

2. Методы измерения твердости материалов (обзор) / Е. И. Орешко [и др.] // Труды ВИАМ. – 2020. – № 1. – С. 101–117.

3. Структура и оптические свойства покрытий алмазоподобного углерода / Н. М. Чекан [и др.] // Изв. НАН Беларуси. Сер. Физ.-тех. наук. – 2018. – Т. 63. – № 3. – С. 280–289.

4. Княжев, Ф. Р. Обзор возможностей применение алмазоподобных пленок в различных отраслях / Ф. Р. Княжев, М. М. Сергеевна // Материалы конференций ГНИИ «НАЦРАЗВИТИЕ» апрель 2021. – 2021. – С. 28.

УДК 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ СФЕРАОБРАЗНЫХ НАНОСТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ В ОБЪЕМЕ ПЛАСТИН МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Францкевич А.В., Францкевич Н.В., Мартинович В.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Основная идея представляемой работы – исследовать условия получения и свойства сфераобразных наноструктур, формируемых в объеме пластин монокристаллического кремния. Стандартные пластины Cz-Si, n типа имплантировались ионами водорода при разных температурах и разными дозами. Формирование объемных наноструктур, происходило в результате обработки образцов в DC плазме водорода, при температуре не выше 300 °С. Полученные структуры исследовались методами СЭМ и комбинационного рассеяния. СЭМ-исследование проводилось как в режиме вторичных электронов (SE), так и в режиме поверхностно-индуцированного потенциала (SEBIV). Исследования показали, что в приповерхностном слое кремниевых пластин формируются сфераобразные (пузырьковые) наноструктуры. Данные комбинационного рассеяния позволяют предположить о накоплении, в полученных структурах, газообразного водорода.

Ключевые слова: кремний, сфераобразные наноструктуры, водород.

STUDY OF THE SPHERE OF SHAPED NANOSTRUCTURES FORMED IN THE VOLUME OF MONOCRYSTAL SILICON PLATES

Frantskevich A., Frantskevich N., Martinovich V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Annotation. The main idea of this work is to investigate the conditions for the preparation and properties of sphere-shaped nanostructures formed in the bulk of single-crystal silicon wafers. Standard Cz-Si, n type plates were implanted with hydrogen ions at different temperatures and different doses. The formation of bulk nanostructures occurred as a result of processing the samples in DC hydrogen plasma at a temperature not higher than 300 °C. The resulting structures were investigated by SEM and Raman scattering methods. The SEM study was carried out both in the secondary electron (SE) mode and in the surface-induced potential (SEBIV) mode. Studies have shown that sphere-shaped (bubble) nanostructures are formed in the near-surface layer of silicon wafers. Raman scattering data suggest the accumulation of hydrogen gas in the resulting structures.

Key words: silicon, spherical nanostructures, hydrogen.

e-mail: N_Frantskevich@bntu.by

Введение. Эффект образования протяженных дефектов в конструкционных материалах, при содержании в них водорода или гелия с концентрацией 5–10 атомных процента известен достаточно давно [1]. В микроэлектронной технологии практическое применение данного эффекта – отщепление тонких слоев кристаллических материалов по технологии Smart-Cut [2]. Авторами статьи, была показана принципиальная возможность создания структур типа кремний/оксид кремния на месте протяженных дефектов [3]. Данные структуры можно формировать на определенной глубине, в виде систем вертикальных нанотрубок, или конических структур на поверхности. Одно из возможных практических приме-

нений указанных выше структур – это увеличение эффективности солнечных элементов. Но на пути успешной коммерческой реализации данной технологии есть следующее препятствие – сравнительно высокие дозы имплантированного водорода или гелия, что в значительной степени влияет на себестоимость конечного изделия. В связи с этим актуальным вопросом в разрабатываемой технологии было снижение дозы имплантированных ионов. Решение данного вопроса возможно за счет частичной замены сравнительно дорогостоящей технологической операции – имплантации, на более дешевую – плазменную обработку, при двух стадийном процессе. На первом этапе имплантацией водорода или гелия, при дозах им-

плантации $1 \cdot 10^{14}$ – $5 \cdot 10^{15}$ ат.\(\text{см}^2\) формируется слой первичных дефектов. На слой первичных дефектов, производится геттерирование водорода, вводимого в кремний из DC плазмы. В дальнейшем, введенный дополнительно водород, формирует протяженные дефекты с необходим распределением по объему или поверхности. Экспериментальное исследование возможных условий обработки, при которых реализуется предложенный подход, а так же получаемые наноструктуры, изучались в данной работе.

