

ISSN 1561-8323 (print)

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 538.975

Поступило в редакцию 11.09.2017
Received 11.09.2017**И. М. Климович¹, И. А. Романов¹, член-корреспондент Ф. Ф. Комаров¹, В. А. Зайков¹,
Л. А. Власукова¹, Ю. Н. Осин², А. М. Рогов², В. В. Воробьев², А. Л. Степанов²**¹*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*²*Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского Казанского научного центра
Российской академии наук, Казань, Российская Федерация***ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК КРЕМНИЯ,
ОСАЖДАЕМЫХ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ**

Аннотация. Методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии, а также спектрофотометрии исследованы морфология поверхности и оптические характеристики тонких Si-покрытий, сформированных методом магнетронного распыления. Показано, что при контролируемой вариации технологических параметров магнетронного распыления таких, как температура подложки и потенциал смещения, можно менять морфологию поверхности пленок Si. Для некоторых режимов осаждения обнаружено появление на поверхности нитевидных структур и/или круглых углублений, изменения положения минимумов и максимумов в оптических спектрах отражения и пропускания.

Ключевые слова: магнетронное осаждение, Si-покрытия, атомно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, спектры отражения и пропускания

Для цитирования: Особенности формирования тонких пленок кремния, осаждаемых магнетронным распылением / И. М. Климович [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 6. – С. 35–41.

**Iryna M. Klimovich¹, Ivan A. Romanov¹, Fadei F. Komarov¹, Valery A. Zaikov¹, Liudmila A. Vlasukova¹,
Yury N. Osin², Alexey M. Rogov², Vyacheslav V. Vorob'ev², Andrey L. Stepanov²**¹*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*²*Kazan E. K. Zavoisky Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Kazan, Russian Federation***FEATURES OF FORMATION OF THIN SILICON COATINGS DEPOSITED BY MAGNETRON SPUTTERING**

Abstract. The surface morphology and optical properties of Si coatings formed by magnetron sputtering were studied using atomic force microscopy, scanning electron microscopy, and spectrophotometry methods. The possibility to influence the surface morphology of coating (filamentous structures and/or round holes) and the location of maxima and minima in reflectance and transmittance via a controllable variation of magnetron sputtering regimes (substrate temperature and bias potential) is shown.

Keywords: magnetron sputtering method, Si coating, atomic force microscopy, scanning electron microscopy, reflectance and transmittance spectra

For citation: Klimovich I. M., Romanov I. A., Komarov F. F., Zaikov V. A., Vlasukova L. A., Osin Yu. N., Rogov A. M., Vorob'ev V. V., Stepanov A. L. Features of formation of thin silicon coatings deposited by magnetron sputtering. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 61, no. 6, pp. 35–41 (in Russian).

Введение. Для работы космических станций и искусственных спутников Земли необходимы эффективные и легкие по массе источники электрической энергии, в качестве которых можно использовать тонкопленочные солнечные элементы. Тонкие пленки Si являются перспективным материалом для создания компонент фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии [1]. Характеристики таких устройств в значительной степени зависят от структурных особенностей

и оптических абсорбционных свойств тонкопленочного Si [2]. В свою очередь, физико-химические параметры тонких пленок определяются методом и технологией их формирования.

Магнетронное распыление – один из наиболее часто используемых в промышленности вакуумно-плазменных методов осаждения покрытий высокого качества [3]. Однако данные о влиянии технологических режимов магнетронного распыления на морфологию и оптические свойства Si-покрытий в литературе представлены очень ограниченно. Например, можно упомянуть работы по магнетронному осаждению Si-покрытий на поверхность серебряных пленок [4; 5] или формирование нанопроволочных Si-слоев на ИТО стеклах [6].

Цель исследования – определение характера морфологии поверхности и оптических свойств (спектры отражения и пропускания) Si-покрытий, формируемых при различных технологических параметрах магнетронного распыления.

