

УДК 621.039.53

СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ ПОРОГОВОЙ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ ВОДОРОДА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ БЛИСТЕРОВ В КРЕМНИИ

© 2018 г. В. Ф. Реутов^а, *, С. Н. Дмитриев^а, А. Г. Залужный^б^а Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6^б Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

* e-mail: reutov@jinr.ru

Поступила в редакцию 04.04.2017 г.

После доработки 06.10.2017 г.

Рассматриваются условия уменьшения пороговой дозы радиационно-газового скалывания монокристалла кремния путем использования в едином производственном цикле двухэтапного облучения ионами водорода фиксированной энергии. Экспериментально установлено, что в образце в режиме двухэтапного его облучения ионами водорода с $E = 12.5$ кэВ дозой $0.5 \cdot 10^{16}$ см⁻² при нормальном угле падения частиц на первом этапе, а затем дозой $1 \cdot 10^{16}$ см⁻² под углом 32° на втором этапе (суммарная доза $1.5 \cdot 10^{16}$ см⁻²) формируется хорошо развитая блистерная структура, подобная структуре в образце, облученном в режиме одноэтапного облучения до дозы $5 \cdot 10^{16}$ см⁻². Это свидетельствует о реализации условий более чем трехкратного понижения порога образования водородных блистеров в кремнии при двухэтапном облучении ионами водорода одной энергии в едином производственном цикле.

DOI: 10.7868/S0032816218020210

ВВЕДЕНИЕ

С момента изобретения радиационно-газового скалывания монокристаллического кремния [1] по результатам многочисленных экспериментов предложены и развиты оригинальные технологии производства структур типа “кремний на изоляторе” [2, 3] и безотходного производства тонкопленочного “солнечного кремния” [4]. При этом установлено, что склонность монокристалла к радиационно-газовому скалыванию можно контролировать по факту образования соответствующей структуры блистеров. Это дало основание считать, что основные эффекты поведения атомов газа, отвечающих за данное явление, в частности условия развития водородных блистеров, идентифицированы. Тем не менее, еще остаются нерешенные проблемы, сдерживающие дальнейшее развитие метода радиационно-газового скалывания в безотходном производстве монокристаллических пластин. В частности, это необходимость по меньшей мере двукратного уменьшения дозы облучения (увеличение производительности), а также реализация методологии скалывания пластин толщиной менее 100 нм (нанотехнология) с шероховатостью ~ 1 нм.

Образование блистеров — это пороговое явление и требует обеспечения определенной дозы

облучения ионами атомов газа [5]. Проведенные исследования позволили установить оптимальную величину дозы облучения кремния ионами атомарного водорода, составляющую $\sim 0.4 \cdot 10^{17}$ см⁻², а также температуру послерадиационного отжига, равную $400\text{--}550^\circ\text{C}$ [6, 7]. При этом установлено, что для сохранения в материале в процессе облучения максимального количества внедренного водорода в области ионно-легированного слоя надо обеспечить условия минимизации радиационного нагрева кремниевой пластины. Это условие ограничивает интенсивность пучка ионов величиной ≤ 100 мкА/(см² · с), а следовательно, и производительность метода радиационно-газового скалывания [3].

На основании многих экспериментальных данных найден способ уменьшения пороговой дозы облучения практически в два раза путем использования двухэтапного облучения ионами водорода и более тяжелыми ионами, например ионами гелия или бора [8]. Авторы [8] исходили из того, что чем больше концентрация радиационных дефектов в области легирования водородом, тем эффективней идет процесс зарождения и роста газовых пор. Однако эта гипотеза не подтверждается результатами сравнительного эксперимента с использованием облучения кремния

ионами водорода и дейтерия [6]. Так, несмотря на то что при облучении ионами дейтерия образуется практически в три раза больше радиационных дефектов, чем при облучении водородом, тем не менее, пороговая доза облучения для образования блистеров значительно выше.