Эксперимент. В первой серии образцов использовались стандартные пластины *n*-типа 4,5 $\Omega \cdot \text{см}$ Cz Si. Данные образцы имплантировались протонами при комнатной температуре с энергией 100 keV флюенсом $1 \cdot 10^{16}$, $2 \cdot 10^{16}$ или $4 \cdot 10^{16}$ ат.\(\text{см}^2\). Во второй серии образцов, пластины кремния аналогичные используемым в первой серии, имплантировались протонами при температурах 150, 300, 400 или 500 °C. Флюенс ионов составлял $1 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15}$ или $5 \cdot 10^{15}$ ат.\(\text{см}^2\) для каждой из температур. После создания первичного дефектного слоя, водород вводился в кремний из DC плазмы при 150 °C. Спектры комбинационного рассеяния снимались при комнатной температуре с использованием газового Ar^+ лазера с длиной волны 488 нм и выходной мощностью 20 мВт. Образ поверхности образцов, а так же глубинных наноструктур, был получен в СЭМ, в режиме вторичных электронов (SE) и в режиме поверхностно индуцированного потенциала (SEBIV), соответственно.

Результат. На рис. 1, *a* и *б* представлен типичный образ поверхности и структура сфера образных нано-структур, полученные в СЭМ, в режиме SE (*a*) и SEBIV (*б*), от образцов кремния из первой серии.

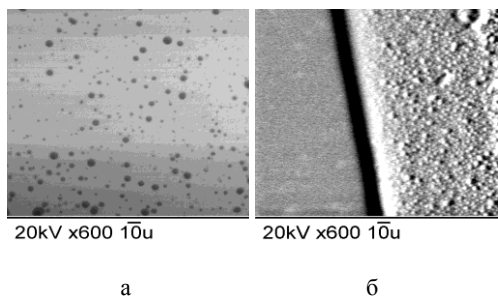


Рисунок 1 – Типичный образ поверхности, для первой серии образцов, полученный в СЭМ, в режиме SE (*a*) и SEBIV (*б*)

При проведении эксперимента, для установления однозначной зависимости, что сфера образные наноструктуры, формируются именно в области с предварительно созданным дефектным слоем, использовались образцы содержащие две области, не имплантированную, и имплантированную. Как видно из результатов представленных на рис. 1, *б*, наблюдаются две области, содержащие сфера образные структуры, и без них.

Доказательством того, что данные структуры образуются именно в имплантированных областях, является то что, в исходных, не имплантированных образцах, подобных структур не наблюдалось. Кроме этого, размер образований зависит от флюенса предимплантированных протонов. С увеличением флюенса, диаметр сфер увеличивается.

Для первой и второй серии образцов, а так же исходных, не имплантированных но обработанных в плазме водорода образцов, проводилось снятие спектров комбинационного рассеяния. Проведенные исследования показали, что для исследуемых образцов форма и положение основной линии кремния (521 см^{-1}) практически не зависят от температуры образцов во время имплантации. Для образцов имплантированных дозами $1 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15}$ или $5 \cdot 10^{15}$ при температуре 300 °C и обработанных в плазме водорода при 150 °C, спектры комбинационного рассеяния, нормализованные по основной линии кремния, для спектрального диапазона в областях LVM сопоставляемых SiH связям (*a*) и водородной молекуле H_2 (3800 – 4400 см^{-1}), представлены на рис. 2 (*a*, *б*).

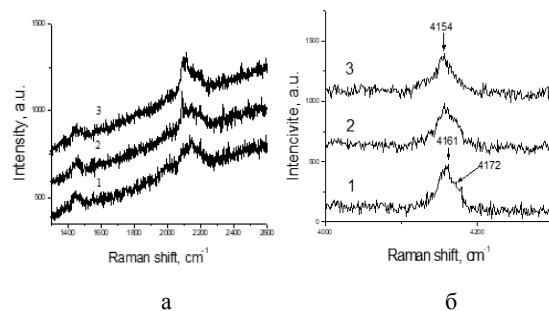


Рисунок 2 – Спектры комбинационного рассеяния в областях LVM сопоставляемых SiH связям (*a*) и водородной молекуле H_2 (*б*), для Cz Si *n*-типа пластин, имплантированных протонами при 300 °C, дозами $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (1), $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (2) и $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (3) и обработанных в плазме водорода при 150 °C