Материалы и методы исследования. В качестве подложек для нанесения покрытий использовались натриево-кальциевые покровные стекла размером 18×18 и 24×24 мм² толщиной 0,18 мм. Для удаления остаточных органических загрязнений и улучшения адгезии осаждаемых Si-покрытий к подложкам проводилась их предварительная ионная очистка с помощью ионного источника «Радикал». Режим работы источника задавался следующими параметрами: давление аргона $P = 6,0 \cdot 10^{-2}$ Па; ток разряда $I = 20$ мА; напряжение разряда $U = 2,4$ кВ; время ионной очистки $t = 10$ мин. Процессы очистки и осаждения покрытий проводились в едином вакуумном цикле.

Процессы распыления осуществлялись в среде аргона с использованием в качестве мишени кремниевой пластины марки КДБ-2. Расстояние мишень–подложка выбиралось равным 80 мм. Рабочее давление в вакуумной камере поддерживалось постоянным.

Для осаждения Si-покрытий использовался режим HiPIMS (high-power impulse magnetron sputtering) при следующих параметрах: давление газа $P = 7,0 \cdot 10^{-2}$ Па; частота $f = 50$ кГц; скважность $D = 80$ %; ток разряда $I = 610$ мА = const; напряжение разряда $U_{\text{разр}} = 710\text{--}720$ В; время напыления покрытий составляло 2 мин 30 с. Для изучения влияния потенциала смещения и нагрева подложки на морфологию поверхности и оптические свойства Si-покрытий проводились процессы осаждения в различных режимах с вариацией температуры нагрева ($T_{\text{подл}}$) и потенциала смещения ($U_{\text{см}}$) на подложке, указанные в таблице.

Элементный состав Si покрытий, сформированных в различных режимах осаждения
The elemental composition of Si coatings formed at different deposition parameters

Образец Sample	Краткое описание режима осаждения Short description of the deposition regime	Элементный состав, ат. % Elemental composition, at. %								
		C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca
	Стеклаянная подложка	18,73	60,70	9,15	1,12	0,08	9,68	0,00	0,00	0,53
1	Без нагрева и $U_{\text{см}}$	3,31	53,13	8,97	1,67	0,17	29,00	0,07	0,00	3,68
2	$U_{\text{см}} = -200$ В	3,41	52,63	8,29	1,73	0,17	29,68	0,08	0,00	4,01
3	$T_{\text{подл}} = 380$ °С	12,26	50,21	8,09	1,54	0,12	24,27	0,00	0,00	3,51
4	$U_{\text{см}} = -175$ В, $T_{\text{подл}} = 480$ °С	7,84	41,01	7,14	1,67	0,17	38,34	0,08	0,05	3,72
5	$U_{\text{см}} = -90$ В, $T_{\text{подл}} = 270$ °С	12,01	38,35	7,87	1,64	0,21	35,92	0,00	0,00	4,00
6	$U_{\text{см}} = -80$ В, $T_{\text{подл}} = 250$ °С	12,28	34,88	7,62	1,60	0,38	39,18	0,00	0,00	4,07

Исследование морфологии поверхности и элементного состава Si покрытий проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss), оборудованном спектрометром Aztec X-Max (Oxford Instruments) для энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (ЭДРС). Для изучения поверхности исследуемых Si-покрытий также использовалась атомно-силовая микроскопия (АСМ) в полуконтактной моде (микроскоп FastScan, Bruker). Спектры отражения и пропускания были измерены на системе спектрофотометрического контроля на базе малогабаритного монохроматора S-100.

Результаты и их обсуждение. В результате проведения процессов магнетронного распыления кремниевой мишени в указанных выше режимах были получены образцы покрытий Si, не превышающие по толщине 200 нм (исходя из данных о времени осаждения и оптической прозрачности покрытий).

В таблице представлены результаты ЭДРС для образцов Si-покрытий, осажденных в различных технологических режимах магнетронного распыления, и для исходной стеклянной подложки.

Поскольку толщина пленок была меньше глубины зондирования электронным пучком, в спектрах ЭДРС присутствуют сигналы от элементов подложки из натриево-кальциевого стекла, в числе которых кислород (более 50 ат. %), что затрудняет точный количественный анализ сформированных Si-пленок.

На рис. 1 представлены СЭМ изображения поверхности исследуемых покрытий.

