

ковых фотоприемников разработаны в соответствии с ГОСТ-17772-88 «Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства».

Данный комплекс можно использовать в образовательных и научно-исследовательских целях. Новые технические решения, используемые при создании комплекса, позволят отечественным разработчикам и производителям фотоприемных устройств анализировать свойства новых полупроводниковых материалов, эффективно оценивать параметры разрабатываемых приборов, что является актуальным для обеспечения конкурентоспособности отечественной оптоэлектронной базы на рынках СНГ и мира.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Твердотельная фотоэлектроника. Современное состояние и прогноз развития (обзор к 50-летию факультета физической и квантовой электроники Московского физико-технического института) / Бурлаков И.Д. [и др.] // Успехи прикладной физики. - 2014. - Т. 2. - № 5. - С. 509–513.
2. Кремниевый фотоумножитель. Новые возможности / С. Клемин [и др.] // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. - 2007. - № 8. - С. 80–86.
3. Атгухов А.А. Автоматизированный стенд для измерения параметров фоточувствительных структур ультрафиолетового диапазона / А.А. Атгухов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. - 2010. - № 3. - С. 159–160.
4. Патрашин А.И. Исследование метода измерения квантовой эффективности и темного тока фоточувствительных элементов матричных ФПУ/ А.И. Патрашин [и др.] // Успехи прикладной физики. - 2013. - № 1. - С. 69–74.
5. Исследование характеристик фотодиода: методические указания к лабораторным работам / Московский государственный институт электроники и математики. Кафедра «физические основы электронной техники»: сост. Ю.А. Мома, В.Н. Тюшагин (рец. А.П. Лысенко, О.Д. Кнаб) – Москва: МГИЭИМ, 2003.
6. Балиев Д.Л. Автоматизированный стенд для измерения основных параметров МФПУ на основе InGaAs / Д.Л. Балиев [и др.] // Прикладная физика. - 2014. - № 6. - С. 93–98.
7. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик: ГОСТ 17772-88. – Взамен ГОСТ 17772-79: введ. в РБ 30.06.1989. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2013. – 65 с.

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ И СТЕКЛА ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ ТИТАНА И КОБАЛЬТА

О. М. Михалкович¹, С. М. Барайшук², О. Г. Бобрович³

¹⁾ *Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, ул. Советская, 18, 220050 Минск, Беларусь, e-mail: phyzbobber@tut.by*

²⁾ *Белорусский государственный аграрный технический университет, пр. Независимости, 99, 220023 Минск, Беларусь, e-mail: bear_s@yandex.ru*

³⁾ *Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220050 Минск, Беларусь, e-mail: olegbobrovich@yandex.ru*

Изучены морфология и гидрофильность поверхности металлических (Ti и Co) пленок на кремнии после облучения ионами Хе⁺ и на стекле осажденных в условиях ассистирования собственными ионами. Показано, что облучения кремния ионами Хе с энергиями в диапазоне 10–40 кэВ и флюенсе 10¹⁴ см⁻² не вызывает изменения мор-

фологии поверхности. С ростом времени осаждения пленок гидрофильность поверхности стекла снижается.

Ключевые слова: ассистированное собственными ионами осаждение; сканирующая зондовая микроскопия; шероховатость; гидрофильность.

MODIFICATION OF SURFACE LAYERS OF SILICON AND GLASS BY ION-BEAM SPUTTERING OF TITANIUM AND COBALT

O. M. Mikhalkovich¹, S. M. Baraishuk², O. G. Bobrovich³

¹⁾ *Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank, Sovetskaya str. 18, 220050 Minsk, Belarus, e-mail: phyzbober@tut.by*

²⁾ *Belarusian State Agrarian Technical University, Nezavisimosti av. 99, 220023 Minsk, Belarus e-mail: bear_s@yandex.ru*

³⁾ *Belarusian State Technological University, Sverdlova str. 13a, 220050 Minsk, Belarus, e-mail: olegbobrovich@yandex.ru*

Corresponding author: O. M. Mikhalkovich (phyzbober@tut.by)

The morphology and hydrophilicity of the surface of metallic (Ti and Co) films on silicon irradiated with xenon ions and on glass deposited with self-ion assisted were studied. It has been shown that irradiation of silicon with Xe ions with energies in the range of 10–40 keV and a fluence of 10^{14} cm⁻² does not cause a change in the surface morphology. As the time of film deposition increases, the hydrophilicity of the glass surface decreases.

