

05;10;12

Влияние плотности ионизационных потерь энергии высокоэнергетичных ионов висмута, криптона и ксенона на развитие водородных блистеров в кремнии

© В.Ф. Реутов,¹ А.Г. Залужный,² А.П. Кобзев,¹ А.С. Сохацкий¹¹ Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская область, Россия² Институт теоретической и экспериментальной физики,
117218 Москва, Россия
e-mail: reutov@jinr.ru

(Поступило в Редакцию 11 ноября 2008 г.)

Приведены экспериментальные результаты, свидетельствующие о радиационно-индуцированном атермическом выходе водорода из монокристаллического кремния при облучении высокоэнергетичными тяжелыми ионами Bi^+ ($E = 710 \text{ MeV}$), Kr^+ ($E = 85$ и 250 MeV) и Xe^+ ($E = 130 \text{ MeV}$).

Уменьшение концентрации водорода зависит от величины удельных ионизационных потерь энергии высокоэнергетичными тяжелыми ионами. При высоких удельных ионизационных потерях ионами Bi^+ с $E = 710 \text{ MeV}$ (22.5 keV/nm) концентрация водорода уменьшается до значения, не позволяющего визуализировать блистеры в оптическом и электронном микроскопах (по-видимому, до 1 at.% в пике расчетного концентрационного профиля водорода). При средних значениях удельных ионизационных потерь энергии (12.5 keV/nm — облучение ионами Xe^+ с $E = 130 \text{ MeV}$, 9.5 keV/nm — облучение ионами Kr^+ с $E = 250 \text{ MeV}$, 8.5 keV/nm — облучение ионами Kr^+ с $E = 85 \text{ MeV}$) концентрация водорода уменьшается лишь до уровня, не влияющего на формирование блистеров, однако определяющего условия их разрушения, т.е. формирование флэкингов.

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

Введение

Из-за технологической значимости поведение водорода в кремнии широко изучается в течение многих лет. Водород неконтролируемым образом накапливается в кремнии в процессе роста кристалла, во время производства пластин, а также при мокром окислении, травлении и отжиге. Обычно это небольшая концентрация. Целенаправленное накопление высокой концентрации водорода в кремнии происходит при его облучении ускоренными ионами водорода, с целью реализации условия, например, прецизионного радиационно-газового скальвания кремния на тонкие монокристаллические пластинки [1]. Именно эта идея нашла не только практическое применение в развитии производства структур типа „кремний-на-изоляторе“ (КНИ) в так называемой технологии „smart cut“ [2,3], но и вызвала широкий научный интерес.

За последние десять лет появилось огромное число работ, направленных на изучение процесса радиационно-газового (водородного) скальвания не только кремнием, но и других полупроводников [4]. Изучение поведения водородных атомов в кремнии в условиях дополнительного радиационного воздействия является крайне важным. Изучение этого вопроса позволит решить не только проблему уменьшения пороговой дозы облучения ионами водорода (концентрации водорода) для реализации радиационно-газового скальвания, но и решить проблему удаления остаточного водорода из структуры

типа КНИ. Так, в работе [5] использование дополнительного облучения кремния низкоэнергетичными ионами бора или гелия [6], т.е. дополнительное увеличение радиационных дефектов (вакансий), участвующих в зарождении и росте водородных пор, позволило уменьшить дозу облучения водородом практически в пять раз. В данных работах радиационные дефекты создавались за счет упругого взаимодействия бомбардирующих ионов с атомами кремния.

В то же время в работе [7] был обнаружен атермический выход водорода из кремния, легированного ионами водорода, в процессе облучения при комнатной температуре ионами висмута с энергией 710 MeV и дозой $1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Причина возникновения такого явления пока не ясна и требует дополнительных экспериментов. Является данный эффект следствием трековой повреждаемости (проявлением механизма термического пика или кулоновского взрыва) либо прямого ионизационного эффекта на состоянии и миграцию водородных атомов — представляет предмет научного интереса.

Влияние высокоэнергетичного (1 MeV/nucleon) облучения на свойства твердого тела имеет и собственный интерес в научном и прикладном контекстах. С одной стороны, важно найти дополнительные экспериментальные свидетельства проявления того или иного механизма трекообразования („термический пик“ или „кулоновский взрыв“), с другой, установить возможности трекообразования в полупроводниках и, в частности кремнии, что может иметь практическую важность.

В настоящей работе использовались высокоэнергетичные тяжелые ионы Bi, Kr и Xe, ускоренные до различных значений энергий, и следовательно, имеющие различную удельную плотность ионизационных потерь энергии, с целью изучения их роли в поведении водорода в режиме формирования blisterной структуры в кремнии.

Экспериментальная часть

В качестве объекта для исследований был использован кремний, легированный атомами водорода путем облучения ионами водорода с энергией 12.5 keV в ЭЦР-источнике при комнатной температуре. Проектный пробег данных ионов водорода в кремнии составляет около 0.23 μm . Дозы облучения составляли $2 \cdot 10^{16}$, $5 \cdot 10^{16}$ и $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, при этом концентрация водорода в пике расчетного концентрационного профиля (ПРКП) соответственно составляла 4, 10 и 20 at. %.

