

13
**Изучение влияния энергии ионов аргона на шероховатость
поверхности основных срезов монокристаллического кремния**

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

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

Поступило в Редакцию 6 апреля 2022 г.
В окончательной редакции 6 апреля 2022 г.
Принято к публикации 6 апреля 2022 г.

Приведены результаты изучения энергетических зависимостей коэффициента распыления и значения эффективной шероховатости поверхности монокристаллического кремния при облучении ионами аргона с энергией 200–1000 eV. В результате работы были определены параметры ионно-пучкового травления ускоренными ионами Ar, обеспечивающие высокий коэффициент распыления (скорость травления) и значение эффективной шероховатости в диапазоне пространственных частот $4.9 \cdot 10^{-2}$ – $6.3 \cdot 10^1 \mu\text{m}^{-1}$ менее 0.3 nm для основных срезов монокристаллического кремния $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$.

Ключевые слова: ионное травление, монокристаллический кремний, шероховатость поверхности, малоразмерный ионный пучок, коэффициент распыления.

DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52787.70-22

Введение

В связи с модернизацией синхротронов 3-го поколения и появлением синхротронов 4-го поколения, а также лазеров на свободных электронах, стали еще более актуальными проблемы гладкости и точности формы отражающих поверхностей и их радиационной стойкости. Оптические элементы для обозначенных выше источников представляют собой плоские или близкие к плоскости элементы, и в настоящее время требования на их точность формы по параметру среднеквадратичного отклонения (RMS) составляют несколько нанометров и на шероховатость — менее 0.3 nm [1]. Проблема осложняется термоиндуцированными искажениями формы оптических элементов из-за больших радиационных, до нескольких kW, тепловых нагрузок. И теоретические расчеты, и практика показали, что в качестве материала подложек для зеркал, работающих под столь мощными пучками излучения, может рассматриваться только монокристаллический кремний [2]. В этой связи в последнее время появились работы по финишной обработке монокристаллического кремния с целью обеспечить минимальные ошибки формы и/или шероховатость поверхности [3,4]. Одним из наиболее перспективных методов финишной доводки поверхностей оптических элементов является коррекция локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком — IBF (Ion Beam Figuring) [5]. Данный метод позволяет получать высокоточные поверхности с минимальной шероховатостью [6,7]. Однако применение IBF для обработки монокристаллических материалов сталкивается с серьезными проблемами.

Ионное травление кристаллических материалов довольно сложный и до конца не изученный процесс. Взаимная ориентация кристаллографических плоскостей, среза кристалла, энергии иона и угла его падения на поверхность образца могут вносить существенную неоднозначность в процедуру ионно-пучкового травления. Работ по изучению формы и шероховатости поверхности основных срезов монокристаллического кремния при ионно-пучковом травлении в литературе практически не встречается, за исключением большого числа работа с реактивным ионно-пучковым травлением [8,9].

В задачах коррекции формы оптимальным как с точки зрения математического моделирования, так и технологичности процесса IBF является поддержание нормального падения пучка ионов на обрабатываемую поверхность [10,11]. В связи с чем в рамках настоящей работы исследовалось влияние бомбардировки ионами Ar различных энергий (угол падения—нормаль) на величину среднеквадратической шероховатости поверхности основных срезов ($\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$) монокристаллического кремния.

1. Описание эксперимента

Исследования проводились на установке ионно-пучкового травления, подробно описанной в [6]. В качестве экспериментальных образцов использовались стандартные кремниевые подложки для микроэлектронной промышленности [12] (исходная шероховатость поверхности ~ 0.25 nm). Пластина нарезалась на куски размером 15×15 mm. Для проведения эксперимента образец устанавливался на предметный столик под нормалью

