

УДК 004.318

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.535.538

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ FIB-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАНОЭЛЕМЕНТОВ МЭМС

FEATURES OF FIB TECHNOLOGY APPLICATION FOR MEMS NANO ELEMENTS FABRICATION

ВОЛКОВ НИКОЛАЙ ВИКТОРОВИЧ

Профессор, д. ф.-м. н.

nvolkov@mail.ru

VOLKOV NIKOLAY V.

Sc.D, professor

nvolkov@mail.ru

КАРГИН НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ

Профессор, д. т. н.

KARGIN NIKOLAY I.

Sc.D, professor

ТИМОШЕНКОВ АНДРЕЙ СТЕПАНОВИЧ

Аспирант

TIMOSHENKOV ANDREY S.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., 31

National Research Nuclear University MPhI,
31 Kashirskoe Highway, Moscow, 115409, Russia

В работе рассмотрены возможности применения методов ионной растровой микроскопии (FIB — Focused Ion Beam) в качестве обрабатывающей системы для создания элементов микроэлектронных механических систем (МЭМС) на кремниевых подложках с характерными размерами менее 1 мкм.

Ключевые слова: кремний; микроэлектронные механические системы; элементы МЭМС; сфокусированный двойной пучок.

The paper considers the possibility of using ion raster microscopy (FIB—Focused Ion Beam) as a processing system for the creation of elements of microelectronic mechanical systems (MEMS) on silicon substrates with characteristic dimensions of less than 1 μm.

Keywords: silicon; microelectronic mechanical systems; MEMS elements; focused double beam.

ВВЕДЕНИЕ

Современная технология производства миниатюрных прецизионных механических систем на кремниевой основе имеет тенденцию к переходу создания интегрированных устройств на кристалле, собираемых в вакуумированный корпус. Интегральные датчики изготавливаются по технологии iMEMS (integrated Micro Electro Mechanical System), которая включает сами датчики, схемы усиления сигнала и управления [1, 2]. При этом МЭМС-узлы стремятся изготавливать на кремниевой подложке небольших размеров с минимальной толщиной единичного слоя в диапазоне величин 0,1–10 мкм.

Для производства датчиков МЭМС, основанных, например, на изменении электрической емкости, применяются объемные структуры с наибольшей толщиной и минимальным зазором между подвижными и неподвижными частями датчиков (менее 1 мкм). Например, для датчика движения (рис. 1) известно соотношение между электрическими и геометрическими параметрами: $k \cdot \Delta x \approx a \cdot M$, где k — коэффициент жесткости упругого элемента, a — ускорение системы в выделенном направлении ($a_{\text{мн}}$), M — масса чувствительного элемента (ЧЭ), Δx — величина смещения ЧЭ.

Из этого следует, что повышение чувствительности датчика может быть обеспечено как за счет увеличения площади между электродами (обычно используется группа параллельно расположенных электродов), так и за счет уменьшения зазора между ними. Величина смещения связана с электрической емкостью C в определенном частотном диапазоне в виде $\Delta x = f(\Delta C)$. В общем случае электрическая емкость может быть оценена как $C \approx S \cdot n / x \cdot \epsilon$, где S — площадь электродов, n — число пар

электродов, x — расстояние между электродами, ϵ — диэлектрическая постоянная. На рис. 1а изображена типовая схема акселерометра на основе емкостных датчиков положения чувствительного элемента (ЧЭ) и фотография подобного изделия на базе МЭМС с двенадцатью парами емкостных электродов (рис. 1б).

В настоящей работе представлены результаты по изучению возможности применения технологии Double Beam (совмещение электронного и ионного пучка) для создания прецизионных элементов МЭМС с высокопрофильными трехмерными структурами средней сложности на кремнии, поверхностный слой которого предварительно прошел ионно-лучевую обработку (модифицирование).