Последующее облучение при комнатной температуре ионами Bi^+ (710 MeV доза $1.3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) и Kr^+ (250 MeV, доза $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) проводилось на циклотроне У-400М Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), а ионами Kr^+ (85 MeV, доза $1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) и Xe^+ (130 MeV, доза $1 \cdot 10^{13}$, $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) — на циклотроне ИЦ-100 (ОИЯИ). Облучение образцов проводилось через специальные поглощающие маски в виде сетки, что позволило получить на поверхности образца как облученные, так и необлученные участки.

На рис. 1 приведены графики изменения удельной плотности ионизационных потерь в кремнии вдоль пробега высокоэнергетичных ионов. На глубине 0.23 μm удельная плотность ионизационных потерь для используемых ионов составляет 22.5 (Bi^+ — 710), 12.5 (Xe^+ — 130), 9.5 (Kr^+ — 250), 8.5 keV/nm (Kr^+ — 85 MeV).

После облучения ионами водорода и высокоэнергетичными тяжелыми ионами, а также после отжига на воздухе при 500°C в течение 30 min образцы исследовались в оптическом микроскопе в режиме Номарского,

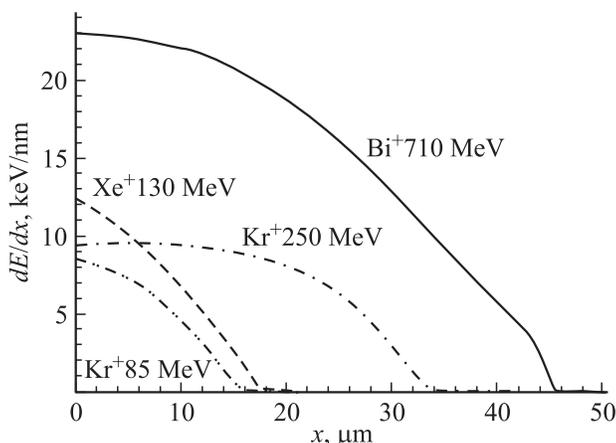


Рис. 1. Изменение плотности ионизационных потерь энергии вдоль пробега ионов Bi^+ , Kr^+ и Xe^+ в кремнии.

который позволяет хорошо контрастировать blisterную структуру на поверхности кремния.

Наряду с этим были проведены сравнительные исследования структуры участков образца, облученных и необлученных высокоэнергетичными частицами с помощью просвечивающего микроскопа (ПЭМ). В качестве объекта для ПЭМ-исследований был выбран образец кремния, легированный водородом и облученный высокоэнергетичными ионами Bi^+ через поглощающие фильтры цилиндрической формы. ПЭМ-образцы химически утонялись по методике, описанной в работе [8].

Глубинные концентрационные профили водорода в образцах кремния, легированного водородом, а также легированного водородом и облученного ионами Kr^+ с $E = 250 \text{ MeV}$ дозой $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ были измерены методом спектроскопии ядер отдачи (EDR-спектроскопия) на электрическом генераторе ЭГ-5 (ОИЯИ). Для этого использовался пучок ионов $^4\text{He}^+$ с энергией 2.30 MeV с интенсивностью порядка 100 nA/cm^2 и поперечным размером 1.5 mm. Пучок ионов $^4\text{He}^+$ бомбардировал образцы, которые устанавливались под углом 15° относительно оси пучка. Одновременно проводились измерения двух спектров: ядер отдачи (протонов) и резерфордовского обратного рассеяния ионов $^4\text{He}^+$.

Детектор ядер отдачи находился под углом 30° к оси пучка налетающих ионов $^4\text{He}^+$. Размер диафрагмы перед детектором был $1.2 \cdot 4.5 \text{ mm}$, а результирующий телесный угол — около $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ sr}$. Непосредственно перед диафрагмой находился алюминиевый фильтр толщиной 6.3 μm , в котором рассеянные ионы $^4\text{He}^+$ тормозились полностью, а ядра отдачи теряли только часть своей энергии. Экспериментальные спектры ядер отдачи сравнивались с расчетными, в которых учитывались все указанные выше экспериментальные условия, а энергия и дифференциальные сечения выхода протонов отдачи рассчитывались по формуле Резерфорда.

Детектор рассеянных ионов $^4\text{He}^+$ находился под углом 135°. Диаметр диафрагмы перед детектором составлял 5 mm, а телесный угол — около $2 \cdot 10^{-3} \text{ sr}$. Спектр рассеянных ионов $^4\text{He}^+$ практически не содержал информации о глубинном профиле изотопов водорода в кремнии, но он позволял весьма точно рассчитать число частиц, падающих на образец за время экспозиции.

В обоих спектрометрических каналах использовались полупроводниковые поверхностно-барьерные детекторы с энергетическим разрешением около 15 keV для энергии α -частиц 5.5 MeV и стандартная электроника с амплитудно-цифровым преобразователем, встроенным в персональный компьютер.

Результаты и их обсуждение

Оптическая микроскопия

После облучения ионами водорода не было отмечено каких-либо структурных изменений на бомбардируемых поверхностных образцах кремния. На рис. 2 приведены

изображения структурных изменений на поверхности образцов кремния, легированных водородом до различной концентрации и отожженных на воздухе при температуре 500°C в течение 30 min, полученные на оптическом (ОМ) и растровом электронном микроскопе (РЭМ).

При концентрации водорода 4 at.% (в ПРКП, доза облучения ионами водорода — $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) не наблюдается сколько-нибудь заметных структурных изменений на облученной поверхности кремния (рис. 2, *a*).

