

Таблица 1 – Распределение легирующих элементов в образце с покрытием

Спектр	C	O	F	Al	S	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb
Спектр 1	8.2		2.6	0.4		0.9	17.5	17.2	47.0	5.9
Спектр 2	7.8		2.5	0.5	0.5	0.8	17.7	17.0	46.5	6.4
Спектр 3	16.						82.9		0.95	
Спектр 4	68.	6.9					11.5	1.72	11.8	
Спектр 5	14.	1.4					14.9		68.9	

Полученные результаты позволяют с уверенностью утверждать об эффективности предложенной двухкамерной схемы горелки для сверхзвукового газопламенного напыления, позволяющей расширить технологические возможности оборудования за счет более широкого диапазона температур и лучших условий для релаксации частиц напыляемых материалов.

На основании проведенных исследований, разработаны технологические рекомендации по использованию предложенного оборудования для напыления покрытий из композиционных порошков типа КХН-30 на подложку из жаропрочных сплавов типа Инконель 718.

Литература

1. Vardelle, A. The 2016 Thermal Spray Roadmap/ Armelle Vardelle, Christian Moreau, Jun Akedo et al. // Journal of Thermal Spray Technology, Volume 25(8) – December 2016 – pp. 1376–1440.
2. Fauchais, P. L. Thermal Spray Fundamentals From Powder to Part / Pierre L. Fauchais, Joachim V.R. Heberlein, Maher I. Boulos (auth.)// Springer Science+Business Media New York, 2014–1566 pp;
3. Иноземцев А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий – Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1204 с.

4. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.

5. Пат. Украины 90044, МПК (2006) B05B 7/00. Газополуменевый пальник для надзвукового напыления покрытий / Долматов А.И., Зорик И.В., Данько К.А.; Заявитель и патентообладатель Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – № а200809654; заявл. 25.01.2010, бюл. № 2; опубл. 25.03.2010, бюл. № 6. – 6 с.: ил.
6. Данько, К. А. Моделирование течения газа внутри тракта двухкамерной горелки для сверхзвукового газопламенного напыления покрытий [Текст] / К. А. Данько // Вестник двигателестроения. – 2017. – № 1. – С. 130–138.

7. Данько, К. А. Моделирование процессов изменения скорости и температуры частиц Cr_3C_2 при сверхзвуковом газопламенном напылении покрытий двухкамерной горелкой [Текст] / К. А. Данько // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 4. – С. 76–82.
8. Данько К.А. Исследование свойств покрытий, полученных сверхзвуковым газопламенным напылением с использованием двухкамерной горелки / К.А. Данько, А. И. Долматов, В. Н. Лопата // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 8. – С. 75–84.

УДК 621.315.592

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ $Si(Si_xN_y)Si$

Францкевич Н.В., Францкевич А.В., Шеденков С.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Предложено множество технологий по формированию структур кремний на изоляторе. В работах [1,2] описан метод формирования изолирующей структуры $Si(Si_xO_y)Si$ в результате геттерирования кислорода, вводимых в кремний из DC плазмы, на предварительно созданный глубинный дефектный слой. Естественным образом встал вопрос о возможности формирования структуры $Si(Si_xN_y)Si$.

Стандартные пластины Cz кремния n-типа 20 Ω -cm имплантировались ионами водорода при комнатной температуре с энергией 100 кэВ и дозой $4 \cdot 10^{16}$ (образец 1) и $1 \cdot 10^{16}$ ат/см² (образец 2).

Расчетное значение проективного пробега R_p , имплантированных ионов составляет 0,9 мкм. После этого, в указанные выше пластины кремния, а так же исходную не имплантированную пластину, вводился азот из DC плазмы при температуре не превышающей 300 °С. После этого, все образцы отжигались при 700 °С в вакууме в течении двух часов.

Контроль распределения азота по глубине кремниевой пластины проводился методом вторичной ион-масс спектроскопии (ВИМС), с использованием установки CAMECA IMS-4F (Cs^+ source, 10 кэВ). Распыляемая область

составляла $250 \cdot 250$ мкм², вторичные ионы анализировались из центральной области диаметром 10 мкм. Визуализация глубинных электрически активных областей проводилась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), в режиме электронно индуцированного поверхностного потенциала (SEBIV) [3].