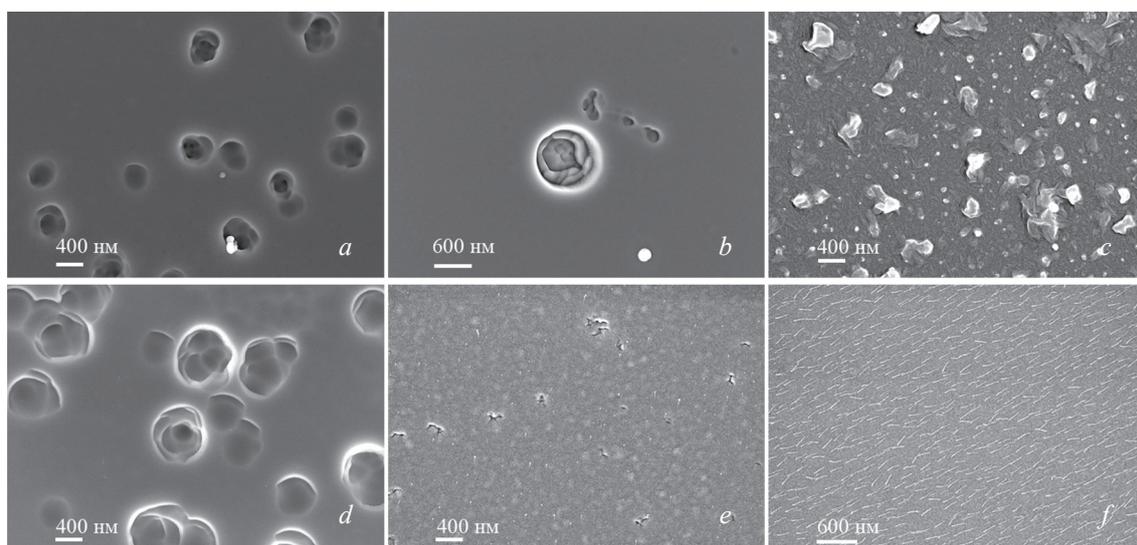


Рис. 1. СЭМ изображения поверхности покрытий Si, сформированных при вариации технологических режимов магнетронного распыления: *a* – без подачи $U_{см}$ и нагрева подложки (№ 1); *b* – при подаче потенциала смещения $U_{см} = -200$ В на подложку (№ 2); *c* – при нагреве подложки $T_{подл} = 380$ °С (№ 3); *d* при $U_{см} = -175$ В и $T_{подл} = 480$ °С (№ 4); *e* – при $U_{см} = -90$ В и $T_{подл} = 270$ °С (№ 5); *f* – при $U_{см} = -80$ В и $T_{подл} = 250$ °С (№ 6)

Fig. 1. SEM images of surfaces of Si coatings formed with the variation of magnetron sputtering technological parameters: *a* – without substrate biasing U_b and substrate heating (no. 1); *b* – at $U_b = -200$ V (no. 2); *c* – at substrate heating $T_{sub} = 380$ °C (no. 3); *d* – at $U_b = -175$ V and $T_{sub} = 480$ °C (no. 4); *e* – at $U_b = -90$ V and $T_{sub} = 270$ °C (no. 5); *f* – at $U_b = -80$ V and $T_{sub} = 250$ °C (no. 6)

На поверхности Si-покрытий, сформированных без нагрева подложки (рис. 1, *a* и 1, *b*, образцы № 1 и 2), на гладкой плоскости образуются углубления круглой формы («дырки»), причем плотность данных углублений уменьшается при подаче потенциала смещения. При нагреве подложки во время осаждения Si-пленок (рис. 1, *c*, образец № 3) поверхность становится более рельефной из-за появления на ней большого количества структурных образований нерегулярной формы и размеров, при этом «дырки» на поверхности отсутствуют.

«Дырки» видны и на рис. 1, *d* и 1, *e* (образцы № 4 и № 5). При этом совместное уменьшение значения потенциала смещения и температуры нагрева подложки способствует уменьшению плотности таких образований и в дальнейшем к их полному исчезновению (на образце № 6 круглые углубления отсутствуют). Отдельно следует отметить появление многочисленных нитевидных структурных образований (рис. 1, *e* и 1, *f*, образцы № 5 и № 6).