Однако положительный эффект от двухэтапного облучения различными ионами значительно снижается из-за усложнения технологии и увеличения трудоемкости на этапе облучения вследствие необходимости изменений не только бомбардирующих ионов, но и режимов формирования ионного пучка и его ускорения.

Ряд исследователей полагают, что не весь имплантированный водород участвует в образовании блистеров. Действительно, в работе [9] показано, что в развитии блистерной структуры участвует только треть внедренного водорода. Остальные две трети удаляются из образца в процессах облучения и послерадиационного отжига. Есть основание полагать, что радиационные дефекты (вакансии) не только оказывают значительное влияние на процессы зарождения и эволюцию газовой пористости, но и, являясь ловушками для атомов водорода [10], препятствуют его миграции из профиля ионного легирования в процессе облучения и/или послерадиационного отжига. В связи с этим, на наш взгляд, альтернативным способом повышения производительности метода радиационно-газового скалывания монокристаллических пластин на этапе облучения (уменьшение дозы облучения при сохранении оптимальной интенсивности пучка ионов, исключая радиационный нагрев) является повышение эффективности удержания в имплантированном слое максимального количества имплантированного газа, участвующего в процессе скалывания.

В связи с этим можно предположить, что увеличение доли водорода, участвующего в блистерообразовании, возможно в случае, когда концентрационный профиль ионного легирования будет формироваться в уже предварительно радиационно-поврежденном объеме объекта. По нашему мнению, условия наложения профиля ионного легирования на область радиационного повреждения можно реализовать на практике в режиме двухэтапного одноэлементного облучения при поэтапном изменении либо энергии ионов, либо углов бомбардировки. Заметим, что использование режима изменения энергии бомбардирующих ионов менее эффективно (манипуляция с режимами ускорения), чем режим облучения при различных углах падения частиц (манипуляция только с образцами).

В настоящей работе рассматриваются условия уменьшения пороговой дозы радиационно-газового скалывания путем использования двухэтапного облучения объекта, но при условии исполь-

зования в едином производственном цикле ионов только одного типа, например ионов водорода. Суть метода – поэтапное облучение объекта ионами водорода при различных углах падения частиц на поверхность образца с целью наложения максимума формируемого концентрационного профиля водорода при вторичном облучении на максимум концентрационного профиля радиационных дефектов от первичного этапа облучения.

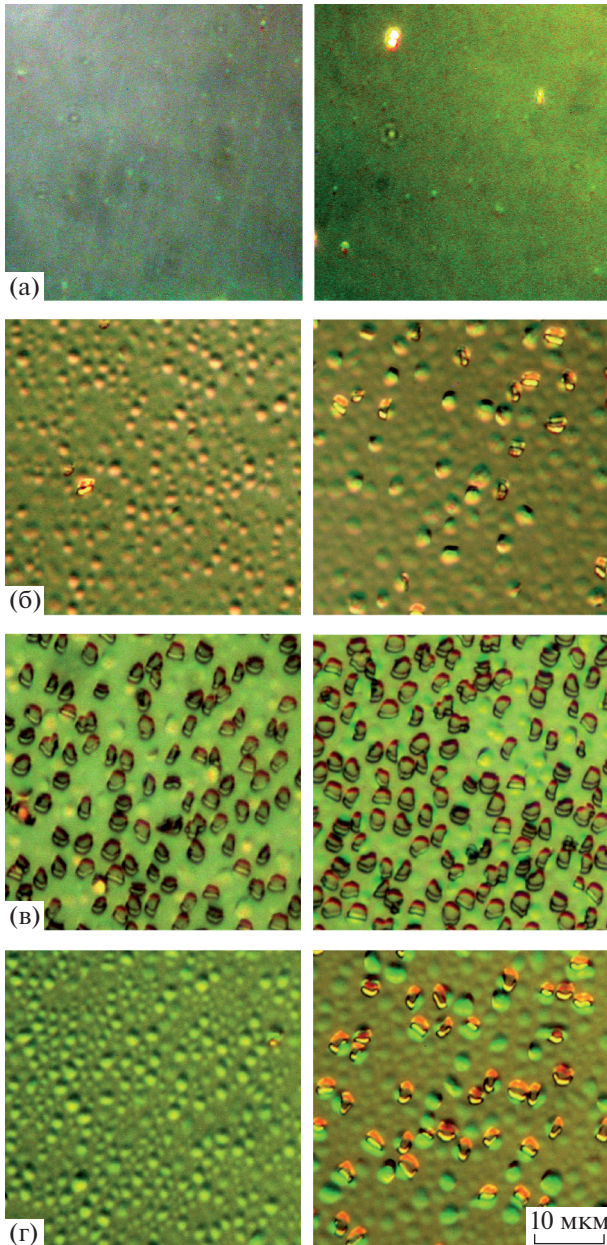
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Известно, что по мере торможения ионов в объекте формируются концентрационные профили ионного легирования и радиационного повреждения, которые в первом приближении хорошо описываются функцией Гаусса. Теоретически и экспериментально показано, что концентрационный профиль радиационного повреждения при ионной имплантации располагается ближе к бомбардируемой поверхности, чем концентрационный профиль ионного легирования.