Увеличение концентрации водорода до 10 at.% (в ПРКП, доза $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) вызывает формирование на облученной поверхности блистеров, равномерно распределенных по поверхности (рис. 2, *b*). Средний размер блистеров составляет $1.5 \mu\text{m}$, поверхностная плотность — $1.5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$.

При концентрации водорода 20 at.% (в ПРКП, доза $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$) наряду с образованием блистеров имеет место интенсивное формирование вскрытых блистеров, так называемых флэкингов (рис. 2, *c*). На рис. 2, *d* приведена РЭМ-фотография поверхности кремния с кратерами от флэкингов (на вставке иллюстрируются кратеры с отколотыми крышками блистеров).

Результаты характерных структурных изменений образцов кремния, легированных водородом и облученных высокоэнергетическими ионами Bi^+ , Kr^+ и Xe^+ после отжига на воздухе при 500°C в течение 30 min иллю-

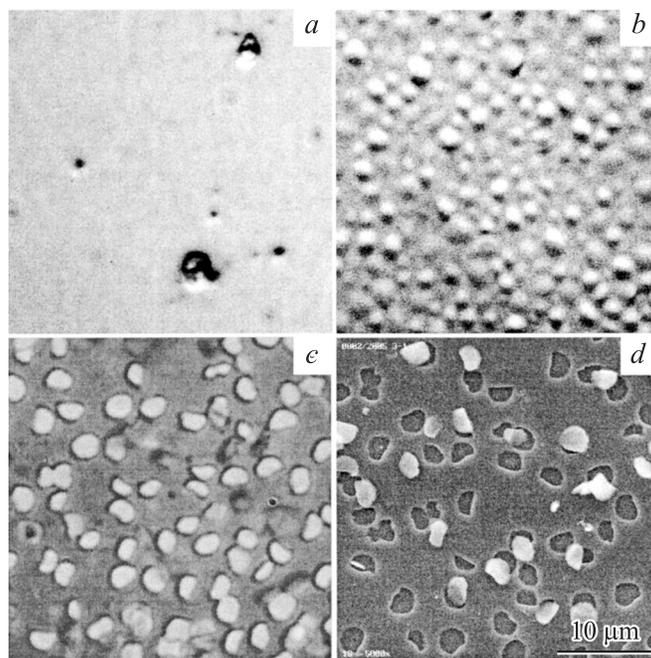


Рис. 2. Структура поверхности образцов кремния, облученных различными дозами ионов водорода и подвергнутых послерадиационному отжигу при 500°C в течение 30 min: *a* — $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ (ОМ-изображение единичных блистеров); *b* — $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ (ОМ-изображение блистеров); *c* — $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ (ОМ-изображение блистеров и флэкингов); *d* — $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ (РЭМ-изображение флэкингов).

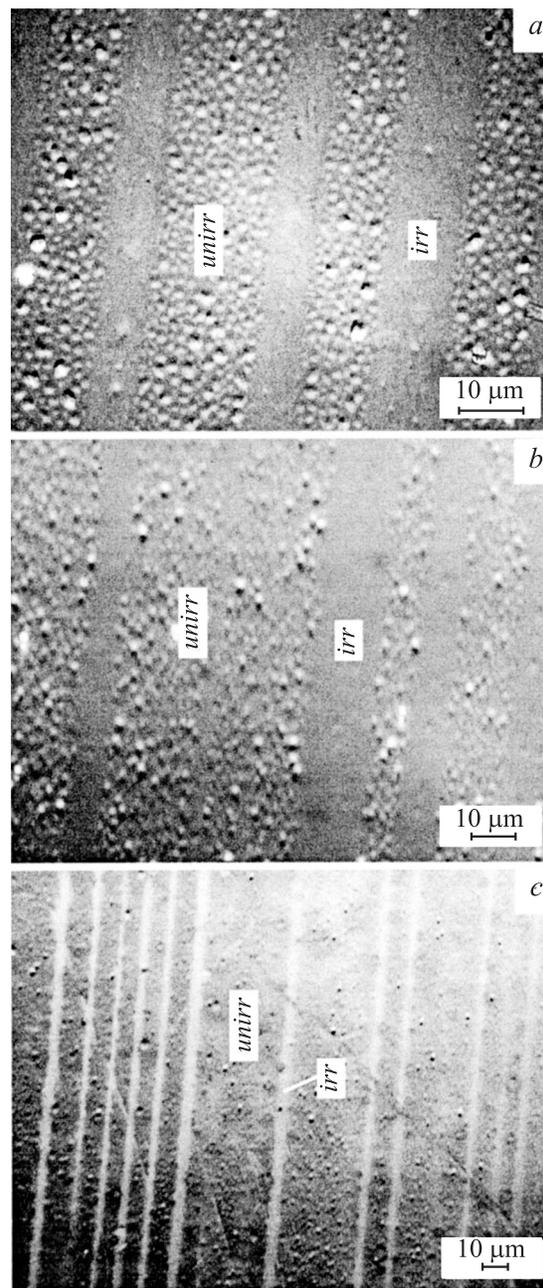


Рис. 3. Структура поверхности образцов кремния с различной концентрацией водорода, облученных ионами висмута с $E = 710 \text{ MeV}$ (доза $1.3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) и подвергнутых послерадиационному отжигу в течение 30 min: *a* — концентрация водорода в пике расчетного концентрационного профиля 10 at.%, температура отжига 500°C; *b* — 10 at.%, 700°C; *c* — 4 at.%, 700°C.