На рис. 2 представлены результаты АСМ измерений для Si покрытий.

Результаты АСМ позволяют более подробно рассмотреть структурные особенности образцов, которые качественно согласуются с данными, полученными методом СЭМ. На поверхности образца № 1 (рис. 2, *a*) образуются круглые углубления диаметром 300–500 нм и глубиной порядка 7–20 нм. При подаче потенциала смещения (образец № 2, рис. 2, *b*) плотность углублений уменьшается, средние значения их диаметра и глубины понижаются до 150–250 нм и 1–5 нм соответственно. При нагреве подложки во время осаждения (образец № 3, рис. 2, *c*) на поверхности пленки появляется большое количество структурных образований нерегулярной формы и размеров, высотой порядка 25–30 нм.

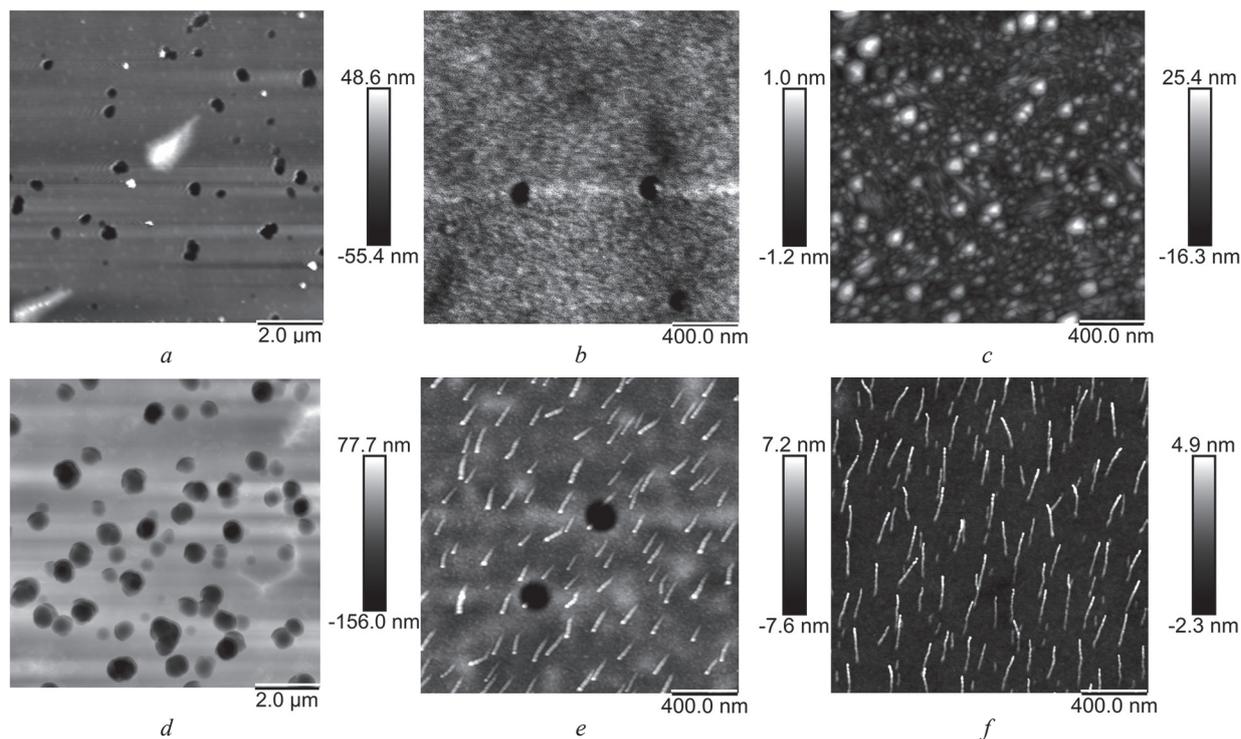


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности Si-покрытий, сформированных при различных технологических режимах магнетронного распыления кремниевой мишени: *a* – без подачи $U_{см}$ и нагрева подложки (№ 1); *b* – при подаче потенциала смещения $U_{см} = -200$ В на подложку (№ 2); *c* – при нагреве подложки $T_{подл} = 380$ °С (№ 3); *d* – при $U_{см} = -175$ В и нагреве $T_{подл} = 480$ °С (№ 4); *e* – при $U_{см} = -90$ В и нагреве $T_{подл} = 270$ °С (№ 5); *f* – при $U_{см} = -80$ В и нагреве $T_{подл} = 250$ °С (№ 6)

