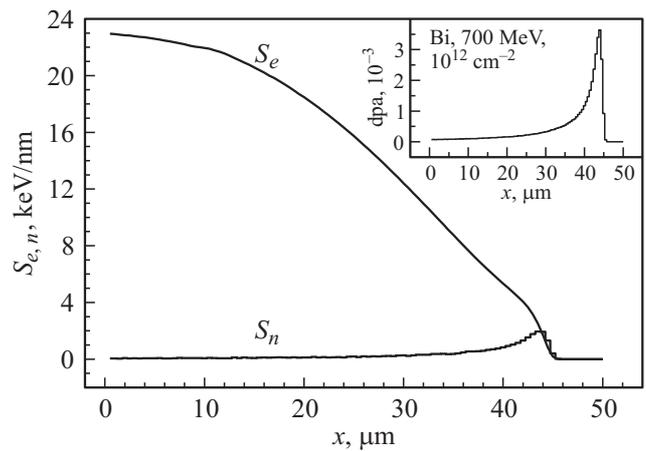


Рис. 2. Изменение величины неупругих (S_e) и упругих (S_n) энергетических потерь ионов висмута с $E = 710 \text{ МэВ}$ по глубине образца кремния. На вставке — концентрационный профиль дефектов (сна) вдоль пробега ионов висмута с энергией 710 МэВ .

рис. 2). Это свидетельствует о том, что основной вклад в радиационное повреждение кремния в зоне легирования гелием в процессе дополнительного облучения вносят только ионизационные потери высокоэнергетичных ионов висмута.

Исследование блистерообразования в кремнии в результате получасового послерадиационного отжига при температуре 500°C проводилось в оптическом микроскопе, используя дифференциально-интерференционный метод Номаковского.

Прежде всего отметим, что исследования образцов кремния в оптическом микроскопе как непосредственно после имплантации ионов гелия, так и после последующего облучения высокоэнергетичными ионами висмута не показали заметных структурных изменений.

На рис. 3 приведены характерные структурные изменения в образцах А и Б в областях облученных и необлученных высокоэнергетичными ионами висмута после отжига при 500°C в течение 30 мин . Наблюдаются характерные различия в блистерно-флэкинговой структуре кремния от дозы облучения ионами висмута. Так, в образце А (облученном ионами гелия с $E = 14 \text{ кэВ}$) (рис. 3, а) в необлученных и облученных до дозы $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ионами висмута областях имеет место формирование одинаковой морфологии гелиевой пористости в виде блистеров и флэкингов с различием только в их размерах и концентрациях (поверхностной плотности). В необлученной ионами висмута области кремния средний размер блистеров и флэкингов составляет 1.6 и 3 мкм , а их концентрации соответственно $9.4 \cdot 10^6$ и $1.7 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. В области воздействия высокоэнергетичных ионов висмута средние размеры блистеров и флэкингов несколько увеличились соответственно до 1.8 и 3.1 мкм , а их концентрации соответственно уменьшились соответственно до $8.8 \cdot 10^6$ и $1.3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$.

