

Изучение влияния энергии ионов неона на шероховатость поверхности основных срезов монокристаллического кремния при ионном травлении

© М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало, Н.Н. Салашенко

Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия
e-mail: mikhaylenko@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.
В окончательной редакции 12 мая 2023 г.
Принято к публикации 12 мая 2023 г.

Приведены результаты изучения энергетических зависимостей коэффициента распыления и величины эффективной шероховатости поверхности монокристаллического кремния при облучении ионами неона с энергией 100–1000 eV. Определены параметры ионно-пучкового травления ускоренными ионами Ne, обеспечивающие высокий коэффициент распыления (скорость травления). Установлено значение эффективной шероховатости в диапазоне пространственных частот $4.9 \cdot 10^{-2} - 6.3 \cdot 10^1 \mu\text{m}^{-1}$, составившее менее 0.3 nm для основных срезов монокристаллического кремния $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$.

Ключевые слова: поверхность, шероховатости, распыление, ионное травление.

DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55767.114-23

Введение

Развитие мощных источников рентгеновского излучения, в частности, лазеров на свободных электронах и синхротронов 3+ и 4-го поколений, предполагает использование в качестве подложек оптических элементов монокристаллический кремний [1,2]. Требования для этих подложек только формируются, но уже понятно, что поверхности должны быть гладкими ($\sigma < 0.2 \text{ nm}$) в области высоких пространственных частот ($1 - 10^3 \mu\text{m}^{-1}$) для обеспечения высоких коэффициентов отражения, а также в области средних пространственных частот ($10^{-3} - 1 \mu\text{m}^{-1}$) для обеспечения фокусировки и коллимации излучения при скользких углах падения [3–7]. Таким образом, интегральное значение шероховатости во всем диапазоне пространственных частот — $4.9 \cdot 10^{-2} - 6.3 \cdot 10^1 \mu\text{m}^{-1}$ — должно быть менее 0.3 nm.

Для обозначенных выше источников излучения форма поверхности оптических элементов представляет собой плоскость или близкую к плоскости форму, в связи с чем одной из основных задач настоящего исследования является наработка экспериментальных данных для создания, на основе ионно-пучковых методов обработки, методики формообразования оптических элементов из основных срезов монокристаллического кремния для приложений рентгеновской оптики.

Один из основных критериев при создании такого рода оптики является минимальное радиационное воздействие на приповерхностный слой подложки. Таким образом, для коррекции формы необходимо использовать ионы низких энергий, однако, как показано в работе [8], в случае с аргоном при энергиях ниже 550 eV наблюдается

развитие шероховатости поверхности, причем с увеличением глубины травления амплитуда неоднородностей на поверхности растет линейно.

В задачах коррекции формы методом ионно-пучкового травления оптимальным с точки зрения математического моделирования и самого процесса является поддержание нормального угла падения пучка ионов к обрабатываемой поверхности [9,10], в связи с чем в рамках настоящей работы исследовалось влияние бомбардировки ионами Ne различных энергий (угол падения – нормаль) на величину среднеквадратической шероховатости поверхности основных срезов $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ монокристаллического кремния.

Обзор показывает, что работы по ионному травлению ускоренными ионами неона проводились другими группами исследователей, как, например, [11,12], однако в этих работах не уделялось внимания изучению поведения шероховатости поверхности для приложений рентгенооптики. Также не проводилось таких работ для трех основных ориентаций монокристаллического кремния, в частности (100), (110) и (111). Большая часть работ посвящена энергиям ионов более 1.5 keV, что соответствует больше режиму ионной имплантации, нежели физического распыления.

1. Описание эксперимента

Исследования проводились на установке ионно-пучкового травления, подробно описанной в [13]. В качестве экспериментальных образцов использовались стандартные кремниевые подложки для микроэлектронной промышленности [14] (исходная шероховатость поверх-