Fig. 2. AFM images of surfaces of Si coatings formed at various technological regimes of the silicon target magnetron sputtering: *a* – without substrate biasing U_b and substrate heating (no. 1); *b* – at $U_b = -200$ V (no. 2); *c* – at substrate heating $T_{sub} = 380$ °C (no. 3); *d* – at $U_b = -175$ V and $T_{sub} = 480$ °C (no. 4); *e* – at $U_b = -90$ V and $T_{sub} = 270$ °C (no. 5); *f* – at $U_b = -80$ V and $T_{sub} = 250$ °C (no. 6)

На поверхности образца № 4 (рис. 2, *d*) наблюдаются круглые углубления диаметром 450–750 нм и глубиной 50–75 нм. При уменьшении $T_{подл}$ до 270 °С и $U_{см}$ до –90 В (образец № 5, рис. 2, *e*) плотность «дырок» становится заметно меньшей, их диаметр и глубина уменьшается до значений 180–200 нм и 5–10 нм соответственно. При этом на поверхности покрытий появляются вытянутые нитевидные структурные образования длиной ~100–250 нм, диаметром ~20–50 нм и высотой до 7 нм. Дальнейшее уменьшение $T_{подл}$ до 250 °С и $U_{см}$ до –80 В (образец № 6, рис. 2, *f*) приводит к полному исчезновению «дырок» и увеличению количества нитевидных структурных образований, увеличению их длины до ~150–300 нм, уменьшению значений диаметра и высоты до ~15–30 нм и 5 нм соответственно.

Механизмы образования нитевидных структур и круглых углублений на поверхности покрытий Si при магнетронном распылении в литературе не описаны. Поэтому для более глубокого изучения процессов формирования таких структур требуются дальнейшие исследования.

Следует отметить, что сильные различия в морфологии поверхности могут вызывать значительные изменения в отражательной и поглощательной способностях покрытий [7–9].

На рис. 3 приведены спектральные зависимости коэффициентов отражения и пропускания сформированных Si-покрытий. Спектры отражения пленок, сформированных без нагрева подложки (рис. 3, *a*, образцы № 1 и № 2), имеют максимум коэффициента отражения в районе 700 нм, при этом коэффициент отражения образца № 2 больше на 5–13 %. В этой же спектральной области (~700 нм) находится минимум коэффициента отражения образца № 3, сформированного при нагреве подложки до $T_{подл} = 380$ °С. Спектры отражения образцов № 4, 5 и 6 (рис. 3, *b*) имеют схожий вид, проявляют интерференционный характер и различаются положением соответствующих минимумов и максимумов, которые отсутствуют в отражении объемных образцов Si [10].