В целях повышения качества фрезеровки и корректировки электрофизических свойств приповерхностного слоя Si-подложки при изготовлении элементов МЭМС с размерами

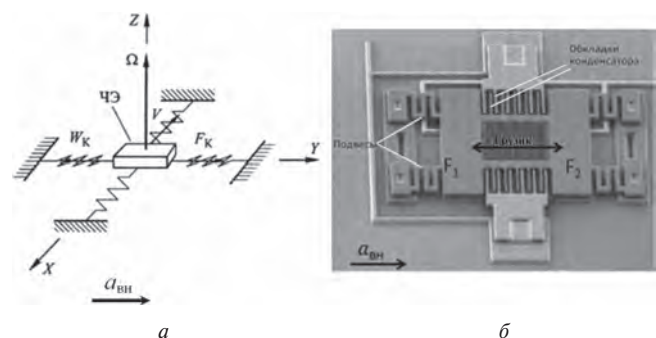


Рис. 1. Схема (а) и фотография (б) трехосевого акселерометра, изготовленного по технологии МЭМС



на уровне 0,1–1 мкм использован метод облучения пучками ионов Ne^+ и Ag^+ средних энергий с широким энергетическим спектром [3, 4], обеспечивающим существенное снижение послерадиационных дефектов в модифицированном слое. Для оценки состояния модифицированных слоев были использованы спектральные (РОР, ВИМС) и оптические методы.

УСЛОВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Ионное модифицирование проведено на установке, генерирующей ионный пучок Ne^+ и Ag^+ с гауссовым распределением ионов по энергии в диапазоне энергий $E = 4\text{--}13,7$ кэВ при средней энергии $\langle E \rangle \approx 10$ кэВ [4]. Ионы Ne^+ и Ag^+ непосредственно внедрялись в мишени — монокристаллические подложки $\text{Si}(111)$ до доз $1 \cdot 10^{18}$ ион/см² (ток пучка $j = 5$ мА/см²). Легирование приповерхностных слоев подложек атомами Be , Al , Ni , Mo было проведено методом ионного перемешивания. Для этого на поверхность подложек

были предварительно нанесены пленки Be , Al , Ni , Mo толщиной $X_i = 30\text{--}50$ нм с помощью термического испарения в вакууме (давление остаточных газов в камере $p \leq 4 \cdot 10^{-4}$ Па). Затем подложки с напыленными пленками облучались на установке при тех же режимах.

Профиль распределения внедренных атомов пленок по глубине определялся двумя методами: вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) с помощью установки РНИ-600, где применялись пучки ионов Ag^+ и O^+ с энергией $E = 4,6$ кэВ, и Резерфордского обратного рассеяния (РОР) быстрых ионов (H^+ и He^+) с начальной энергией ионов $E = 1,6$ МэВ. Ошибка в определении глубины положения примесных атомов при определении зависимости $C(x)$ методом РОР не превышала величину ± 5 нм, а в методе ВИМС — ± 1 нм. В качестве параметра для оценки изменения состояния легированной поверхности подложек Si после ионного модифицирования использовалось изменение спектра отражения оптического излучения $R(\lambda)$ в интервале длин волн 0,2–1,4 мкм.

Прецизионное фрезерование и изготовление «примитивов» — элементов МЭМС реализовано по технологии Double Beam [5] на установке VERSA 3D (компания FEI) при следующих параметрах обработки: ток ионов Ga^+ $i = 6\text{--}300$ пА, ускоряющее напряжение 10, 20, 30 кВ, углы наклона образца 0–52°, давление остаточных газов в рабочей камере $< 6 \cdot 10^{-5}$ Па, реальное приборное разрешение на обрабатываемых образцах по ионному пучку 15–25 нм, по электронному пучку — 4–10 нм.

На рис. 2 изображены основные типы «примитивов», которые изготавливались на изучаемых подложках, и дан ряд геометрических соотношений (табл. 1), контролируемых в процессе их изготовления.

Для оценки качества изготовления простейших объектов — «примитивов» принято оценивать соотношение характерных линейных величин, которые представлены в табл. 1, например, для канавок: $v = h/a$ или $v = l/a$ или $v = l/h$, где a — ширина канавки, l — длина канавки, h — глубина канавки при $l \gg h \gg a$. Величина v обычно находится в диапазоне величин 10–100 отн. ед.

На рис. 3а представлена фотография участка кремниевой подложки после фрезерования ионным пучком прямоугольных канавок (фигуры 1, 2, 3, 4) при различных величинах ускоряющего напряжения 5, 10, 20, 30 кВ соответственно. Как видно на фотографии, лучшие результаты по качеству фрезерования (соблюдения геометрических параметров при изготовлении канавок) достигаются при ускоряющем напряжении 20 кВ. В случае применения 30 кВ выявляется уменьшение ее размеров ($a \times l$) по глубине: на уровне поверхности — 1×7 мкм, на уровне дна канавки — $0,7 \times 6$ мкм.