На рисунке 1(а) представлены результаты ВИМС полученные с образца кремния предварительно имплантированного водородом дозой $4 \cdot 10^{16}$ см⁻² и обработанного в плазме азота. На рис. 1 (б, с, д) представлен образ поверхности пластины кремния полученный с использованием метода СЭМ, снятый с областей содержащих кратеры ионного травления полученные при проведении исследований ВИМС. Для сравнения, на рис. 2 приведены результаты ВИМС, и СЭМ образ кратера травления, полученные с образца кремния имплантированного водородом дозой $1 \cdot 10^{16}$ см⁻². В соответствии с данными профилометрии, глубина кратера травления для всех образцов составляет около 2,2 мкм.

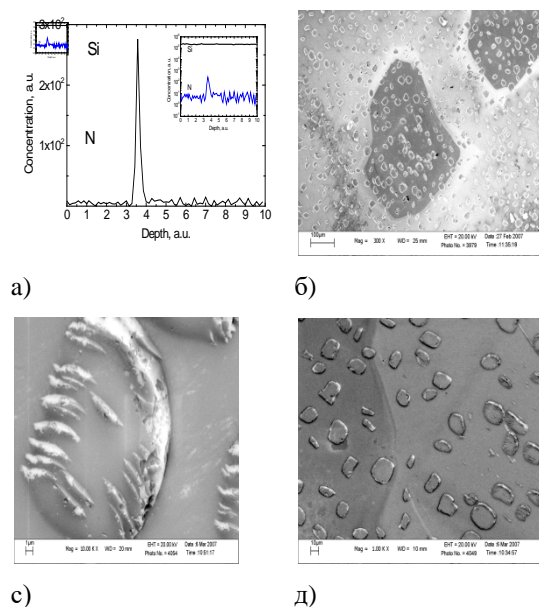
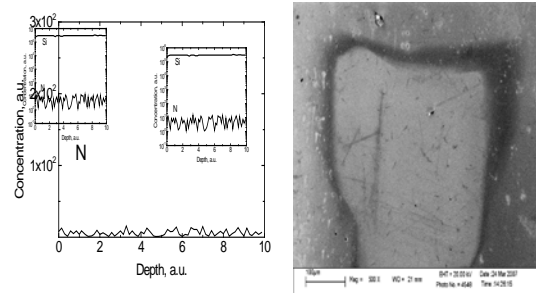


Рисунок 1 (а, б, с, д) – Результаты ВИМС (а) и СЭМ (б, с, д) для образца 1. СЭМ образ – общий вид кратера (1б), граница раздела травленной (слева) и не травленной (справа) областей (1, с), образование кремний на нитриде кремния расположенное в кратере (1, д). На вставке рис. 1а данные ВИМС приведены в логарифмическом масштабе

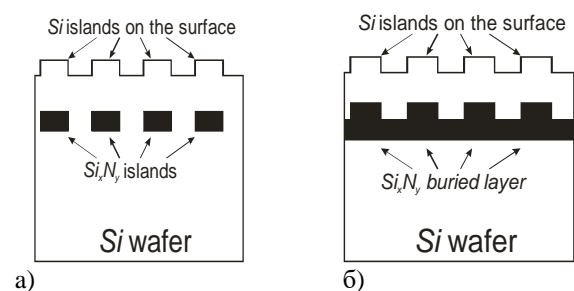
Как видно из данных ВИМС, представленных на рисунке 1, а, для пластины кремния имплантированной водородом $4 \cdot 10^{16}$ см⁻² и обработанной в плазме азота, наблюдается аккумуляция азота, с концентрацией как минимум в два раза превышающей фон, в области R_p предварительно имплантированного водорода. Фооновая концентрация азота в области между

поверхностью и положением пика на глубине R_p, практически эквивалентна концентрации азота в объеме кремниевой пластины.



а) Рисунок 2 – ВИМС профиль (1,а) и образ поверхности СЭМ кратера травления (2, б) для образца 2. На вставке рис. 2, а данные SIMS приведены в логарифмическом масштабе

В соответствии с данными профилометрии, на поверхности образца 1 детектируется рельефная структура с высотой выступов до 100 нм. Форма, размер и периодичность расположения видны из данных СЭМ, представленных на рисунке 1 б, с, д. Как видно из данных СЭМ, представленных на рисунке 1 б, с, островковая структура наблюдается так же в кратерах травления, образовавшихся в результате исследований ВИМС. Возможное объяснение полученного результата состоит в следующем. Наблюдаемая на поверхности островковая структура сформировалась в результате развития неоднородного по толщине глубинного слоя. Развитие глубинного слоя в результате отжига может происходить по двум вариантам, образуются только крупные островки дефектов (рисунок 3, а) или же наряду с крупными дефектами формируется и ряд мелких глубинных (рисунок 3, б), которые формируют псевдо сплошной слой.