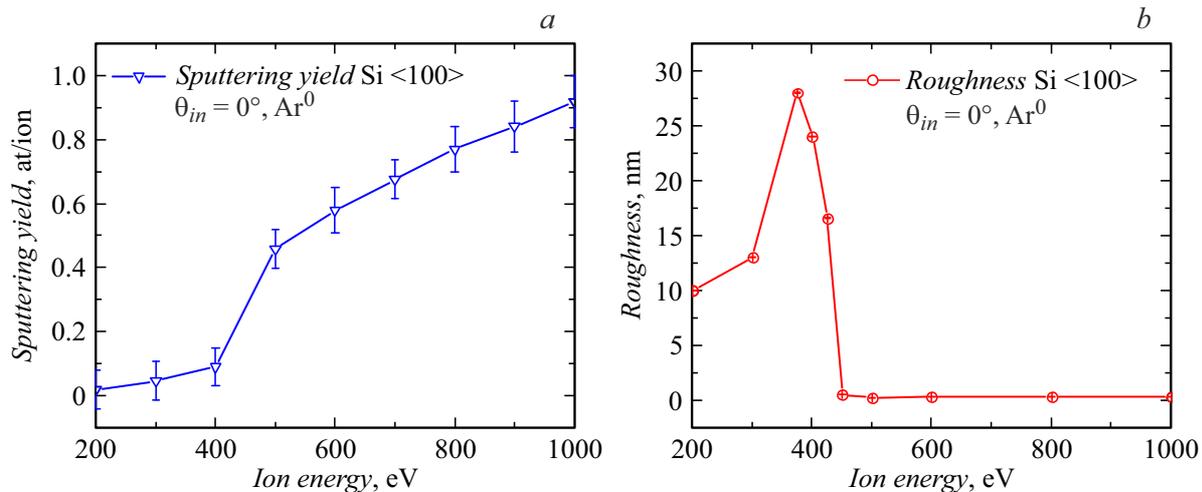


Рис. 1. Зависимости коэффициента распыления (слева) и значения эффективной шероховатости поверхности Si <100> от энергии ионов аргона. Параметры экспериментов: $j = 0.7 \text{ mA/cm}^2$; $\theta = 90^\circ$.

к пучку ионов. Для контроля глубины травления использовался „свидетель“, часть поверхности которого закрывалась маской. Далее в камере создавалось рабочее давление газа $1.3 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$; 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).

Из измеренных значений глубины травления, зная время, вычислялось значение для скорости травления V_{etching} . Так как V_{etching} пропорциональна коэффициенту ионного распыления, то, определив эту пропорциональность, можно вычислить значения для коэффициента распыления Y . Взяв за основу определение коэффициента распыления, путем небольших преобразований получили выражение для Y , где входные данные — это параметры эксперимента:

$$Y = \frac{\rho e V_{\text{etching}} N_A}{\cos \theta_{\text{incid}} j M_2}, \quad (1)$$

где ρ — плотность мишени, N_A — число Авогадро, θ_{incid} — угол падения ионов на поверхность, j — плотность ионного тока, M_2 — молярная масса мишени и $V_{\text{etching}} = d/t$ — скорость травления, d — глубина травления, t — время экспозиции.

Среднеквадратическая шероховатость измеряется на зондовом микроскопе N_{tegra} (NT-MDT) в диапазоне пространственных частот (q) $4.9 \cdot 10^{-2} - 6.3 \cdot 10^1 \mu\text{m}^{-1}$ (размеры кадров атомно-силового микроскопа (АСМ) от 2×2 до $40 \times 40 \mu\text{m}$). Значение эффективной шерохова-

тости находится из площади под кривой PSD-функции, подробнее о методе можно прочитать в работе [13].

2. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены полученные зависимости коэффициента распыления и значения эффективной шероховатости поверхности монокристаллического кремния <100> от энергии ионов аргона.

Стоит заметить, что при энергии ионов около 400 eV (425 eV) наблюдается резкое изменение в поведении зависимости коэффициента распыления и эффективной шероховатости от энергии. Объясняется такое поведение тем, что при энергиях ионов менее 425 eV приповерхностный слой слабо аморфизован, ввиду чего происходит развитие шероховатости как следствие огранки кристалла. При энергиях ионов выше 425 eV вследствие ионно-индуцированного разрушения кристаллической решетки вблизи поверхности этот слой начинает вести себя как аморфный, что приводит к существенному снижению шероховатости поверхности. Например, в работе [14] по исследованию влияния ионного травления ионами Ag на шероховатость аморфного кремния показано, что поверхность сглаживается. Таким образом, показано, что методика IBF может быть применена для формирования прецизионных рентгенооптических элементов из монокристаллического кремния <100> с эффективной шероховатостью в диапазоне пространственных частот $4.9 \cdot 10^{-2} - 6.3 \cdot 10^1 \mu\text{m}^{-1}$ менее 0.3 nm.