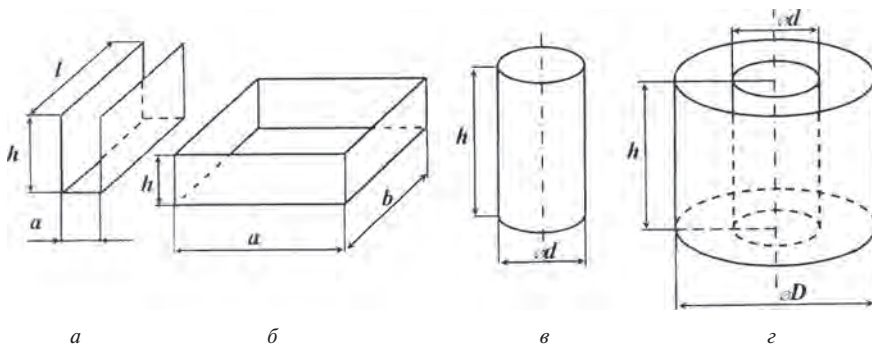


Рис. 2. Простейшие трехмерные элементы — «примитивы»: а) канавка, б) прямоугольное углубление, в) цилиндрическое углубление, г) коаксиальное углубление

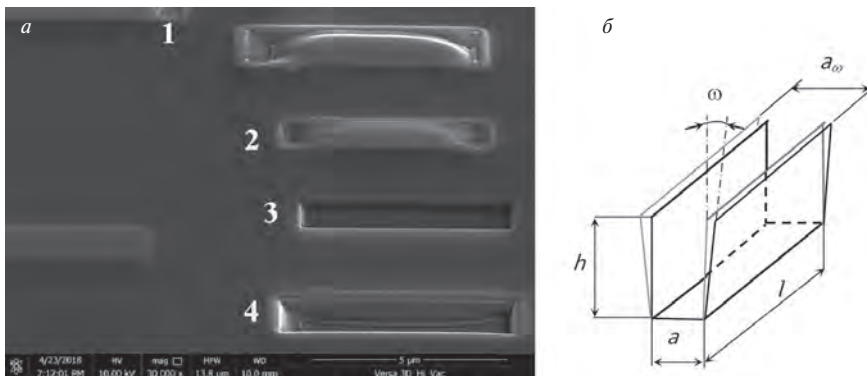
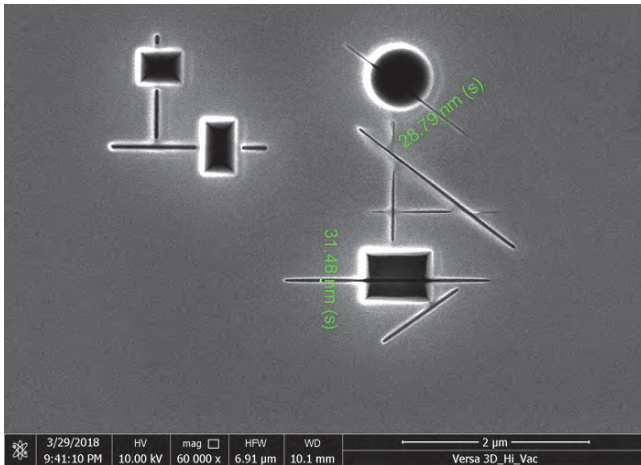


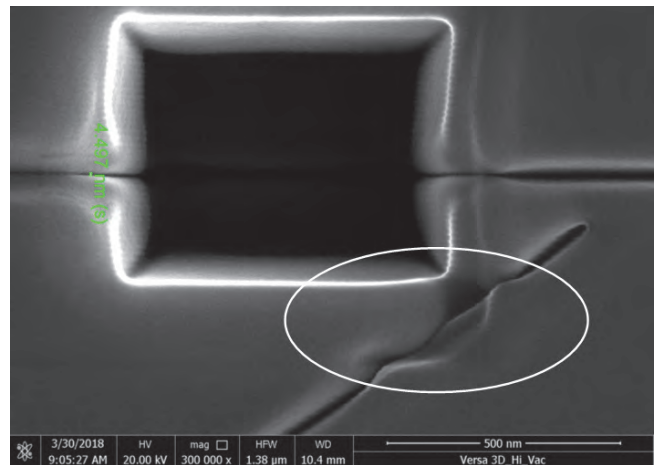
Рис. 3. Изменение заданных геометрических параметров канавки (а) и характерные отклонения от заданного профиля (б), возникающие при фрезеровке