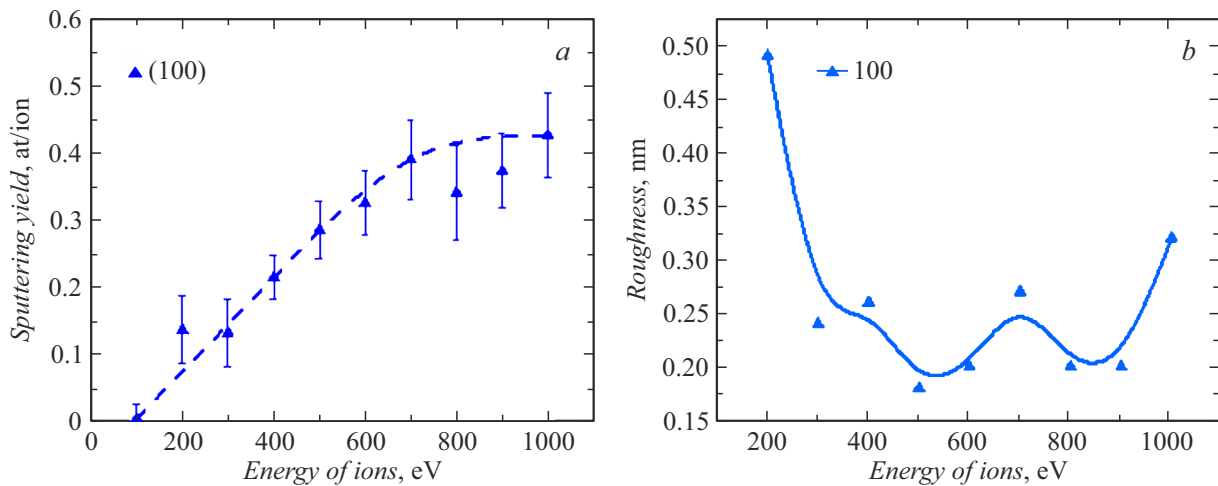


Рис. 1. Энергетические зависимости коэффициента распыления (а) и значений эффективной шероховатости (б) монокристаллического кремния (100).

ности ~ 0.3 nm). Пластина нарезалась на куски размером 15×15 mm. Для проведения эксперимента образец устанавливался на предметный столик под нормалью к пучку ионов. Для контроля глубины травления использовался „свидетель“, часть поверхности которого закрывалась маской. Далее в камере создавалось рабочее давление газа $1.3 \cdot 10^{-2}$ Pa, устанавливались необходимые плотность тока ионов (j) и ускоряющее напряжение (U_{Accel}), значение которого и определяет энергию ионов. Образец подвергался ионной бомбардировке, после чего производились измерения глубины травления и поверхностной шероховатости. Измерение глубины травления проводилось с помощью интерференционного микроскопа белого света Talysurf CCI 2000 (измерялась высота ступеньки, образовавшейся на границе маски). Во всех экспериментах травление проводилось под нормалью (менялась только энергия и время облучения) на глубину, превышающую $1 \mu\text{m}$. Такая глубина обусловлена двумя обстоятельствами: первое — тем, что при травлении более $1 \mu\text{m}$ значение эффективной шероховатости выходит на насыщение и практически не изменяется, по крайней мере для аморфных тел [15]; второе — типичная величина съема материала при проведении процедуры коррекции формы составляет порядка $1 \mu\text{m}$.

Из измеренных значений глубины травления, и исходя из известного время травления, вычислялось значение скорости травления V_{Etch} . Эта величина пропорциональна коэффициенту ионного распыления (Y). Взяв за основу определение коэффициента распыления, путем небольших преобразований получили выражение для Y , где входные данные — это параметры эксперимента:

$$Y = \frac{\rho e V_{\text{Etch}} N_A}{\cos \Theta_{\text{Inc}} j M_2}, \quad (1)$$

где ρ — плотность мишени, N_A — число Авогадро, Θ_{Inc} — угол падения ионов на поверхность, j — плотность ионного тока, M_2 — молярная масса мишени

и $V_{\text{Etch}} = d/t$ — скорость травления, d — глубина травления, t — время экспозиции.

Среднеквадратическая шероховатость (σ) измерялась на зондовом микроскопе Ntegra (NT-MDT) в диапазоне пространственных частот (q) от $4.9 \cdot 10^{-2} - 6.3 \cdot 10^1 \mu\text{m}^{-1}$ (размеры кадров атомно-силового микроскопа (АСМ) от 2×2 до $40 \times 40 \mu\text{m}$). Значение эффективной шероховатости находится из площади под кривой PSD-функции, подробнее о методе можно прочитать в работе [16].