стрируются рис. 3 и 4. Облученные и необлученные участки образцов обозначены здесь и далее как „irr“ и „unirr“ соответственно.

Прежде всего, отметим, что непосредственно после облучения высокоэнергетическими ионами на бомбардируемой поверхности не наблюдалось каких-либо структурных изменений.

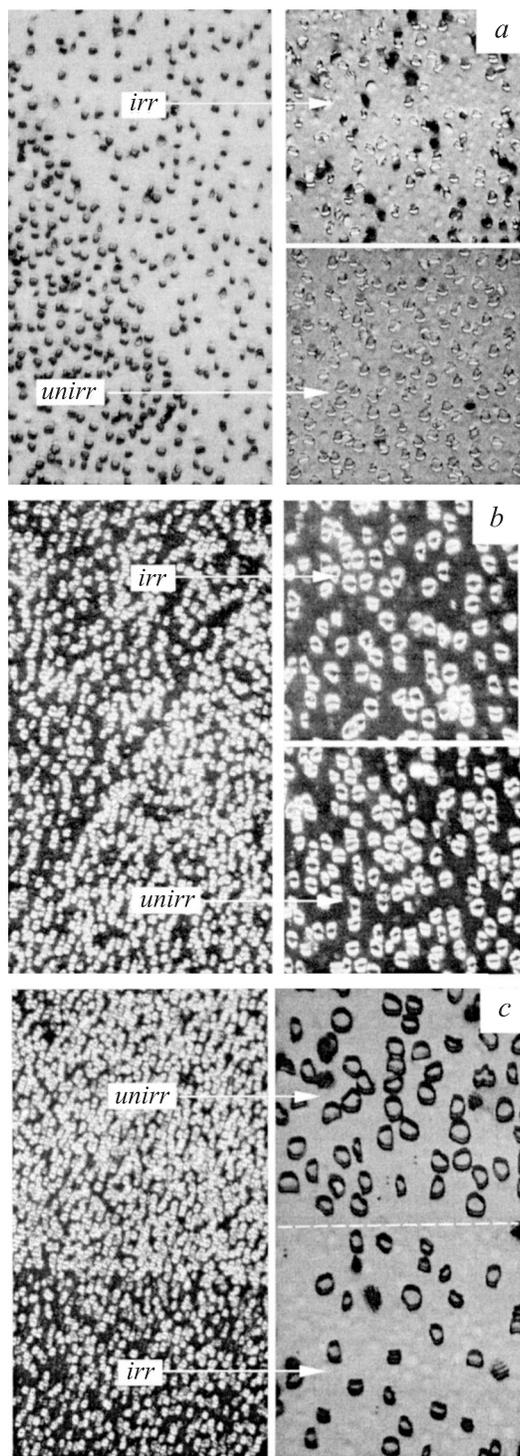


Рис. 4. Структура поверхности образцов кремния, легированных водородом до концентрации 20 at.% в ПРКП и отожженных при 500°C в течение 30 min в облученных и необлученных участках: *a* — облучение ионами криптона с $E = 250$ MeV ($5 \cdot 10^{12}$ cm $^{-2}$); *b* — с $E = 85$ MeV ($1 \cdot 10^{13}$ cm $^{-2}$); *c* — облучение ионами ксенона с $E = 130$ MeV ($1 \cdot 10^{13}$ cm $^{-2}$).

Рис. 3, *a* иллюстрирует характерную блистерную структуру в образце кремния с 10 at.% водорода (в пике) и облученного ионами Bi^+ с $E = 710$ MeV дозой $1.3 \cdot 10^{13}$ cm $^{-2}$. Как и в работе [7], в участках образца,

защищенных от облучения высокоэнергетичными ионами вистмута поглощающей маской, развивается блистерная структура (аналогично структуре, приведенной на рис. 2, *b*), в то время как в облученных участках наблюдается полное отсутствие водородных блистеров.

В то же время отжиг при температуре 500°C образца кремния, облученного ионами Bi^+ , с концентрацией водорода 4 at.% не вызвал образования блистерной структуры как в облученных, так и в необлученных участках (структура аналогична представленной на рис. 2, *c*). Однако заметим, что увеличение температуры отжига до 700°C вызвало образование блистеров в необлученных ионами Bi^+ участках, при этом в облученных участках имеет место их полное отсутствие (рис. 3, *c*). Вместе с этим отметим, что в участках образца кремния с концентрацией водорода 10 at.%, облученных ионами Bi^+ и подвергнутых отжигу при 700°C, эффект отсутствия водородных блистеров сохраняется (рис. 3, *b*).

Таким образом, облучение ионами Bi^+ с $E = 710$ MeV дозой $1.3 \cdot 10^{13}$ cm $^{-2}$ образцов кремния, легированных водородом от 4 до 10 at.% (в ПРКП), вызывает, по-видимому, либо полное удаление водорода из участков образца, подвергнутых воздействию высоких плотностей ионизационных потерь ионов (22.5 keV/nm), либо уменьшение его концентрации, по крайней мере, до уровня меньше 4 at.%, не вызывающей образования блистеров, видимых в оптический микроскоп.