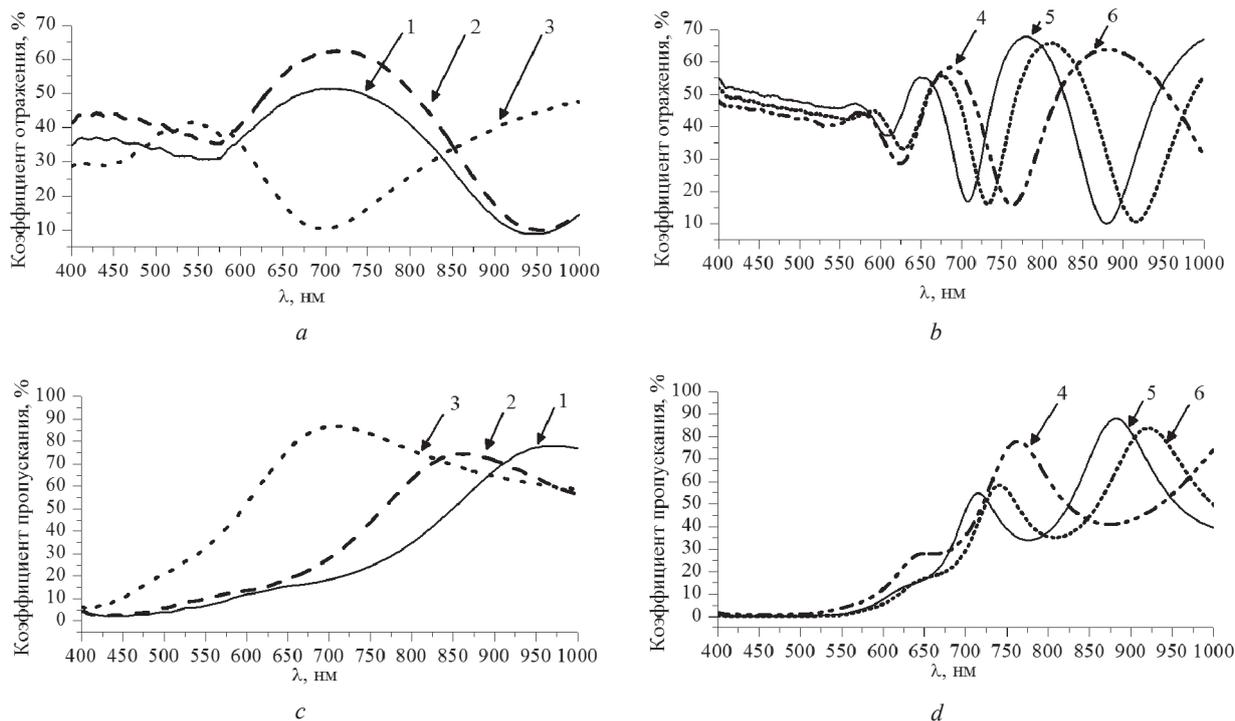


Рис. 3. Спектральные характеристики покрытий Si, сформированных при различных режимах осаждения (цифрами указаны номера образцов из таблицы): *a* – спектры отражения образцов 1, 2 и 3; *b* – спектры отражения образцов 4, 5 и 6; *c* – спектры пропускания образцов 1, 2 и 3; *d* – спектры пропускания образцов 4, 5 и 6

Fig. 3. Spectral characteristics of Si coatings formed under different deposition conditions (numerals indicate the sample numbers from Table): *a* – reflectance spectra of samples 1, 2 and 3; *b* – reflectance spectra of samples 4, 5 and 6; *c* – transmittance spectra of samples 1, 2 and 3; *d* – transmittance spectra of samples 4, 5 and 6

Вид спектров пропускания, изображенных на рис. 3, *c*, отличается от спектров пропускания на рис. 3, *d*. При этом минимумы и максимумы спектров отражения и пропускания всех образцов смещены по отношению друг к другу.

Из анализа спектральных зависимостей, представленных на рис. 3, можно заключить, что совместное использование нагрева подложки и подачи на нее потенциала смещения (образцы № 3, 4 и 5) приводит к проявлению интерференционного характера поведения спектральных зависимостей.

Очевидно, что спектральные положения максимумов и минимумов определяются не только рельефом поверхности, но и толщинами сформированных пленок и диэлектрическими константами. Однако общая характеристика пленок заключается в том, что они оказываются оптически прозрачными, что представляется важным для материалов фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. Таким образом, задавая параметры магнетронного осаждения пленок, можно варьировать спектральные характеристики и обеспечивать оптическую прозрачность Si-покрытий в определенных спектральных областях.

Заключение. На основании результатов проведенных исследований можно заключить, что метод магнетронного распыления позволяет получать оптически прозрачные в определенных спектральных областях Si-покрытия. Методами СЭМ и АСМ установлено, что технологические параметры (температура подложки и потенциал смещения) магнетронного распыления оказывают значительное влияние на морфологию поверхности Si-покрытий (на поверхности могут образовываться круглые углубления или появляться структурные образования различных форм и размеров). Оптической спектрофотометрией показано, что положения минимумов и максимумов спектральных коэффициентов отражения и пропускания образцов зависят от условий их изготовления, т. е. температуры и потенциала смещения на подложке. Поэтому подбором определенных технологических параметров магнетронного распыления можно формировать Si-слои с заданными оптическими характеристиками.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-12-01176).