2. Результаты и обсуждение

В результате серии экспериментов по распылению мишеней из основных срезов монокристаллического кремния ускоренными ионами неона (Ne) в диапазоне энергий 100–1000 eV были получены энергетические зависимости коэффициентов распыления и значений эффективной шероховатости поверхности (рис. 1–3). Энергетическая зависимость коэффициента распыления в данном диапазоне энергий имеет такой вид, так как с увеличением энергии налетающих ионов механизм соударений переходит от одиночных столкновений к каскадам. Таким образом, более высокоэнергичный ион порождает больше атомов отдачи, импульс которых доходит до атомов в приповерхностном слое, у которых энергии связи на поверхности меньше, чем в объеме, что приводит к удалению атома. С дальнейшим увеличением энергии пучка ионов возрастает и глубина его проникновения, что, в свою очередь, приводит к тому, что энергия, переданная ионами атомам мишени, рассеивается на большой глубине и не доходит до поверхностных атомов.

Из полученных зависимостей видно, что наименьшим коэффициентом распыления, а следовательно, и наименьшей скоростью травления при облучении ускорен-

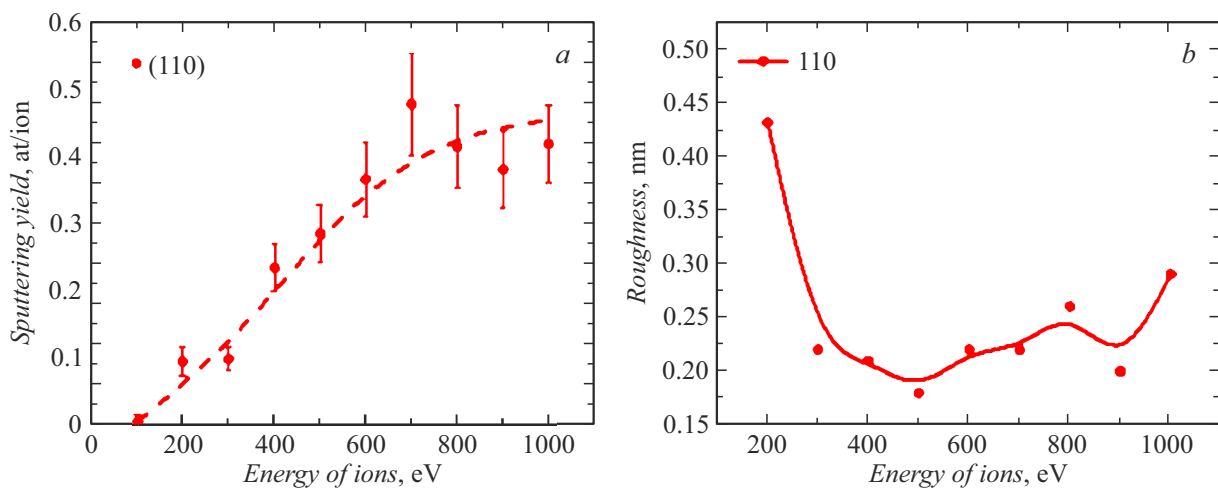


Рис. 2. Энергетические зависимости коэффициента распыления (a) и значений эффективной шероховатости (b) монокристаллического кремния (110).