На рис. 4 приведены характерные снимки блистерной структуры образцов кремния, легированных водородом до концентрации 20 at.% (в ПРКП) в участках, как необлученных, так и облученных высокоэнергетичными ионами Xe^+ с $E = 130$ MeV (12.5 keV/nm) (рис. 4, *a*), Kr^+ с $E = 250$ MeV (9.5 keV/nm) (рис. 4, *b*) и $E = 85$ MeV (8.5 keV/nm) (рис. 4, *c*) после отжига при 500°C в течение 30 min. Видно, что в не зависимости от типа и энергии бомбардирующих ионов в образцах кремния, легированных водородом до 20 at.% (в ПРКП), имеет место общая характерная особенность — плотность флэкингов („вскрытых“ блистеров) значительно уменьшается в областях, подвергнутых облучению. При этом плотность блистеров увеличивается, так что общая плотность блистеров и флэкингов, как в облученной, так и необлученной областях, практически сохраняется.

В отличие от облучения ионами Bi^+ в образцах кремния, легированных водородом до концентрации 10 at.% (в ПРКП) и менее, и подвергнутых дополнительному облучению высокоэнергетичными ионами Xe^+ и Kr^+ , не наблюдается изменений в количественном и качественном параметрах блистерной структуры. Облучение ионами, имеющими плотность ионизационных потерь энергии 12.5 keV/nm и менее, не оказывает влияния на состояние и поведение водорода, участвующего в формировании блистерной структуры.

Таким образом, можно предположить, что облучение высокоэнергетичными ионами Kr^+ (85 и 250 MeV) или Xe^+ (130 MeV) оказывает влияние на состояние водорода, которое определяет избыточное давление в

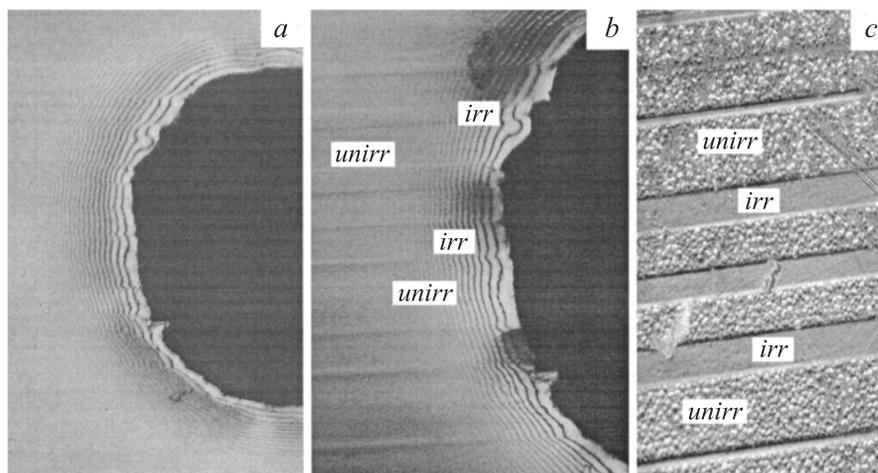


Рис. 5. Оптическая микроскопия структурного состояния в ПЭМ-образце Si, легированного водородом (10 at.% в пике): *a* — после облучения ионами Bi с $E = 710 \text{ MeV}$ ($1.3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$); *b, c* — облучение ионами Bi⁺ с $E = 710 \text{ MeV}$ ($1.3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) и отжиг при 400°C.

блистерах, что, в конечном счете, вызывает механическую неустойчивость материала крышки блистера, т.е. способствует формированию флэкингов.

ПЭМ-исследования

Целью настоящего ПЭМ-исследования являлось установление состояния дефектной структуры, сформированной в кремнии при его легировании низкоэнергетичными ионами водорода, в результате дополнительного облучения высокоэнергетичными ионами Bi⁺.

В качестве объекта для ПЭМ-исследований был выбран образец Si, легированный водородом до 10 at.% (в ПРКП) и подвергнутый облучению ионами Bi⁺ через поглощающие фильтры цилиндрической формы [9] с последующим отжигом при 400°C в течение 10 min. Образец истончался химическим способом по методике [8], что позволило иметь утоненные области (интерференционные линии), включающие как облученные так и необлученные ионами Bi⁺ участки (рис. 5). Отметим, что наличие резкой границы между участками образца с блистерами (unirr) и без блистеров (irr) (рис. 5, *c*) свидетельствует об отсутствии температурного воздействия в участках облучения.

Характерные структурные изменения, наблюдаемые в ПЭМ, приведены на рис. 6. Как видно, вдоль деформационного контура экстинкции, распространяющегося через две зоны с блистерами (необлученные участки Bi⁺) и зону без блистеров (участок, облученный ионами Bi⁺), наблюдаются скопления радиационных дефектов в виде равномерно распределенных кластеров и дислокационных петель. При этом не наблюдается сколько-нибудь заметного различия в их количественном и качественном характере распределения в участках образца, как облученных ионами висмута, так и необлученных. Этот факт, на наш взгляд, позволяет заключить, что высокий уровень удельных ионизационных потерь энергии ионов

Bi⁺ не оказал сколько-нибудь заметного влияния на морфологию и размер скоплений радиационных дефектов, сформированных в Si при облучении низкоэнергетичными ионами водорода.