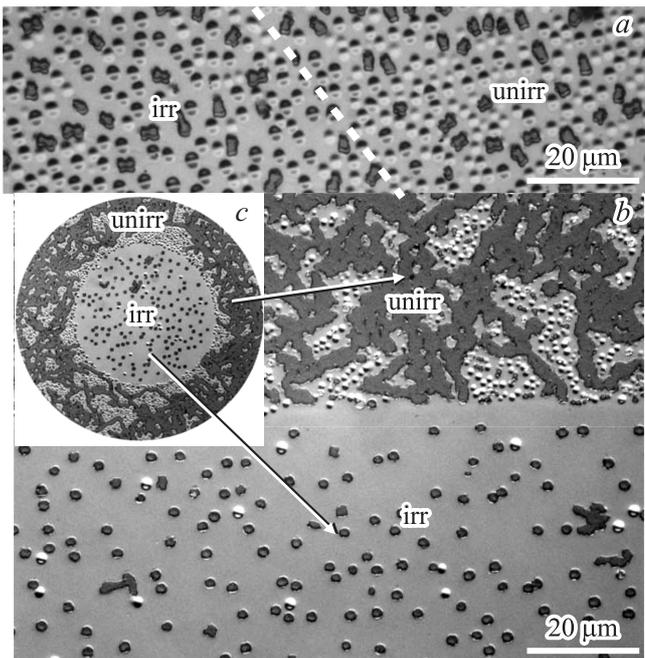


Рис. 3. Блистерно-флэкинговая структура после отжига при 500°C образца кремния, легированного гелием, в областях, облученных ионами висмута дозами: *a* — $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (пунктирная линия — граница между областями облученными (irr) и необлученными (unirr) ионами висмута); *b* — $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (*dz* — обедненная от блистеров и флэкингов зона кремния в области облучения ионами висмута); *c* — структура участка образца кремния, легированного гелием, и включающего области необлученные (unirr) и облученные (irr) через маску-сетку высокоэнергетическими ионами висмута.

Таким образом, приведенные результаты показали, хотя и незначительную, но имеющую соответствующую тенденцию влияния ионизационного воздействия высокоэнергетических ионов висмута на поведение примесного гелия, даже при дозе $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Данная тенденция, а именно увеличение скорости роста блистеров (флэкингов) при одновременном уменьшении их концентрации, значительно усилилась после облучения образца Б (облученного ионами гелия с $E = 25 \text{ кэВ}$) ионами висмута до дозы $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и последующего отжига при 500°C (рис. 3, *b*). В необлученных ионами висмута областях наблюдается проявление эффекта так называемого радиационно-газового скалывания. Известно, что причиной радиационно-газового скалывания является формирование блистерно-флэкинговой структуры, о чем свидетельствует их наличие в не сколотых участках образца. Проведенные расчеты показали, что средние размеры блистеров и флэкингов в них составили 2.8 и 4.4 мкм, а их концентрации $3.8 \cdot 10^6$ и $6.7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ соответственно.

В областях образца Б, подвергнутых воздействию высокоэнергетических ионов висмута, имеет место значительное уменьшение концентрации блистеров (до $1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$) и флэкингов (до $1.6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$) и увеличе-

ние их размера соответственно до 5.7 и 8.7 мкм. При этом со стороны облученной ионами висмута области наблюдается обедненная от блистеров и флэкингов зона шириной около 20 мкм. В то же время заметим, что она отсутствует со стороны необлученной области, при этом, более того, не наблюдается каких-либо пространственных градиентов ни в размерах, ни в концентрациях блистеров и флэкингов. Отсутствие изменения размера и плотности блистеров вблизи границы раздела необлученной и облученной зон (рис. 4) указывает на факт отсутствия термического эффекта перераспределения гелия в зоне действия пучка ионов висмута.

Можно предположить, что столь очевидное различие в характере блистерно-флэкинговых структур в необлученном и облученном ионами висмута до дозы $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ участках кремния, легированного гелием, а именно подавление процесса зарождения и роста гелиевых блистеров в зоне воздействия высокоэнергетических ионов висмута, обусловлено либо уменьшением концентраций гелия и(или) имплантационных радиационных дефектов, либо структурными изменениями (например, аморфизацией) легированного слоя кремния. С одной стороны, отсутствие структурных изменений в исследованных образцах непосредственно после облучения ионами висмута свидетельствует об отсутствии радиационного нагрева, поэтому трудно предположить факт изменения концентрации радиационных дефектов. С другой стороны, при столь низких дозах облучения высокоэнергетическими ионами висмута не наблюдается структурно-фазовых (аморфизация) изменений монокристаллического кремния. В свете вышесказанного можно предположить, что подавление процесса блистерообразования может быть связано только с уменьшением концентрации атомов гелия за счет их радиационно-индуцированной десорбции из зоны легирования кремния в условиях воздействия ионизационных эффектов от высокоэнергетических ионов висмута. Подобное явление