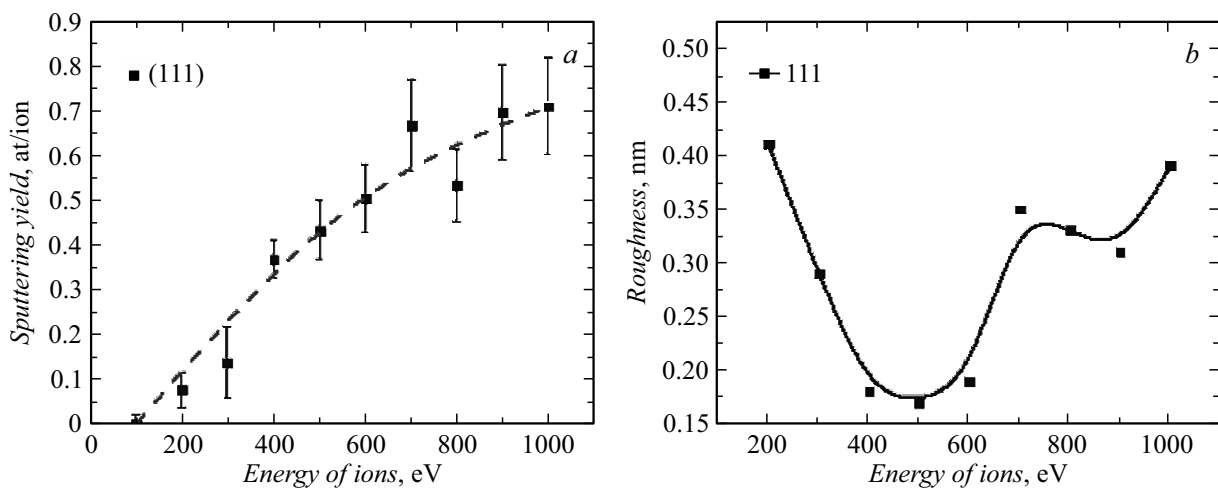


Рис. 3. Энергетические зависимости коэффициента распыления (a) и значений эффективной шероховатости (b) монокристаллического кремния (111).

ными ионами Ne под нормалью к поверхности обладает кремний (100). На энергетических зависимостях значения эффективной шероховатости поверхности наблюдается схожее поведение для всех трех ориентаций, а именно развитие рельефа поверхности при низких энергиях в области 200 eV. Такое поведение также наблюдалось и в работе [8], где внимание уделялось особенностям распыления основных срезов монокристаллического кремния ускоренными ионами аргона (Ar). При энергиях в районе 450 eV для Si (100), а для Si (110) и Si (111) — при энергии 550 eV наблюдалось скачкообразное изменение поведения энергетической зависимости эффективной шероховатости. До „пороговой“ энергии наблюдалось развитие рельефа с ростом величины эффективной шероховатости, а при превышении „пороговой“ энергии шероховатость сглаживалась. В рамках настоящей работы не удалось увидеть резкий скачок значений эффективной шероховатости

ввиду того, что значения коэффициента распыления при энергии ионов Ne 100 eV равна 0.005 at./ion, что в нашей геометрии и параметрах эксперимента соответствует скорости травления 0.25 nm/min. При такой скорости за 4 h удается удалить с поверхности слой материала толщиной не более 60 nm, что недостаточно для характеристики эволюции поверхности. Однако на кадрах АСМ $2 \times 2 \mu\text{m}$, приведенных на рис. 4, можно увидеть начало образования кратеров на поверхности, что является предпосылкой к развитию шероховатости поверхности.

Как уже говорилось ранее, для процедуры коррекции формы пучками ускоренных ионов немаловажным обстоятельством является минимальный нарушенный слой. Расчеты в пакете SRIM [17] показывают, что глубина проникновения ионов неона больше чем аргона в диапазоне энергий 100–1000 eV (рис. 5) и составляет до 4 nm включительно. При процедуре коррекции формы

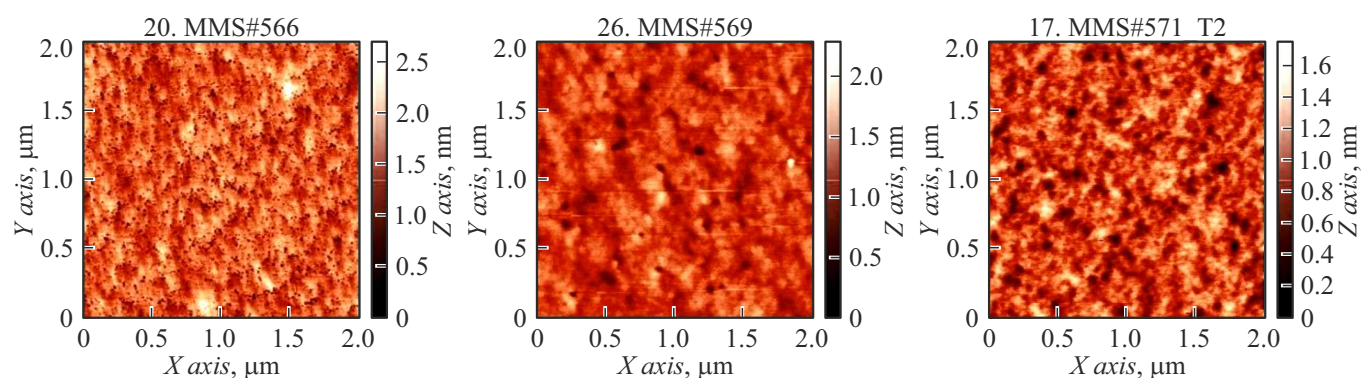


Рис. 4. АСМ кадры $2 \times 2 \mu\text{m}$ поверхностей основных срезов монокристаллического кремния после облучения ионами Ne с энергией 100 eV.