Аналогичные исследования были проведены для образцов с ориентацией среза <110> и <111> (рис. 2, 3). На полученных зависимостях коэффициента распыления и значения эффективной шероховатости от энергии можно обнаружить схожее поведение, однако в отличие

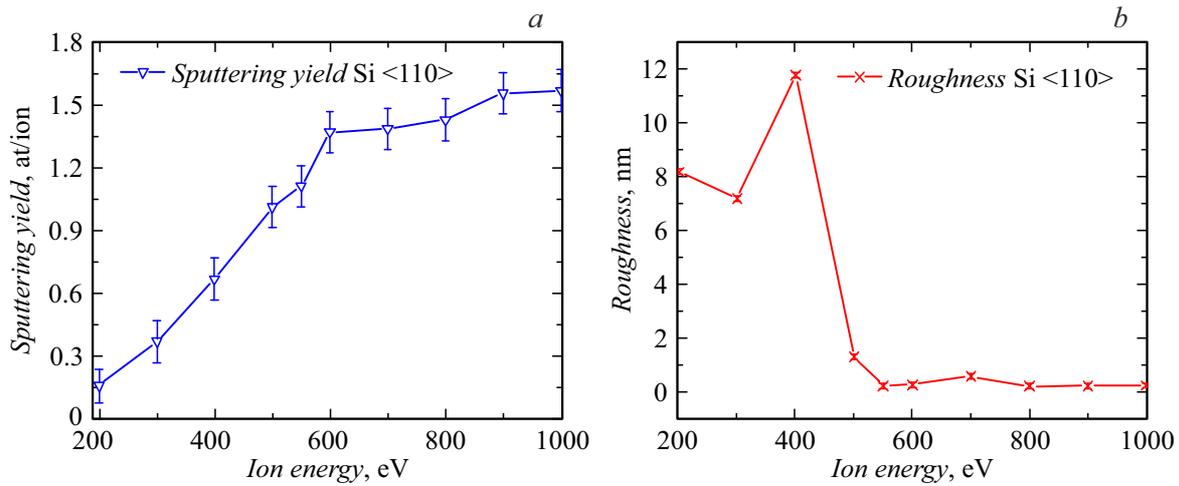


Рис. 2. Зависимости коэффициента распыления (слева) и значения эффективной шероховатости поверхности Si (110) от энергии ионов аргона. Параметры экспериментов: $j = 0.7 \text{ mA/cm}^2$; $\theta = 90^\circ$.

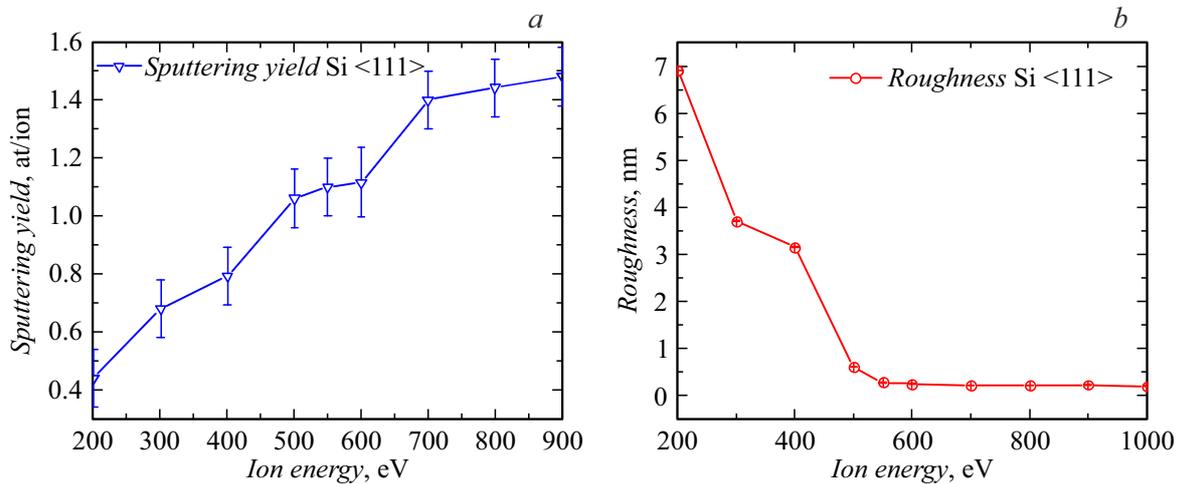


Рис. 3. Зависимости коэффициента распыления (слева) и значения эффективной шероховатости поверхности Si (111) от энергии ионов аргона. Параметры экспериментов: $j = 0.7 \text{ mA/cm}^2$; $\theta = 90^\circ$.

от ориентации <100> „скачок“ происходит при более высокой энергии ионов $\sim 550 \text{ eV}$.

Так же стоит отметить, что при энергиях ниже „критической“, поверхности этих срезов ведут себя схожим образом, а именно это проявляется в образовании глубоких ям (рис. 4).