Таким образом, ПЭМ-результаты, так же как и оптическая микроскопия, свидетельствуют об отсутствии термического эффекта в области воздействия на образец высокоэнергетичных заряженных частиц. Другими сло-

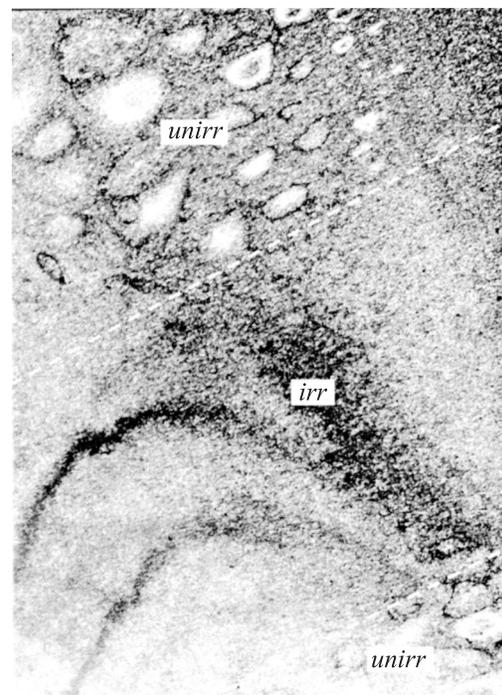


Рис. 6. ПЭМ-изображение радиационных дефектов в кремнии, легированном ионами водорода до концентрации 10 at.% (в ПРКП), в необлученных и облученных ионами висмута с $E = 710 \text{ MeV}$ участках после отжига при 400°C в течение 10 min.

вами, механизм трекообразования, на наш взгляд, ближе к механизму „кулоновского взрыва“, чем к „термическому пику“.

ERD-спектроскопия

В качестве объектов для экспериментального измерения концентрационного профиля водорода вдоль пробега ионов водорода были выбраны образцы кремния, легированные до расчетных концентраций 20 и 10 at.% (в ПРКП), а затем подвергнутые облучению ионами Kr^+ с энергией 250 MeV дозой $1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

Результаты измерений глубинного концентрационного профиля водорода с помощью ERD-спектроскопии упруго рассеянных ионов He^+ в образцах, облученных и необлученных высокоэнергетичными ионами Kr^+ приведены на рис. 7. Прежде всего, следует отметить отсутствие изменений в концентрационном профиле водорода в образцах кремния, легированных до 10 at.%, как облученных, так и необлученных ионами Kr^+ (рис. 7, c). В образце кремния, легированного водородом до 20 at.% и облученного высокоэнергетичными ионами криптона (рис. 7, a), наблюдается практически полуторократное уменьшение концентрации водорода (в ПРКП) по сравнению с необлученным образцом (рис. 7, b).

Таким образом, вышеприведенные результаты ERD-спектроскопии указывают на то, что, во-первых, частичная десорбция водорода из области водородного легирования кремния происходит в процессе облучения при комнатной температуре высокоэнергетичными ионами криптона с энергией 250 MeV дозой $1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ и, во-вторых, десорбции подвергнуты атомы водорода, концентрация которых в образце кремния превышает, по меньшей мере, 10 at.%.

Вышеописанные результаты позволяют выделить следующие обстоятельства.

— Известно, что водород является химически активной примесью и интенсивно взаимодействует с оборванными связями, дефектами в облученном кристалле кремния [10–12]. Такое взаимодействие снижает подвижность водорода в кристаллической решетке полупроводникового кристалла, что препятствует образованию пор непосредственно в процессе облучения. В образцах кремния, легированного водородом до концентрации 10 и 20 at.% в результате облучения ионами водорода, водородные поры образуются только в процессе послерадиационного отжига. Высокое внутреннее давление водорода в порах является движущей силой для анизотропного расширения пузырьков вдоль плоскости, насыщенных атомарным водородом, за счет разрыва относительно слабых Н–Н-связей. Имеет место как вздутие (образование полусфер) так называемых блистеров, так и разрушение крышки блистеров с образованием и отделением чешуек материала (образование открытых блистеров — флэкингов).

— Воздействие интенсивного ионизирующего излучения на данные образцы в процессе облучения при комнатной температуре высокоэнергетичными тяжелыми