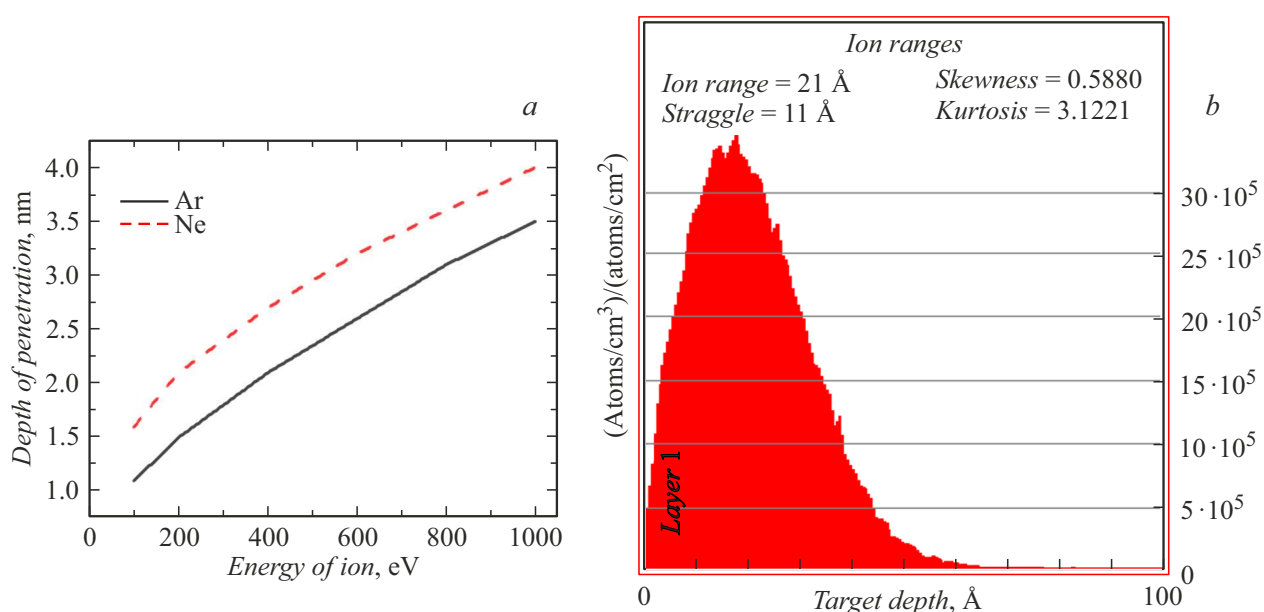


Рис. 5. *a* — зависимость глубины проникновения ионов Ar и Ne от энергии; *b* — рассчитанный профиль имплантированных ионов Ne с энергией 200 eV в объем кремния [16].

обычно удаляется слой более $1 \mu\text{m}$, т.е. слой, насыщенный дефектами после процедуры химико-механической полировки. Таким образом, после процедуры ионной коррекции формы поверхности глубина нарушенного слоя составляет единицы нанометров.

Заключение

В результате работы были получены зависимости коэффициентов распыления и значений эффективной шероховатости поверхности для срезов (100), (110) и (111) монокристаллического кремния от энергии ионов Ne при нормальном падении. Наименьшим коэффициентом распыления, а следовательно, и наименьшей скоростью травления при облучении ускоренными ионами Ne обладает кремний (100). Обнаружено схожее поведение

поверхности со случаем облучения ускоренными ионами Ar, но ввиду меньшей массы ионов неона значение пороговой энергии аморфизации лежит ниже 200 eV. Данный факт означает, что ускоренными ионами неона можно убирать нарушенный слой (который составляет $\sim 1 \mu\text{m}$) во время процедуры коррекции формы и в то же время создавать нарушенный слой, который составит единицы нанометров.