Таблица 1. Параметры фрезеруемых элементов — «примитивов» на кремниевой подложке

№	«Примитив»	Контролируемый параметр v	Величина отношения v	Погрешность профиля
1	Канавка $l \gg h \gg a$	$v = h/a$ $v = h/l$	5–50 5–100	$\omega \leq 1^\circ$ $a_\omega/a = 1\text{--}1,5$
2	Прямоугольное углубление, $a \approx b$	$v = a/h$ $v = b/h$	5–20	$\omega \leq 1^\circ$ $a_\omega/a = 1\text{--}1,3$
3	Цилиндрическое углубление	$v = d/2h$	10–30	$\omega \leq 3^\circ$ $a_\omega/a \leq 1,5$
4	Коаксиальное углубление	$v = d/2h$ $v = D/2h$ $v = (D - d)/2h$	10–20	$\omega \approx 5^\circ$ $a_\omega/a \leq 1,3$



а



б

Рис. 4. Фотографии участков поверхности с фрезерованными элементами: а) на подложке КЭВ-2(111), б) на ионно-модифицированной подложке КЭВ-2 (111) (приповерхностный слой легирован атомами Ве на глубину до 100 нм)

Изменение геометрических параметров из-за наличия неконтролируемых процессов (влияние угловой зависимости распыления, самораспыления, температуры материала в зоне обработки, химических процессов и т. п.) можно оценить с помощью следующих соотношений (рис. 3б): угол наклона стенки канавки — $\omega = \arctg[(a\omega - a)/2h]$, который необходимо поддерживать при минимально возможных величинах, и относительное отклонение профиля — $v\omega = 2h/(a\omega - a)$.

Создание «примитивов» — элементов для МЭМС

Как следует из проведенных экспериментов по изготовлению (фрезерованию) элементов на кремниевой подложке, в штатном состоянии методом двойного пучка возможно получение структур с параметрами от 50 нм. Однако если структурные элементы расположены достаточно близко, то в результате вторичных процессов (самораспыление, температура в зоне обработки и др.) наблюдается искажение их геометрических форм и изменение размеров (рис. 4а, эллипс).

В этой связи проведение фрезерования на подложках, легированных атомами металлов Ве, Al, Ni, Мо, повышает качество фрезерования пучком Ga⁺ за счет повышения электро- и теплопроводности модифицированного слоя. В этом случае дефекты формы и размеров фрезеруемых элементов оказываются существенно ниже (рис. 4б). Наилучших результатов по качеству фрезеровки и минимальных размеров элементов удастся добиться на подложках, легированных атомами Ве (концентрация в модифицированном слое менее 1 ат.%). На рис. 5 в качестве примера представлена фотография поверхности подложки с фрезерованными канавками, выполненными с помощью пучка ионов Ga при ускоряющем напряжении 20 кВ. Глубина канавок задавалась от 0,3 до 2,4 мкм при их ширине 150 нм. Как видно из состояния полученных структур, увеличение глубины фрезерования приводит к росту ширины канавок вблизи поверхности примерно на 50 нм из-за распыления стенок канавок под действием отраженных атомов Ga и выбитых атомов подложки. При этом границы стенки и дно канавки ровные (угол скругления не превышает 20 нм).