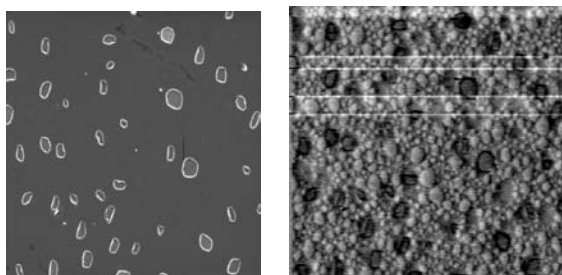


а) Рисунок 3 – Модельное представление образования островкового слоя на поверхности и в объеме кремниевой пластины

Известно, что количество геттеризируемой примеси пропорционально количеству дефектов, следовательно, профиль распределения азота должен качественно повторять профиль распределения дефектов. Следовательно, синтезированная структура должна иметь вид, представленный на рисунке 3, а либо 3, б.

В ВИМС исследованиях, в результате ионного распыления преимущественно будет распыляться те области кремния, с которых быстрее стекает заряд, т.е. под которыми диэлектрика нет, или его толщина меньше по сравнению с окружающими областями. Независимо от того, какой из моделей (рисунок 3 а,б) соответствует структура глубинного слоя, присутствие островков в кратере травления объясняется наличием слоя с изолирующими свойствами под слоем кремния.

Для ответа на вопрос, какой из представленных на рисунке 3 моделей соответствует синтезированный глубинный Si_xN_y слой, проводились исследованиями СЭМ в режиме SEBIV, результаты представлены на рисунке 4 а,б.



а)

б)

Рисунок 4 – Образ поверхности образца 1, во вторичных электронах, и в режиме поверхностно индуцированного потенциала

Как видно из представленных на рисунке 4, б данных, структура buried layer представляет

собой островковые образования, однако большая их часть в отличие от островков проявившихся на поверхности, имеет значительно меньшие размеры – 2–3 мкм.

По совокупности представленных данных получаем:

- в области предварительно созданных радиационных дефектов геттерируется азот;
- диффузия и геттерирование азота происходит при температурах не выше 700 °С, хотя образование островковой структуры непосредственно после плазменной обработки при 300 °С, может указывает на то, что данный процесс происходит при более низкой температуре.

Отжиг при 700 °С приводит к изменению электрических свойств buried layer, что обусловлено вероятнее всего образованием нитрида кремния. Структура buried layer соответствует представленной на рисунке 3(б).

Литература

1. A.V. Franzkevich, Anis M.H. Saad, A.V. Mazanik, A.K. Fedotov, E.I. Rau, S.V. Chigir // Solid State Phenomena, V. 95-96 (2004). P. 571-576.
2. A.V. Frantskevich, A.K. Fedotov, N.V. Frantskevich, A.V. Mazanik, E.I. Rau, V.S.Kulinkayskas // Material Science and Engineering B, Vols. B124-125 (2005). P. 341-344.
3. E.I. Rau, A.N. Zhukov and E.B. Yakimov // Inst. Phys. Conf. Ser. No 160 (1997), p. 75.

УДК 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР, ОБРАЗУЮЩИХСЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ВОДОРОДА ИЛИ ГЕЛИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Францкевич Н.В., Францкевич А.В., Шеденков С.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

В работах [1] изучалась возможность создания глубинного изолирующего слоя в пластинах монокристаллического кремния, в результате геттерирования азота или кислорода, вводимых в кремний из DC плазмы, на предварительно созданный глубинный дефектный слой. Формирование глубинного дефектного слоя происходило в результате предварительной имплантации водорода дозами $(2-4) \times 10^{16}$ ат./см, и последующего отжига. Эффект геттерирования разного рода примесей на дефектах, в том числе и радиационных, достаточно изученное явление и имеет практические применения. Однако, на момент начала исследований, неисследованной областью была возможность управляемого развития предварительно созданного дефектного

слоя дозами имплантации менее 1×10^{16} ат./см. водорода или гелия. Дальнейшее развитие слоя планировалось в результате геттерирования на нем водорода или гелия, вводимых из плазмы, и последующих отжигов, при определенных температурах и соответствующей длительности. Такой подход мог удешевить предложенный в [1,2] метод создания структур кремний на изоляторе. В ходе проведения соответствующих исследований, было обнаружено, что при определенных режимах обработки, на поверхности пластин происходит образование конических структур, которые могут иметь самостоятельное практическое применение. Главная цель данной работы – представление экспериментальных данных позволяющих сравнить условия формирования поверхностных