Key words: self-ion assisted deposition; scanning probe microscopy; roughness; hydrophilicity.

ВВЕДЕНИЕ

Способ осаждения покрытий ассистированного собственными ионами (ОПАСИ) [1] относится к перспективным. При использовании переходных металлов методом ОПАСИ на кремнии формируются силициды этих металлов, имеющих широкое применение, что позволяет его использовать для получения таких соединений без термически нагруженных процессов. Пленки переходных металлов осаждают на стекло в связи с необходимостью получения защитных и проводящих покрытий при их оптической прозрачности для высокоэффективных солнечных и сенсорных элементов [2]. Тонкие пленки титана и кобальта, наносимые на монокристаллический кремний в качестве модельных систем, удобно использовать для изучения дефектообразования и диффузионных процессов, сопутствующих осаждению пленок на подложку в условиях радиационного и температурного воздействия на разных этапах изготовления солнечных элементов. Определение смачиваемости поверхности функциональных слоев солнечных элементов используется для экспресс оценки качества тонкопленочных структур [3]. Поэтому представляется необходимым установление влияния предварительной обработки поверхности и условий осаждения на гидрофильность сформированных структур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Осаждения титановых и кобальтовых пленок на кремний и стекло в условиях ассистирования ускоренными ионами Ti⁺, Co⁺ проводили при ускоряющем напряжении $U = 7$ кВ и потоках ионов $(2,5-9,9) \cdot 10^{16}$ Ti⁺/см², $(2,7-10,8) \cdot 10^{16}$ Co⁺/см². Отношение

ионизированной фракции к нейтральной в составило 0,02 при осаждении Ti и 0,06 при осаждении Co. В рабочей камере поддерживался вакуум $\sim 10^{-2}$ Па. Часть пластин кремния была предварительно обработана ионной имплантацией ионов ксенона с энергией 10, 20, или 40 кэВ интегральным потоком от 1×10^{14} см⁻² в качестве маркера для определения положения исходной поверхности подложки [4]. Для изучения морфологии систем пленка/подложка и определения ее параметров использовали метод сканирующей зондовой микроскопии с применением атомно-силового микроскопа NT-206. Площадки для сканирования были выбраны размером 5x5 мкм². Гидрофильность исходных и модифицированных образцов стекла и кремния устанавливали по равновесному краевому углу Θ смачивания (РКУС). Объем капли воды $V = (47,6 \pm 0,3) 10^{-3}$ мл. Погрешность в измерении РКУС составляла не более 2%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены 3D и 2D изображения морфологии поверхности и профиль сечения вдоль линии *a-b* Ti пленки, нанесенной на кремний методом ОПАСИ без облучения.