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 17-12-01176).

Список использованных источников

1. Немчинова, Н. В. Кремний в XXI веке / Н. В. Немчинова, В. Э. Клѐц, А. И. Непомнящих // *Фундаментальные исследования*. – 2006. – № 12. – С. 13–17.
2. Анализ рамановских спектров аморфно-нанокристаллических пленок кремния / С. В. Гайслер [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2004. – Т. 46, № 8. – С. 1484–1488.
3. Magnetron sputtering – Milestones of 30 years / G. Bräuer [et al.] // *Vacuum*. – 2010. – Vol. 84, N 12. – P. 1354–1359. doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.12.014
4. Growth and structural properties of silicon on Ag films prepared by 40.68 MHz very-high-frequency magnetron sputtering / J. Guo [et al.] // *Plasma Science and Technology*. – 2017. – Vol. 19, N 7. – 075502 (8 pp). doi.org/10.1088/2058-6272/aa6395
5. Effect of driving frequency on the structure of silicon grown on Ag (111) films by very-high-frequency magnetron sputtering / J. Guo [et al.] // *Chinese Physics B*. – 2017. – Vol. 26, N 6. – 065207 (5 pp). doi.org/10.1088/1674-1056/26/6/065207
6. Silicon nanowires prepared by hydrogen-assisted rf-magnetron sputtering on bismuth-coated ITO glass / H. Wu [et al.] // *Materials Letters*. – 2017. – N 188. – P. 312–315. doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.049
7. Заверюхин, Б. Н. Изменение коэффициента отражения излучения от поверхности полупроводников в спектральном диапазоне $\lambda = 0,2\text{--}20$ мкм под воздействием ультразвуковых волн / Б. Н. Заверюхин, Н. Н. Заверюхина, О. М. Турсункулов // *Письма в Журнал технической физики*. – 2002. – Т. 28, № 18. – С. 1–12.
8. Textured silicon: A selective absorber for solar thermal conversion / J. I. Gittleman [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 1979. – Vol. 35, N 10. – P. 742–744. doi.org/10.1063/1.90953
9. Micro- and Nanostructured Surfaces for Selective Solar Absorption / I. E. Khodasevych [et al.] // *Advanced Optical Materials*. – 2015. – Vol. 3, N 7. – P. 852–881. doi.org/10.1002/adom.201500063
10. Kurtin, S. Ion implantation damage of silicon as observed by optical reflection spectroscopy in the 1 to 6 eV region / S. Kurtin, G. A. Shifrin, T. C. McGill // *Applied Physics Letters*. – 1969. – Vol. 14, N 7. – P. 223–225. doi.org/10.1063/1.1652788