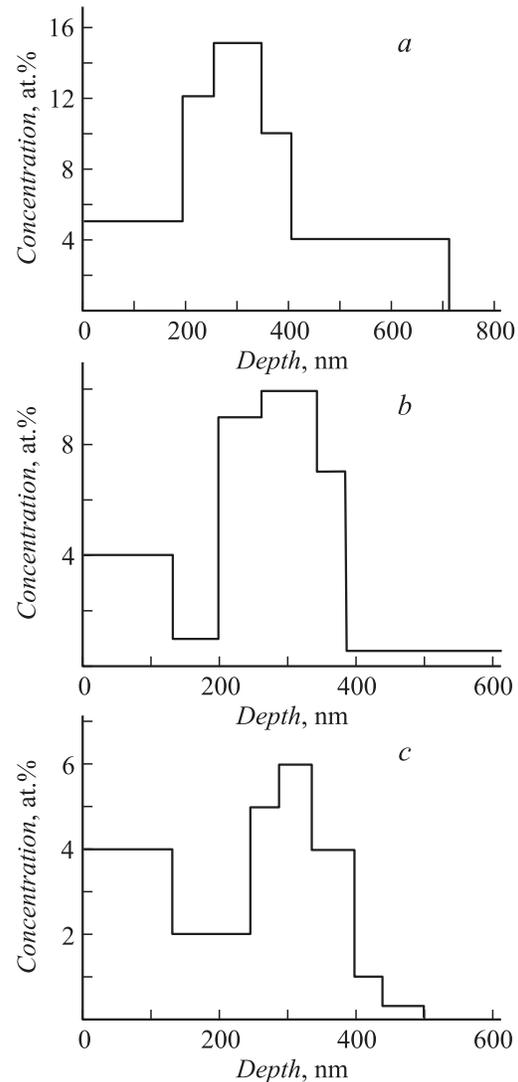


Рис. 7. ERD-спектр концентрации водорода в кремнии вдоль направления пробега протонов с $E = 12.5 \text{ keV}$: *a* — после легирования водородом (концентрация в ПРКП — 20 at.%); *b* — после легирования водородом (20 at.%) и последующего облучения ионами Kr^+ с $E = 250 \text{ MeV}$ дозой $1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$; *c* — после легирования водородом (10 at.%) и последующего облучения ионами Kr^+ с $E = 250 \text{ MeV}$ дозой $1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

ионами вызывает атермический выход водорода. Атермическая миграция подтверждается как фактом сохранения скоплений радиационных дефектов, сформированных в процессе ионного легирования кремния водородом, так и фактом отсутствия градиентов в размере и плотности блистеров вблизи границы между облученными и необлученными участками образца. При этом уменьшение концентрации водорода непосредственно после облучения высокоэнергетичными ионами, зафиксированное ERD-спектроскопией, свидетельствует о факте миграции водорода в процессе облучения.

— Выход водорода свидетельствует о сильном нарушении термического квазиравновесия между водородной подсистемой и кристаллической решеткой, а также о

снятии поверхностного потенциального барьера на пути выхода водорода с поверхности. При этом наблюдаемые особенности выхода водорода зависят от величины удельных ионизационных потерь высокоэнергетическими ионами. Так, при величине удельных энергетических потерь 8,5, 9,5 и 12,5 keV/nm (облучение соответственно ионами Kr^+ с энергиями 85 и 250 MeV и ионами He^+ с $E = 130$ MeV) удаляется водород, влияющий только на формирование флэкингов, т.е. на состояние водорода, определяющего избыточное давление в блистерах. При величине удельных энергетических потерь 22,5 keV/nm (облучение ионами Bi^+ с $E = 710$ MeV) удаляется весь водород, участвующий в формировании блистеров, т.е. влияющих на состояние водорода, определяющего избыточное давление в водородных нанопорах.

Исходя из вышесказанного можно предположить, что, во-первых, в формировании блистеров и флэкингов участвует водород в различных, по-видимому, в атомарном и молекулярном состояниях соответственно. Во-вторых, вероятно, существует пороговая величина удельных ионизационных потерь энергии, которая вызывает ионно-индуцированную миграцию определенных комплексов водорода (энергия на развал комплекса и на последующую миграцию водорода).

Известно, что после высокодозной имплантации протонов водород в кремнии разделяется на водород в решетке и водород в порах/трещинах и может находиться в атомарном и молекулярном состояниях [13,14], образовывать кремний-водородные связи [15–17], связываться с протяженными дефектами, образующимися в плоскостях (100), (111). Большинство водорода в радиационно поврежденной решетке кремния — это водород в H-связанных комплексах, стабильность которых зависит от типа комплекса. Во время отжига некоторые из них объединяются и превращаются в другие виды комплексов, H_2 -молекулы, атомарный водород.

Атомарный водород занимает различные междоузельные положения и может иметь различные зарядовые состояния. Атомарный водород весьма подвижен, причем коэффициент диффузии положительно заряженных ионов водорода больше, чем отрицательно заряженных или нейтральных [18].

Молекулярный водород также занимает междоузельное положение. При этом существует обычная неподвижная молекула H_2 или подвижная квазимолекула H_2 [18,19]. Молекула H_2 стабильна только в случае, когда окружена достаточно совершенными Si–Si-связями [19]. Если молекула растянута, искажена или рядом находятся слабые Si–Si-связи, то они диссоциируют с большим выигрышем энергии.

В процессе постимплантационного отжига происходит распад кремний-водородных комплексов [15] и начинается образование кластеров молекулярного водорода, состоящих из четырех его молекул [20].

До температуры отжига около 400°C водород сохраняется в порах при высоком давлении (до 10^9 Pa). При дальнейшем повышении температуры постимплантационного отжига водород диффундирует в кристалл и при $T > 700^\circ C$ уходит из пор полностью [21–23].

Все вышесказанное и настоящие результаты, к сожалению, не позволяют объяснить наблюдаемый эффект атермической миграции водорода в том или ином состоянии через объем кристалла кремния с высокой плотностью скоплений радиационных дефектов. В этой связи последующие эксперименты должны быть направлены на определение состояний водорода в кремнии с радиационными дефектами и изучение влияния ионизирующего излучения на изменение обнаруженных состояний.

Тем не менее можно предположить, что движущей силой миграции водорода в высокоэнергетичном ионизационном поле, на наш взгляд, может быть электростатическое „выталкивание“ ионов H^+ из ионизированного высокоэнергетическими тяжелыми ионами объема кремния. При этом, по-видимому, ионизируются все или почти все атомы, присутствующие в облучаемом объеме материала.