Как видно из приведенных кадров АСМ, при травлении под нормалью ионами аргона низких энергий наблюдается схожая картина для всех трех ориентаций, а именно образование большого количества ям с поперечным размером до 500 nm . В то же время увеличение энергии, например до значений 800 eV , позволяет сглаживать даже изначально гладкую поверхность (исходная $\sigma \sim 0.25 \text{ nm}$) и сохранять значение эффективной шероховатости на приемлемом уровне ($\sigma < 0.3 \text{ nm}$) при съемах в несколько микрометров. Во всех вышеописанных экспериментах съем составлял $2\text{--}3 \text{ }\mu\text{m}$.

Заключение

В результате работы были определены параметры ионно-пучкового травления ускоренными ионами Ar, обеспечивающие высокий коэффициент распыления (скорость травления) и значение эффективной шероховатости в диапазоне пространственных частот $4.9 \cdot 10^{-2} \text{--} 6.3 \cdot 10^1 \text{ }\mu\text{m}^{-1}$ менее 0.3 nm для основных срезов монокристаллического кремния <100>, <110> и <111>. В частности, показано, что сглаживающий эффект для Si <100> достигается при энергии ионов более 425 eV , а для <110> и <111> при энергии более 550 eV . При меньших энергиях ионов наблюдается значительная деградация шероховатости поверхности. Такое поведение можно объяснить аморфизацией приповерхностного слоя, который при достижении определенного отношения аморфной фазы к кристаллической начинает