Определены оптимальные параметры для проведения локальной коррекции ошибок формы и полировки пучками ускоренных ионов неона. Для кремния (100) и (110) в диапазоне энергий 300–900 eV наблюдается сглаживание шероховатости в диапазоне пространственных частот $4.9 \cdot 10^{-2} - 6.3 \cdot 10^1 \mu\text{m}^{-1}$. Для ориентации (111) наилучший результат по шероховатости был получен для ускоренных ионов неона в диапазоне энергий 300–600 eV.

Благодарности

Использовано оборудование ЦКП ИФМ РАН.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №21-72-30029.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R.E. Riveros, M.P. Biskach, K.D. Allgood, J.D. Kearney, M. Hlinka, A. Numata, W.W. Zhang. *Fabrication of Lightweight Silicon x-ray Mirrors for High-Resolution x-ray Optics*. SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2018, Austin, Texas, United States. Proceedings, **10699**, 106990P (2018). DOI: 10.1117/12.2313409
- [2] P.Z. Takacs. *Synchrotron Radiation News*, **2** (26), 24 (1989).
- [3] E. Spiller, D. Stearns, M. Krumrey. *J. Appl. Phys.*, **74**, 107 (1993). DOI: 10.1063/1.354140
- [4] A. Rack, T. Weitkamp, M. Riotte, D. Grigoriev, T. Rack, L. Helfen, T. Baumbach, R. Dietsch, T. Holz, M. KrAämer, F. Siewert, M. Meduna, P. Cloetens, E. Ziegler. *J. Synchrotron Rad.*, **17**, 496 (2010). DOI: 10.1107/S0909049510011623
- [5] D. Zhu, Y. Feng, S. Stoupin, S.A. Terentyev, H.T. Lemke, D.M. Fritz, M. Chollet, J.M. Glowina, R. Alonso-Mori, M. Sikorski, S. Song, T.B. van Driel, G.J. Williams, M. Messerschmidt, S. Boutet, V.D. Blank, Yu.V. Shvyd'ko, A. Robert. *Rev. Sci. Instrum.*, **85**, 063106 (2014). DOI: 10.1063/1.4880724
- [6] K. Li, Y. Liu, M. Seaberg, M. Chollet, Th.M. Weiss, A. Sakdinawat. *Opt. Express*, **28** (8), 10939 (2020). DOI: 10.1364/OE.380534
- [7] M. Polikarpov, V. Polikarpov, I. Snigireva, A. Snigirev. *Phys. Procedia*, **84**, 213 (2016). DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.037
- [8] М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало, Н.Н. Салашенко. *ЖТФ*, **92** (8), 1219 (2022)
- [9] M. Demmler, M. Zeuner, F. Allenstein, Th. Dunger, M. Nestler, S. Kiontke. *Ion Beam Figuring (IBF) for High Precision Optics*. SPIE MOEMS-MEMS, 2010, San Francisco, California, United States. Proceedings, **7591**, 75910Y (2010). DOI: 10.1117/12.840908
- [10] W. Liao, Y. Dai, X. Xie, L. Zhou. *Appl. Opt.*, **53** (19), 4275 (2014). DOI: 10.1364/AO.53.004275
- [11] D.J. Mazey, R.S. Nelson, R.S. Barnes. *Philosophical Magazine*, **17** (150), 1145 (1968). DOI: 10.1080/14786436808223192
- [12] G. Carter, V. Vishnyakov. *Surface and Interface Analysis*, **23**(7-8), 514 (1995). DOI: 10.1002/sia.740230711
- [13] M.S. Mikhailenko, N.I. Chkhalo, I.A. Kaskov, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, I.G. Zabrodin. *Precision Engineering*, **48**, 338 (2017). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.01.004
- [14] Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.telstv.ru/?page=en_silicon_wafers
- [15] N.I. Chkhalo, S.A. Churin, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Zorina. *Appl. Opt.*, **55** (6), 1249 (2016). DOI: 10.1364/AO.55.001249
- [16] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko, M.V. Zorina. *Rev. Sci. Instrum.*, **86**, 016102 (2015).
- [17] J. Ziegler, J.P. Biersack, M.D. Ziegler. *SRIM-The Stopping and Ranges of Ions in Solids* (SRIM Co., Chester, 2008), www.srim.org