Обсуждение результатов, общие рекомендации

Анализ проведенных экспериментов показывает, что применение метода двойного пучка для изготовления узлов МЭМС целесообразно при размерах элементов от 20–40 нм. При этом

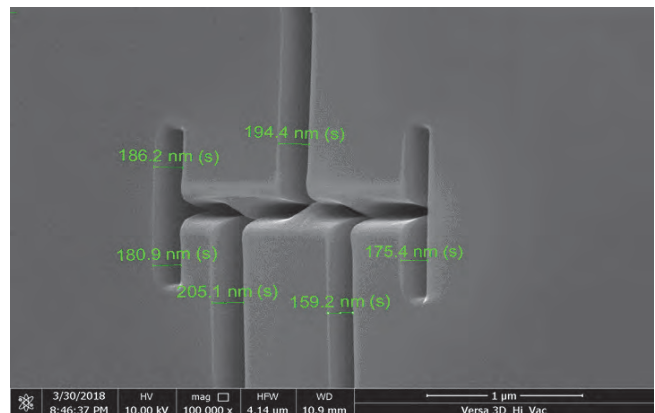


Рис. 5. Пример формирования трехмерной структуры в качестве основы исполняющих элементов МЭМС на ионно-модифицированной Si-подложке (глубина канавок изменяется от 0,3 до 2,4 мкм, ширина — от 160 до 200 нм)

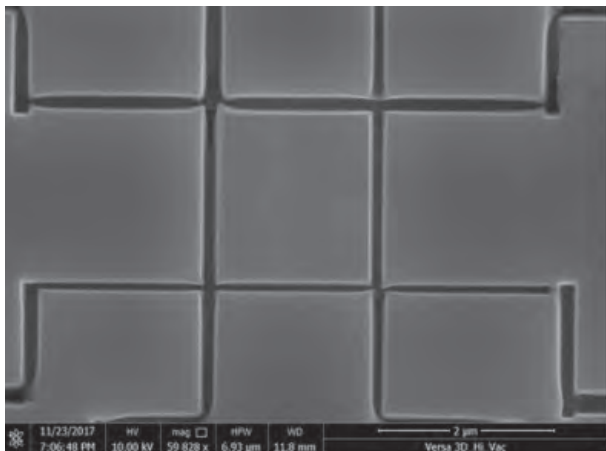
необходимо предусмотреть два этапа обработки: предварительная — изготавливаются контуры элементов (рис. 6а) и чистовая — формируются пересечения, кромки, дорожки (рис. 6б).

В качестве основных режимов работы предпочтительно выбирать повышенные ускоряющие напряжения — 20, 30 кВ и пониженные токи ионов Ga⁺ — 10–100 пА.

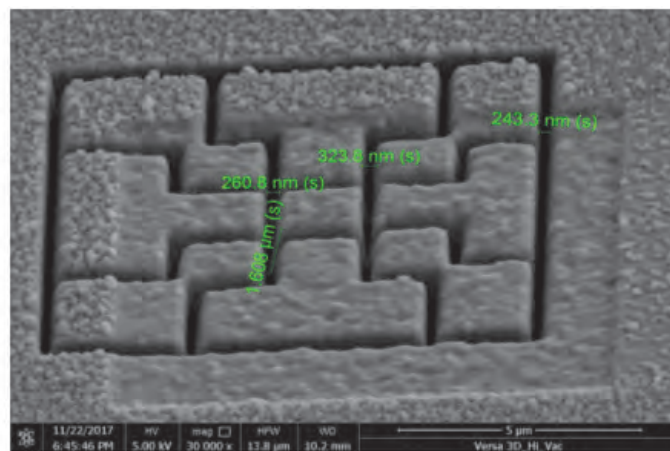
При указанных режимах возможно фрезерование с соотношением высоты профиля к его ширине 10–100, длины дорожки (линии) к ее ширине от 100 и более.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные эксперименты с монокристаллическими кремниевыми подложками КЭВ-2 (111) в исходном состоянии, облученными ионами He⁺ и Ag⁺, поверхностно легированных атомами Ве, Al, Ni, Мо, методом ионного перемешивания показали, что наилучшие результаты по точности изготовления «примитивных» элементов МЭМС (канавок, дорожек) с размерами до 100 нм достигаются на Si-подложках, легированных атомами Ве. Это можно объяснить изменением физико-механических свойств приповерхностных слоев за счет более глубокого проникновения атомов бериллия в подложку (60–100 нм) по сравнению с другими внедренными атомами



а



б

Рис. 6. Пример формирования трехмерной структуры в качестве основы исполняющих элементов МЭМС на монокристалле кремния КЭВ-2 (а) и оксиде циркония (б), глубина фрезерования 2,4 мкм

и небольшим его атомным радиусом ($r_a = 0,113$), способствующим миграции Ве в полях сжимающих механических напряжений, возникающих в зоне модифицирования.