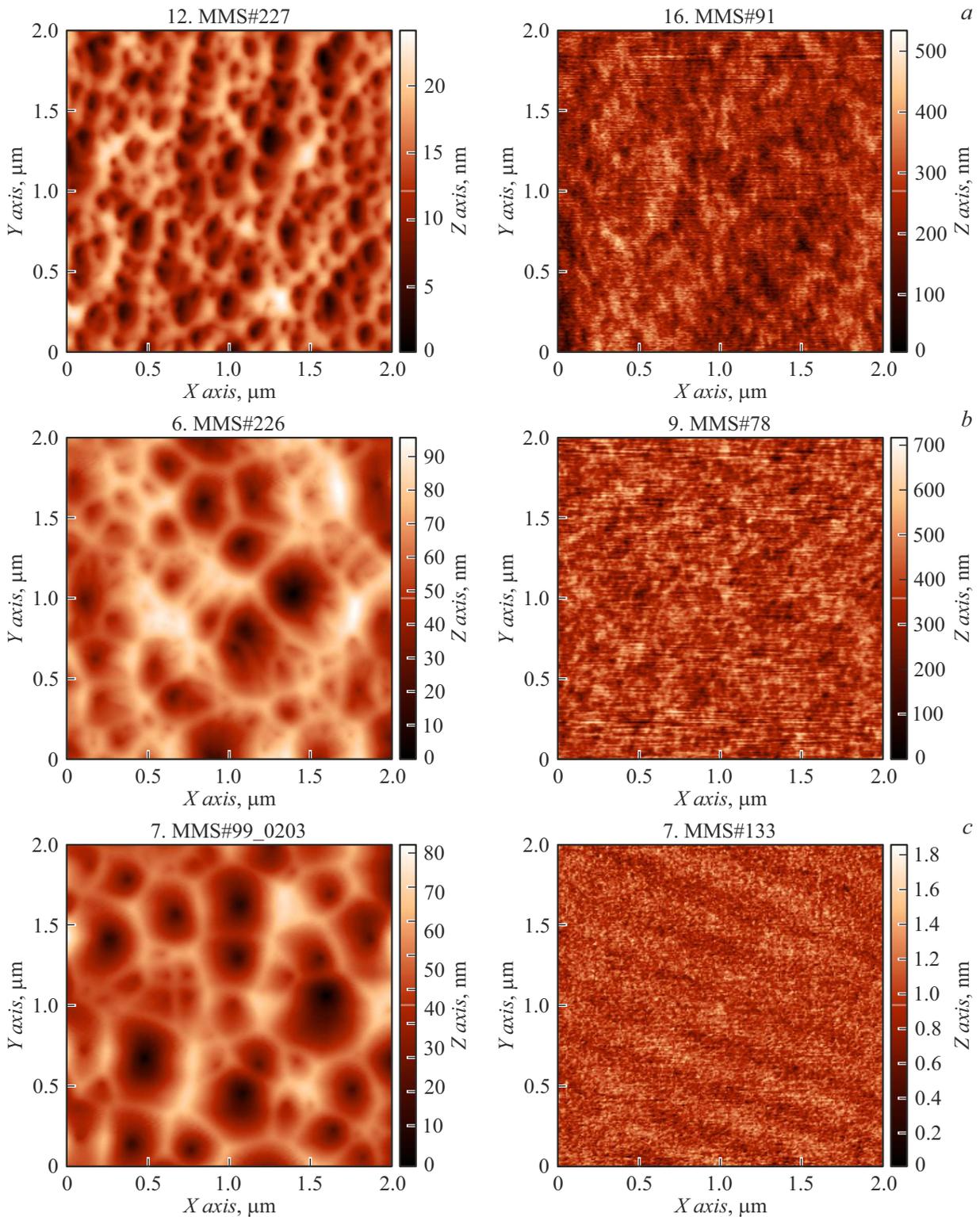


Рис. 4. АСМ кадры поверхностей монокристаллического кремния, травленного ионами аргона с энергией 400 eV (слева) и 800 eV (справа): *a* — Si <111>; *b* — Si <110>; *c* — Si <100> — после облучения под нормалью ускоренными ионами аргона с энергией 400 eV.

вести себя как аморфный. Таким образом, можно утверждать, что при энергии ионов аргона выше критической для каждой ориентации монокристаллического кремния

можно использовать ставшую уже традиционной методике IBF для асферизации поверхности или финишной коррекции локальных ошибок формы, при этом сохраняя

или даже сглаживая шероховатость в диапазоне пространственных частот $\nu = 4.9 \cdot 10^{-2} - 6.3 \cdot 10^1 \mu\text{m}^{-1}$.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-1362).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Samoylova, H. Sinn, F. Siewert, H. Mimura, K. Yamauchi, T. Tschentscher. Proc. SPIE, **7360**, 73600E (2009). DOI: 10.1117/12.822251
- [2] R.A. Paquin, M.R. Howells. Proc. SPIE, **3152** (1997). DOI: 10.1117/12.295549
- [3] H. Xiao, Y. Dai, J. Duan, Y. Tian, J. Li. Appl. Surf. Sci., **544**, 148954 (2021). DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.148954
- [4] T. Arnold, G. Böhm, R. Fechner, J. Meister, A. Nickel, F. Frost, T. Hänsel, A. Schindler. Nucl. Instrum. Meth. Phys. B, **616** (2-3), 147–156 (2010). DOI: 10.1016/j.nima.2009.11.013
- [5] M. Ghigo, S. Basso, M. Civitani, R. Gilli, G. Pareschi, B. Salmaso, G. Vecchi, W.W. Zhang. Proc. SPIE, **10706**, 107063I (2018). DOI: 10.1117/12.2313939
- [6] N.I. Chkhalo, I.A. Kaskov, I.V. Malyshev, M.S. Mikhaylenko, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, I.G. Zabrodin. Precis Eng., **48**, 338–346 (2017). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.01.004
- [7] X. Li, D. Wang, F. Nie, P. Wu, S. Zhao. Proc. SPIE, 12073, 120730L (2021). DOI: 10.1117/12.2605262
- [8] E. Vassallo, M. Pedroni, S.M. Pietralunga, R. Caniello, A. Cremona, F. Di Fonzo, F. Ghezzi, F. Inzoli, G. Monteleone, G. Nava, V. Spampinato, A. Tagliaferri, M. Zani, G. Angel-la. Thin Solid Films, **603**, 173–179 (2016). DOI: 10.1016/j.tsf.2016.02.008
- [9] Z. Fang, Y. Zhang, R. Li, Y. Liang, H. Deng. Int. J. Mach. Tools Manuf., **159**, 103649 (2020). DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2020.103649
- [10] W. Liao, Y. Dai, X. Xie, L. Zhou. Appl. Opt., **53** (19), 4266 (2014). DOI: 10.1364/AO.53.004266
- [11] W. Liao, Y. Dai, X. Xie, L. Zhou. Appl. Opt., **53** (19), 4275 (2014). DOI: AO.53.004275
- [12] Telecom STV. Silicon Wafers. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.telstv.ru/?page=en_silicon_wafers, свободный.
- [13] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko, M.V. Zorina. Rev. Sci. Instrum., **86**, 016102 (2015). DOI: 10.1063/1.4905336
- [14] M.S. Mikhailenko, N.I. Chkhalo, A.V. Mil'kov, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, I.L. Strulya, M.V. Zorina, S.Yu. Zuev. Surf. Coat. Technol., **311**, 351–356 (2017). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.01.023