Заключение

Вышеприведенные результаты исследований влияния высокого уровня ионизационного излучения на развитие водородной пористости в кремнии позволяют сделать следующие обобщения.

— Имплантация ускоренных ионов водорода вызывает формирование в облученном слое кремния радиационных дефектов и накопление водорода. После имплантации не наблюдается формирование водородных пор. Образование водородных пор в виде блистеров и флэкингов имеет место только в результате послерадиационного отжига.

— Не наблюдается каких-либо заметных изменений в структуре имплантированного водородом слое кремния непосредственно после дополнительного воздействия на него интенсивным ионизирующим излучением при облучении высокоэнергетическими тяжелыми ионами. Визуализация воздействия ионизирующего излучения регистрируется только в образцах, подвергнутых послерадиационному отжигу, по наблюдаемым в оптическом микроскопе особенностям в изменении водородной пористости в виде блистеров и флэкингов в результате уменьшения концентрации водорода.

— Уменьшение концентрации (удаление) водорода зависит от величины удельных ионизационных потерь высокоэнергетических тяжелых ионов. При высоких удельных потерях ионами Bi^+ с $E = 710$ MeV (22,5 keV/nm) концентрация водорода уменьшается, по-видимому, до значения около 1 at.% в ПРКП, что не позволяет визуализировать блистеры в оптическом микроскопе.

При средних значениях удельных ионизационных потерь ионами He^+ с $E = 130$ MeV, Kr^+ с $E = 250$ MeV и Kr^+ с $E = 85$ MeV (12,5 keV/nm и менее) концентрация водорода уменьшается лишь до уровня (по-видимому, до 10 at.% в ПРКП), не влияющего на формирование блистеров. Подобное ионизирующее излучение оказывает заметное влияние только на концентрацию (состояние) водорода, определяющего условия (избыточное

давление) разрушения блистеров, т.е. формирование флэкингов.

— Сохранение радиационных дефектов, образованных в процессе ионной имплантации водорода, отсутствие изменений в размере и плотности блистеров на границе между облученными и необлученными участками свидетельствуют об атермическом процессе удаления водорода из радиационно поврежденного слоя кремния в процессе облучения высокоэнергетичными тяжелыми ионами.

Список литературы

- [1] Реутов В.Ф., Ибрагимов Ш.Ш. Способ изготовления тонких пластин кремния. А.с. СССР № 1282757. 30.12.1983.
- [2] Bruel M. Patent USA № 5 374 564. 1995.
- [3] Bruel M. // Electron. Lett. 1995. Vol. 31. N 14. P. 1201–1202.
- [4] Tong Q.-Y., Gutjar K., Hopfe S., Gosele U., Lee T.-H. // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 70. N 11. P. 1390–1392.
- [5] Tong Q.Y., Scholz R., Gosele U. // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 72. N 1. P. 49–51.
- [6] Agarwall A., Haynes T.E. // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 72. N 9. P. 1086–1088.
- [7] Реутов В.Ф., Дмитриев С.Н. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 5. С. 41–45.
- [8] Реутов В.Ф., Реутов И.В. Способ изготовления образца для электронно-микроскопических исследований и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2186359. 27.7.2002.
- [9] Reutov V.F. // J. Nucl. Mater. 1996. Vol. 233–237. P. 1586–1589.
- [10] Вавилов В.С., Киселев В.Ф., Мукашев Ю.Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. М.: Наука, 1990. 216 с.
- [11] Fink D., Krauser J., Nagengast D. et al. // Appl. Phys. A. 1995. Vol. 61. N 4. P. 381–389.
- [12] Brice D.K., Doyle B.L. // Nucl. Mater. 1981. Vol. 103–104. P. 503–508.
- [13] Jeng S.J., Oehrlein G.S. // Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 50. N 26. P. 1912–1914.
- [14] Jeng S.J., Oehrlein G.S., Scilla G.J. // Appl. Phys. Lett. 1988. Vol. 53. N 18. P. 1735–1737.
- [15] Gerasimenko N.N., Rolle M., Cheng Li-Jen et al. // Phys. Stat. Sol. (b). 1978. Vol. 90. P. 689–695.
- [16] Keinonen P., Hautala M., Rauhala E. et al. // Phys. Rev. B. 1988. Vol. 37. N 9. P. 8269–8274.
- [17] Brusa R.S., Duarte Naia M., Zecca A. et al. // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 49. N 11. P. 7271–7280.
- [18] Александров П.А., Баранова Е.К., Баранова И.В. и др. // Тр. IX Межнац. совещ. „Радиационная физика твердого тела“. Севастополь, 1999. М.: МИЭМ, 1999. Т. 1. С. 330–337.
- [19] Estreher S.K., Hastings J.L., Fedders P.A. // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57. N 20. P. 12663–12666.
- [20] Cerofolini C.E., Meda L., Balboni R. et al. // Phys. Rev. B. 1992. Vol. 46. P. 2061–2070.
- [21] Wong-Leung J., Ascheron C.E., Petravic M. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 66. P. 1231–1233.
- [22] Lu X., Cheung N.W., Strathman M.D. et al. // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71. P. 1804–1806.
- [23] Ascheron C., Riede V., Sobata H., Neumann H. // Radiat. Eff. Def. Solids. 1990. Vol. 115. P. 145–155.