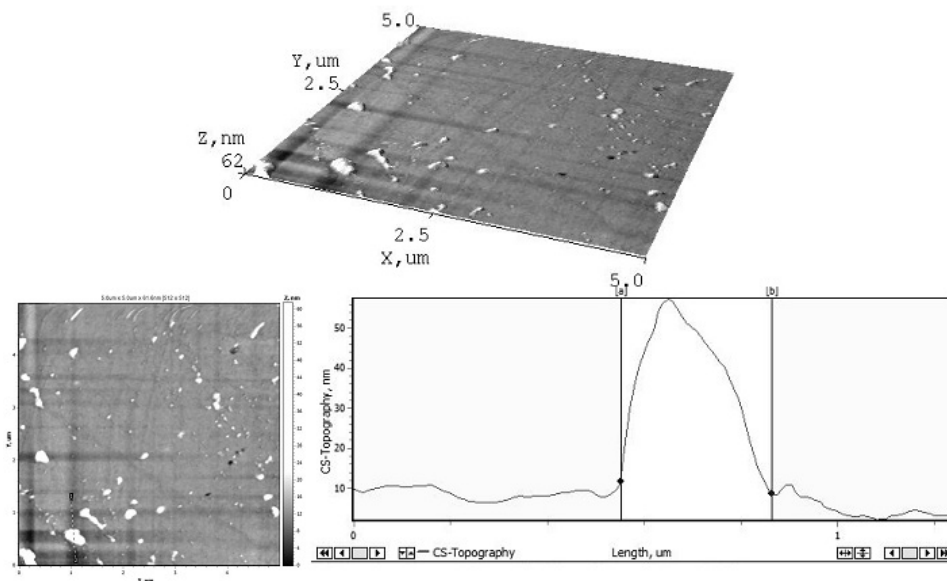


Рисунок 1. 3D и 2D изображения морфологии поверхности и профиль сечения вдоль линии *a-b* Ti пленки, нанесенной на кремний методом ОПАСИ

На рис. 1 видно присутствие капельной фракции на поверхности структур титановая пленка/кремний, которая создаёт существенные неоднородности и приводит к увеличению шероховатости поверхности. По изображению профиля сечения видно, что “диаметр” наибольших капель составляет порядка 200–250 нм при высоте профиля этих вкраплений 50 нм. Высота этих фракций в 10–15 раз превышает среднее отклонение остального рельефа поверхности.

Таким образом, капельная фракция увеличивает шероховатость на ~ 150 –400%. Значения средней арифметической шероховатости (R_a) определялись результатом

усреднения данных по 10 площадкам выбранных случайным образом. Значение R_a для Ti пленок осажденных на Si составляет 1,1 нм.

На рис. 2 представлены 3D и 2D изображения морфологии поверхности и профиль сечения вдоль линии $a-b$ Ti пленки, нанесенной на кремний методом ОПАСИ с предварительным облучением ионами ксенона с $E = 10$ кэВ и дозой 1×10^{14} Xe/см².

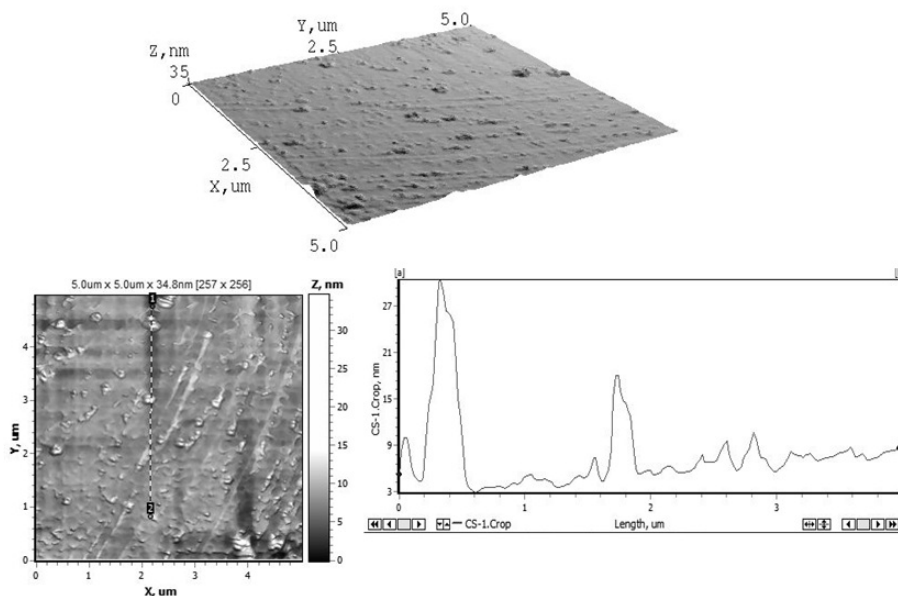


Рисунок 2. 3D и 2D изображения морфологии поверхности и профиль сечения вдоль линии $a-b$ Ti пленки, нанесенной на кремний методом ОПАСИ с предварительным экспонированием ионами ксенона с $E_{Xe} = 10$ кэВ и дозой 1×10^{14} Xe/см²