1. Выполненные эксперименты на приборе VERSA 3D по изучению возможности создания элементов узлов МЭМС с размерами менее 1 мкм показали принципиальную возможность создания подобных систем средней сложности.

2. Как показал анализ результатов ионной обработки, на Si-площадке 30–50 мкм удается создать трехмерные структурные элементы МЭМС с параметрами зазоров 0,1–0,2 мкм на глубины до 2–5 мкм.

3. При этом необходимо оптимизировать режимы обработки пучком ионов Ga⁺ (увеличивать энергию ионов и снижать ток пучка) с применением двух этапов изготовления: «чернового» и «чистового».

ЛИТЕРАТУРА

- Куликов К. В. Микроэлектромеханические устройства систем связи: Учеб. пособие / К. В. Куликов, В. Н. Ланцов; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. — Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. — 96 с.
- Сысоева С. А. Высокочастотные МЭМС-ключи // Технологии и применения. 2011. — № 11. — С. 29–36.
- Волков Н. В., Калин Б. А. Особенности распыления многослойных Al, Ti, Fe, Mo пленок на бериллии при облучении полиэнергетическим пучком ионов He⁺ и Ar⁺ со средней энергией 10 кэВ // Поверхность, 2003. — № 5. — С. 38–42.
- Волков Н. В., Калин Б. А. Ионный ускоритель «ВОКАЛ» // Материаловедческие вопросы атомной техники. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — С. 64–67.
- Тукмаков К. Н. Использование фокусированных ионных пучков для изготовления элементов // Труды Молодежной научной школы по нанофотонике. Nanostructures: Physics and Technology, Самара: СГУ, 2012. — С. 10–13.
- Sigmund P., Gras-Marti A. *Selective mixing of the layers under an ion irradiation* // Jnl. Nucl. Instr. Meth, 1980. V. 168. P. 389–394.
- Мартыненко Ю. В., Московкин П. Г. Механизмы изменения слоев твердого тела при ионной бомбардировке // Поверхность, 1991. — № 4. — С. 44–50.
- Lindhard J., Sharf M., Schiott H. *Range concepts and heavy ion ranges* // Jnl. Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk, 1963. V. 33. № 14. — P. 1–42.
- Кирсанов В. В. Моделирование радиационных дефектов в кристаллах под напряжением // ВАНТ. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. — Харьков, 1984. — Вып. 1 (28). — С. 35–45.
- Комаров Ф. Ф. Ионная имплантация в металлы. — М.: Металлургия, 1990. — 216 с.
- Kalin B. A., Altuhov A. A., Gladkov V. P., Oleynikov I. V., Petrov V. I., Volkov N. V. *Penetration of Be, Ni, Mo atoms into Be, Al, Zr, Si and Diamond substrates under irradiation of the "thin film-substrate" systems by polyenergetic Ar⁺ ion beam with mean energy of 9.4 keV* // 12th International conference on radiation physics and chemistry of inorganic materials, Tomsk: TPU, 2003. P. 40–44.
- Darken L. S., Gurry R. W. *Physical Chemistry of Metals*, Inc. — New York Toronto London, McGraw-Hill Book Company, 1953. — 582 p.
- Волков Н. В., Якуткина Т. В. Динамические закономерности ионного перемешивания в многослойных пленочных системах под воздействием пучков ионов с широким энергетическим спектром // Труды XXII международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2015». — М.: НИЯУ МИФИ, 2015. — Т. 3. — С. 72–75.
- Volkov N. V. *Modification of thin oxide films on Be, Si, Al, Ti, Zr, and W under bombardment by He⁺ and Ar⁺ ion beams with a broad energy spectrum* // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2011. V. 5. № 2. P. 240–245.
- Олейников И. В., Калин Б. А., Волков Н. В., Наквасин С. Ю., Тимошин С. Н., Щербаков О. В. Оптические свойства оксидных пленок, полученных на ионно-модифицированной поверхности циркония // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2006. — № 10. — С. 5–10.
- Волков Н. В., Олейников И. В., Ананьева Е. А. Оптические свойства в ИК-диапазоне ионно-модифицированной металлической поверхности // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011. — № 3. — С. 35–39.