В связи с этим для наложения на концентрационный профиль распределения радиационных дефектов, полученного после первого этапа облучения, концентрационного профиля распределения атомов водорода после второго этапа облучения необходимо рассчитать, на какой угол нужно повернуть облучаемый материал. Простые расчеты для случая облучения кремния ионами водорода с $E = 12.5$ кэВ показывают, что искомым углом поворота объекта определяется по формуле $\beta = \arccos(R_d(0^\circ)/R_H(0^\circ))$ и составляет $\beta = 32^\circ$. Здесь $R_d(0^\circ)$ и $R_H(0^\circ)$ – соответственно глубины залегания максимумов пиков концентрационного профиля радиационных дефектов и концентрационного профиля водорода при нормальном угле падения частиц на образец.

На первом этапе объект облучается пучком ионов водорода, направленным перпендикулярно к его поверхности, тем самым формируется концентрационный профиль радиационных дефектов. На втором этапе объект облучается под заданным углом, обеспечивающим условие наложения концентрационного профиля ионного легирования на ранее созданный профиль радиационных дефектов.

Критерии, определяющие возможность оценить время облучения на каждом этапе двухэтапного облучения, пока не ясны, поскольку неоднозначно определена граница скола. Одни исследователи утверждают, что граница скола проходит по максимуму концентрации водорода [11], другие – по максимуму повреждения [12] или по проективному пробегу [13]. В нашем случае наложение энергетических профилей повреждения и легирования при двухэтапном облучении еще больше



Полученные с использованием метода микроскопии Номарского изображения структуры образцов кремния, облученных ионами водорода с $E = 12.5$ кэВ дозами: **а** – $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($\beta = 0^\circ$); **б** – $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($\beta = 0^\circ$); **в** – $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ($\beta = 0^\circ$); **г** – $0.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($\beta = 0^\circ$) + $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($\beta = 32^\circ$) – после отжига в течение 30 мин при 500°C (слева) и 800°C (справа).

осложняет теоретическое решение данной проблемы. В связи с этим время облучения под заданным углом определено эмпирически, исходя из необходимых и достаточных условий достижения эффективности процесса. Во-первых, общее время двухэтапного облучения должно быть, как минимум, в два-три раза меньше времени одно-

этапного облучения до пороговой дозы блистерообразования. Во-вторых, время второго этапа облучения должно быть, по крайней мере, в два раза больше первого этапа облучения.

Для экспериментальной проверки обоснованности вышесказанного были проведены исследования особенностей блистерообразования в образцах кремния как после одноэтапного облучения ионами водорода с $E = 12.5$ кэВ дозами: $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (допороговая), $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (пороговая) и $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (надпороговая), так и после двухэтапного облучения сначала дозой $0.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при $\beta = 0^\circ$, а затем дозой $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при $\beta = 32^\circ$ (суммарная доза $1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$).