На рис. 2 также видно присутствие капельной фракции на поверхности титановой пленки, нанесенной на кремний, предварительно облученный ионами ксенона, которая также создаёт существенные неоднородности на поверхности структуры и приводит к увеличению шероховатости поверхности. Предварительное экспонирование подложки ионами ксенона не вызывает существенного изменения как профиля основного рельефа поверхности покрытия, так и параметров капельной фракции, распределение которой по поверхности покрытий носит случайный характер. Значение R_a для титановых пленок, осажденных на кремний предварительно экспонированный ионами ксенона с $E = 10$ кэВ и дозой 1×10^{14} Xe/см² методом ОПАСИ также составляет 1,1 нм. Аналогичная особенность предварительного облучения подложки ионами ксенона, заключающаяся в том, что предварительное облучение кремния ионами ксенона с $E = 10$ кэВ и дозой 1×10^{14} Xe/см² не вызывает существенного изменения морфологии поверхности, также была прослежена и для кобальтовых пленок.

Теоретическая оценка коэффициента распыления Si ионами Xe⁺ по эмпирическим формулам предложенным в [5] в используемом диапазоне энергий дает значение коэффициента распыления в интервале 2.4 - 2.8 атом/ион. Однако, использование атомно-силового микроскопа NT-206, не позволяет уверенно определить отсутствие влияния введения ионов ксенона с флюенсом в интервале от 1×10^{14} см⁻² до

$2.7 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в качестве маркера в кремний на чувствительное изменение морфологии поверхности как исходной подложки, так и осажденных на нее Ti и Co пленок.

Исходная поверхность стекла была гидрофильной ($\Theta = 18,9^\circ$). Увеличение времени модифицирования приводит к росту значений РКУС как при нанесении титана, так и при нанесении кобальта, что демонстрирует таблица.

Равновесный краевой угол смачивания модифицированных образцов стекла дистиллированной водой

Ион	Время модифицирования, мин	U, кВ	Поток ионов Φ , 10^{16} ион/см ²	РКУС
Ti ⁺	30	7	2,5	48,7
	60	7	5,0	57,9
	90	7	7,4	81,4
	120	7	9,9	94,5
Co ⁺	30	7	2,7	61,6
	60	7	5,4	76,4
	90	7	8,1	91,7
	120	7	10,8	98,2

По мере увеличения времени осаждения поверхность стекла становилась гидрофобной и значение РКУС увеличилось до $\Theta = 94,5^\circ$ при достижении значения потока ассистирующих ионов титана $9,9 \times 10^{16} \text{ Ti}^+/\text{см}^2$. При осаждении кобальта поверхность стекла становится гидрофобной уже при достижении значения потока ассистирующих ионов $8,1-10^{16} \text{ Co}/\text{см}^2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что на смачиваемость поверхности влияют условия осаждения покрытия, морфология поверхности (шероховатость поверхности), а также химический состав модифицированной поверхности. Полученные результаты демонстрируют возможность управления шероховатостью и смачиваемостью поверхности структур пленка/подложка путем осаждения пленки на стекло методом ОПАСИ разными интегральными потоками ионов, формируя тонкие функциональные слои, использование которых перспективно в качестве объектов оптоэлектронной промышленности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь № ГР 20211394.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Способ нанесения покрытий : пат. ВУ 2324 / И.С. Ташлыков, И.М. Белый. – Опубл. 30.09.1998. – 3 с.
2. Baraisuk, S.M. Influence of the Substrate Type on the Surface Morphology of Cu₂ZnSnSe₄ Thin Films/ S.M. Baraisuk [et al] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Tech. – 2018. – Vol. 12, № 6. – P. 1077–1081.
3. Tashlykov, I. Analysis of composition, morphology and wettability of Mo thin layers deposited on glass / I. Tashlykov, P. Zhukowski, O. Mikhalkovich // Przegląd Elektrotechniczny. – 2016. – № 11. – P. 229–231.
4. Ташлыков, И.С. Композиционный состав и повреждение поверхности кремния при ионно-ассистированном нанесении тонких пленок / И.С. Ташлыков, О.Г. Бобрович, С.М. Барайшук, О.М. Михалкович, И.П. Антонович // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2009. – № 5. – С. 92–95.
5. Matsunami, N. Energy dependence of the yields of ion-induced sputtering of monoatomic solids / N. Matsunami [et al.]. – Nagoya: Institute of Plasma Physics, 1983. – 284 p. – (Preprint / Nagoya University ; IPPJ-AM-32).