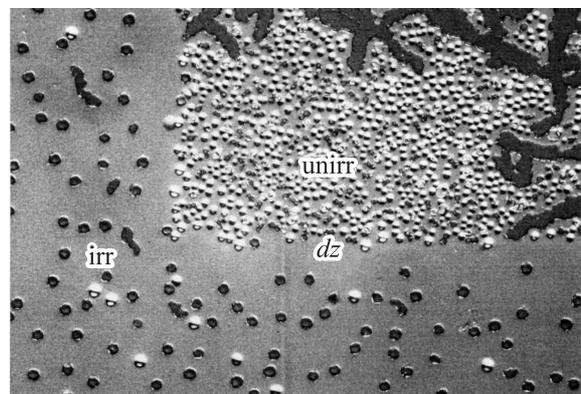


Рис. 4. Блистерно-флэкинговая структура в смежных областях образца кремния, легированного гелием, облученными (irr) и необлученными (unirr) ионами висмута после отжига при 500°C , иллюстрирующая формирование только в облученной области обедненной зоны от блистеров и флэкингов (*dz*).

наблюдалось нами и при облучении кремния, легированного водородом, аналогичными высокоэнергетичными ионами висмута [8,9].

Таким образом, наиболее важный результат проведенного исследования заключается в том, что экспериментально установлено „подавление“ процесса развития гелиевых блистеров в кремнии, облученном высокоэнергетичными ионами висмута. Сделано предположение, что данное явление связано с радиационно-индуцированным выходом гелия из области кремния в зоне воздействия высокоэнергетических ионов висмута. Это представляет интерес не только с точки зрения понимания процессов поведения и состояния инертных газов (практически не растворимых), в частности гелия, в полупроводниковых материалах в рамках реализации условий радиационно-газового скальвания [4], но и в материалах для ядерных и термоядерных реакторов.

Список литературы

- [1] А.Г. Залужный, Ю.Н. Сокурский, В.Н. Тебус. *Гелий в реакторных материалах* (М., Энергоатомиздат, 1988) с. 224.
- [2] В.Ф. Реутов, Ш.Ш. Ибрагимов, О.П. Максимкин и др. *ЖТФ*, **55** (1), 198 (1985).
- [3] В.Ф. Реутов, В.Ф. Чкуасели, Г.Т. Ждан. *ФММ*, **63** (5), 915 (1987).
- [4] В.Ф. Реутов, Ш.Ш. Ибрагимов. А. с. СССР на изобретение № 1282757 (1983).
- [5] M. Bruel. Patent USA № 5 374 564, 1995.
- [6] M. Bruel. *Electron. Lett.* **31** (14), 1201 (1995).
- [7] F. Henley, A. Lamm, S. Kang, Z. Liu, L. Tiam. 23rd Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf., Sept. 1–5, 2008 (Valencia, Spain).
- [8] В.Ф. Реутов, С.Н. Дмитриев. *Письма в ЖТФ*, **23** (5) 41 (2007).
- [9] В.Ф. Реутов, А.Г. Залужный, А.П. Кобзев, А.С. Сохацкий. *ЖТФ*, **79** (9), 63 (2009).

Редактор Т.А. Полянская

Influence ionization energy losses high-energy ions of bismuth on the development of helium blisters in silicon

V.F. Reutov*, S.N. Dmitriev*, A.S. Sohatsky*, A.G. Zaluzhnyi⁺

* Joint Institute for Nuclear Research, Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, 141980 Dubna, Russia

⁺ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia

Abstract Understanding the behavior of helium in solids under conditions of intense ionizing radiation is of particular interest in solving many of the problems of nuclear, fusion and space materials, as well as in microelectronics. The paper describes the observed effect of suppressing the formation of helium blisters on the surface of helium ion-doped silicon as a result of irradiation with high-energy bismuth ions. It is suggested that a possible decrease in the concentration of helium atoms in silicon is due to their radiation-induced desorption from the area of doping in terms of high-impact ionization of bismuth ions.