References

1. Nemchinova N. V., Klets V. E., Nepomnyashchikh A. I. The Silicon in the XXI century. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*, 2006, no. 12, pp. 13–17 (in Russian).
2. Gaisler S. V., Semenova O. I., Sharafutdinov R. G., Kolesov B. A. Analysis of Raman spectra of amorphous-nanocrystalline silicon films. *Physics of the Solid State*, 2004, vol. 46, no. 8, pp. 1528–1532. doi.org/10.1134/1.1788789
3. Bräuer G., Szyszka B., Vergöhl M., Bandorf R. Magnetron sputtering – Milestones of 30 years. *Vacuum*, 2010, vol. 84, no. 12, pp. 1354–1359. doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.12.014
4. Guo Jia-Min, Ye Chao, Wang Xiangying, Yang Peifang, Zhang Su. Growth and structural properties of silicon on Ag films prepared by 40.68 MHz very-high-frequency magnetron sputtering. *Plasma Science and Technology*, 2017, vol. 19, no. 7, 075502 (8 pp). doi.org/10.1088/2058-6272/aa6395
5. Guo Jia-Min, Ye Chao, Wang Xiang-Ying, Yang Pei-Fang, Zhang Su. Effect of driving frequency on the structure of silicon grown on Ag (111) films by very-high-frequency magnetron sputtering. *Chinese Physics B*, 2017, vol. 26, no. 6, 065207 (5 pp). doi.org/10.1088/1674-1056/26/6/065207
6. Wu Haifeng, Jiang Xiangdong, Li Wei, Wang Jimin, Zeng Yixiong, Ming Yangzhou. Silicon nanowires prepared by hydrogen-assisted rf-magnetron sputtering on bismuth-coated ITO glass. *Materials Letters*, 2017, vol. 188, pp. 312–315. doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.049
7. Zaveryukhin B. N., Zaveryukhina N. N., Tursunkulov O. M. Variation of the reflection coefficient of semiconductors in a wavelength range from 0.2 to 20 μm under the action of ultrasonic waves. *Technical Physics Letters*, 2002, vol. 28, no. 9, pp. 752–756. https://doi.org/10.1134/1.1511774
8. Gittleman J. I., Sichel E. K., Lehmann H. W., Widmer R. Textured silicon: A selective absorber for solar thermal conversion. *Applied Physics Letters*, 1979, vol. 35, no. 10, pp. 742–744. doi.org/10.1063/1.90953
9. Khodasevych I. E., Wang L., Mitchell A., Rosengarten G. Micro- and Nanostructured Surfaces for Selective Solar Absorption. *Advanced Optical Materials*, 2015, vol. 3, no. 7, pp. 852–881. doi.org/10.1002/adom.201500063
10. Kurtin S., Shifrin G. A., McGill T. C. Ion implantation damage of silicon as observed by optical reflection spectroscopy in the 1 to 6 eV region. *Applied Physics Letters*, 1969, vol. 14, no. 7, pp. 223–225. doi.org/10.1063/1.1652788

Информация об авторах

Климович Ирина Михайловна – мл. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 1, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: imklimovich@gmail.com.

Information about the authors

Klimovich Iryna Mikhailovna – Junior researcher. Belarusian State University (1, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: imklimovich@gmail.com.

Романов Иван Александрович – мл. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 1, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: romivan@bsu.by.

Комаров Фадей Фадеевич – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 1, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: komarovf@bsu.by.

Зайков Валерий Александрович – ст. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 1, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: valery48@tut.by.

Власукова Людмила Александровна – канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 1, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vlasukova@mail.ru.

Осин Юрий Николаевич – директор. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН (Сибирский тракт, 10/7, 420029, Казань, Российская Федерация). E-mail: yury.osin@gmail.com.

Рогов Алексей Михалович – аспирант. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН (Сибирский тракт, 10/7, 420029, Казань, Российская Федерация). E-mail: alexeyrogov11@gmail.com.

Воробьев Вячеслав Валерьевич – аспирант. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН (Сибирский тракт, 10/7, 420029, Казань, Российская Федерация). E-mail: slavik.ksu@mail.ru

Степанов Андрей Львович – д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН (Сибирский тракт, 10/7, 420029, Казань, Российская Федерация). E-mail: aanstep@gmail.com.

Romanov Ivan Aleksandrovich – Junior researcher. Belarusian State University (1, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: romivan@bsu.by.

Komarov Fadei Fadeevich – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department. Belarusian State University (1, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: komarovf@bsu.by.

Zaikou Valery Aleksandrovich – Senior researcher. Belarusian State University (1, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: valery48@tut.by.

Vlasukova Liudmila Aleksandrovna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. Belarusian State University (1, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vlasukova@mail.ru.

Osin Yury Nikolaevich – Director. Kazan E. K. Zavoisky Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (10/7, Sibirskii trakt, 420029, Kazan, Russian Federation). E-mail: yury.osin@gmail.com.

Rogov Alexey Mikhailovich – Postgraduate student. Kazan E. K. Zavoisky Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (10/7, Sibirskii trakt, 420029, Kazan, Russian Federation). E-mail: alexeyrogov11@gmail.com.

Vorob'ev Vyacheslav Valerievich – Postgraduate student. Kazan E. K. Zavoisky Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (10/7, Sibirskii trakt, 420029, Kazan, Russian Federation). E-mail: slavik.ksu@mail.ru

Stepanov Andrei Lvovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Leading researcher. Kazan E. K. Zavoisky Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (10/7, Sibirskii trakt, 420029, Kazan, Russian Federation). E-mail: aanstep@gmail.com.