После облучения образцы отжигались на воздухе при температурах 500°C и 800°C в течение 30 мин и исследовались оптическим микроскопом с использованием метода Номарского для визуализации блистерной структуры. Фотографии структурных изменений в исследуемых образцах после отжигов приведены на рисунке.

Прежде всего, отметим, что в образцах, облученных дозой $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, не наблюдаются какие-либо структурные изменения ни при 500°C , ни при 800°C (см. рис. (а)). Действительно, данная доза облучения ниже пороговой дозы для блистерообразования.

При дозе облучения $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в образце наблюдаются в основном водородные блистеры (см. рис. (б)), в то время как при дозе $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, наряду с блистерами, наблюдаются еще и флэкинги (см. рис. (в)).

В образце, облученном в двухэтапном режиме суммарной дозой $1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (см. рис. (г)), т.е. ниже допороговой дозы блистерообразования для одноэтапного облучения, тем не менее, формируется хорошо развитая блистерная структура, подобная структуре в образце, облученном в одноэтапном режиме ионами водорода дозой $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Особо отметим, что отжиг образцов при 800°C не привел к заметным изменениям морфологии и размера блистерно-флэкинговой структуры. Этот факт свидетельствует о том, что все процессы, связанные с развитием водородной пористости, прошли до 500°C .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вышеописанные результаты достаточно убедительно свидетельствуют о реализации, по крайней мере, более чем трехкратного понижения концентрационного порога образования водородных блистеров в кремнии при одноэлементном двухэтапном облучении ионами водорода одной энергии в едином производственном цикле.

Попеременное облучение объекта (кремния) ионами водорода при двух углах падения частиц

на поверхность образца создает благоприятные условия для захвата атомов водорода радиационными дефектами, поскольку их накопление происходит в поле уже сформированных комплексов радиационных дефектов. Это способствует не только образованию малоподвижных при температуре облучения водород-вакансионных комплексов, являющихся центрами зарождения водородных пор в процессе послерадиационного отжига, но и эффективной задержке водорода в профиле повреждения. Именно эти обстоятельства, по-видимому, и являются основой для многократного снижения пороговой дозы облучения для реализации условий радиационно-газового скалывания монокристаллических полупроводников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Реутов В.Ф., Ибрагимов Ш.Ш.* А.с. № 1282757 СССР // БИ. 2000. № 18.
2. *Bruel M.* Patent USA № 5 374 564. H01L021/76. 1995.
3. *Bruel M.* // Electronics Letters. 1995. V. 31. № 14. P. 1201.
4. *Henley F., Lamm A., Kang S., Liu Z., Tiam L.* // Proc. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference. (Valencia, Spain, 1–5 September 2008). P. 1090.
5. *Залужный А.Г., Сокурский С.Н., Тебус В.Н.* // В кн. "Гелий в реакторных материалах". М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 160.
6. *Moutanabbir O., Giguere A., Terreault B.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 3286.
7. *Lie X., Cheung N.W., Strathman M.D., Chu P.K., Doele B.* // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. P. 1804.
8. *Agarwal A., Haynes T.E.* // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72 (9). P. 1086.
9. *Weldon M.K., Marsico V.E., Chabal Y.J., Agarwal A., Eaglesham D.J.* // J. Vac. Sci. Technol. 1997. № 15. P. 1065.
10. *Залужный А.Г., Копытин В.П., Козодаев М.А., Суворов А.Л.* // Ядерная физика. 2005. Т. 68. № 8. С. 1.
11. *Bedell Stephen W., Lanford William A.* // Journal of Applied Physics. 2001. V. 90. № 3. P. 1139.
12. *Hochbauer T., Misra A., Nastasi M., Mayer J.W.* // Journal of Applied Physics. 2002. V. 92. № 5. P. 2335.
13. *Desrosiers N., Terreault B.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 151922.