Как видно из представленных результатов, на спектрах комбинационного рассеяния, наблюдается зависимость формы и местоположения LVM сопоставляемых SiH связям и H_2 молекулы, в зависимости от флюенса предимплантированных протонов. А именно, с увеличением дозы предимплантированных протонов интенсивность сигнала LVM от H_2 молекулы уменьшается. Поскольку именно при флюенсе $(0,5$ – $1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ предимплантированных протонов, на результатах SEBIV начинает наблюдаться образование сфера образного объемного нанослоя, это позволяет предположить о возможности накопления газообразного водорода в этом слое.

Благодарности. Работа выполнена в рамках программы «Наноматериалы и нанотехнологии» (ГПНИ 2.24).

Литература

1. Terreault, B. *Physica status solidi* / B. Terreault. – 2007. – Vol. 204. – P. 2129.
2. Bruel, M. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 1996. – Vol. 313.
3. Frantskevich N. V., Frantskevich A. V., Fedotov A. K., Mazanik A. V. // *Journal: Solid State Phenomena*. – 2009. – Vol. 156–158. – P. 91–94.

УДК 620.178.1

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВАКУУМНО-ДУГОВОГО НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ФОСФОРОМ

Хабарова А.В.¹, Лапицкая В.А.^{1,2}, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Куприн А.С.³, Чижик С.А.^{1,2}, Трухан Р.Э.¹, Конеру А.⁴

¹ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

³НИЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины
Харьков, Украина

⁴Somnio Global
Новай, США

Аннотация. Приведены результаты исследований свойств вакуумно-дугового никелевого покрытия, легированного фосфором (NiP), толщиной 2 мкм после триботехнических испытаний методом атомно-силовой микроскопии. Испытания проводились при нагрузке от 3,45 до 6,89 мкН за 40 циклов. В результате определены основные характеристики триботехнических свойств – коэффициент $k_{тр}$ и сила трения $F_{тр}$, глубина износа h и удельный объемный износ ω . Установлено, что с увеличением нагрузки коэффициент и сила трения снижаются.

Ключевые слова: вакуумно-дуговое покрытие, NiP, атомно-силовая микроскопия, триботехнические испытания, коэффициент трения.

TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF VACUUM-ARC NICKEL COATING DOPED WITH PHOSPHORUS

Khabarava A.¹, Lapitskaya V.^{1,2}, Kuznetsova T.^{1,2}, Kuprin A.³, Chizik S.^{1,2}, Trukhan R.¹, Koneru A.⁴

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian national technical university
Minsk, Republic of Belarus

³NSC Kharkov Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kharkov, Ukraine

⁴Somnio Global
Novi, USA

Abstract. The results of studies of the properties of a vacuum-arc nickel coating doped with phosphorus (NiP), 2 μm thick after tribotechnical tests by atomic force microscopy are presented. The tests were carried out at a load of 3.45 to 6.89 m μN for 40 cycles. As a result, the main characteristics of the tribotechnical properties were determined – the coefficient k_{fr} and the friction force F_{fr} , the wear depth h , the specific volumetric wear ω . It was found that with an increase in the load, the coefficient and the friction force decrease.

Key words: vacuum arc coating, NiP, atomic force microscopy, tribotechnical tests, coefficient of friction.

Адрес для переписки: Хабарова А.В., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: AV.Khabarova@mail.ru

Введение. Вакуумно-дуговые никелевые покрытия характеризуются хорошей износо- и коррозионностойкостью, высокой твердостью. Легирование фосфором приводит к повышению физико-механических и триботехнических свойств таких покрытий. Наличие на поверхности вакуумно-дуговых никелевых покрытий окисных пленок и различных фаз может создавать хорошие условия для формирования трибопленок [1]. Микротвердость таких покрытий может варьироваться от 2

до 17 ГПа [2]. Однако их применение ограничено недостаточным изучением свойств [1].

Целью работы является определение триботехнических свойств вакуумно-дугового никелевого покрытия, легированного фосфором, методом атомно-силовой микроскопии.

Материалы и методы исследования. Покрытия толщиной 2 мкм с концентрацией фосфора 2 ат. % нанесены на диск из нержавеющей стали 08X18H10T вакуумно-дуговым методом на