

ВУЗОВСКАЯ НАУКА, ПРОМЫШЛЕННОСТЬ,  
МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО



# МАТЕРИАЛЫ И СТРУКТУРЫ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Сборник научных трудов  
II Международной научной конференции

Минск, 5–6 октября 2006 г.

---

# СВОЙСТВА, ДИАГНОСТИКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ

---

## ДИАГНОСТИКА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ИОННО-АССИСТИРОВАННЫМ НАНЕСЕНИЕМ ТОНКИХ ПЛЕНОК

И. С. Ташлыков, С. М. Барайшук, О. М. Михалкович

*УО «Белорусский государственный педагогический университет  
имени Максима Танка», tashl@bspu.unibel.by*

### ВВЕДЕНИЕ

Ионно-ассистированное нанесение покрытий (ИАНП) на кремний и на поверхности изделий из других материалов применяется для модифицирования разнообразных свойств поверхности изделий [1–3]. При этом известно, что свойства модифицированной поверхности во многом определяется рядом факторов, среди которых такие как: элементный и фазовый состав покрытий, их структура, адгезия к подложке, топография и др. [4–6]. Поэтому при проведении исследований по нанесению покрытий необходима диагностика поверхности конструкции покрытие/подложка. В настоящей работе обсуждаются результаты изучения композиционного состава, повреждения структуры, топографии поверхности кремния, модифицированного ионно-ассистированным нанесением покрытий в условиях сомооблучения (ИАНПУС).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Для осаждения С, Ti, Mo покрытий на кремний при ионном ассистировании в условиях самооблучения использовали резонансный источник вакуумной дуговой плазмы (вакуум  $10^{-2}$  Па), схема которого представлена в [2]. Такой метод нанесения покрытий позволяет совместить процесс физического напыления нейтральной фракции с облучением формирующегося покрытия ионами ионизированной фракции того же материала при подаче на мишень отрицательного потенциала, который в работе составлял 3 или 7 кВ.

В качестве подложки использовали пластины (100) и (111) Si. Отношение плотности потоков ионизированной и нейтральной фракции осаждаемого на подложку материала при нанесении покрытий составляло 0,2–0,4, скорость осаждения покрытий была 0,3–0,4 нм/мин. Элементный послойный анализ конструкций пленка/кремний выполняли используя резерфордское обратное рассеяние (РОР) ионов гелия  $He^+$  с  $E_0 = 1,4$  или 2,0 МэВ и компьютерное моделирование экспериментальных спектров РОР по программе RUMP [7]. Для изучения пространственного распределения радиационных дефектов в конструкциях покрытие/подложка применяли метод РОР в сочетании с каналированием ионов  $He^+$  и методику [8]. При процессе ИАНП в результате перемешивания атомов подложки и осаждаемого покрытия в

каскадах атомных столкновений, создаваемых ассистирующими ионами при торможении в области межфазной границы, понятие границы раздела фаз покрытие-подложка – условное. Поэтому для построения глубинных профилей компонентов изучаемых конструкций мы используем понятие положения поверхности исходной подложки (ПИПП), которое определяли в экспериментах по введению ионной имплантацией в Si пластину Хе маркера с энергией 40 кэВ интегральным потоком от  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  до  $2,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Снимки топографии поверхности и данные о шероховатости были получены с применением методов атомно-силовой микроскопии на микроскопе NT-206.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные спектры РОР ионов  $\text{He}^+$  от образцов исходного Si и с Mo покрытием, полученным методом ИАНПУС, представлены на рис. 1.

Энергетический спектр РОР ионов  $\text{He}^+$  от образца Si имеет характерный вид ступеньки в области 248 канала по шкале многоканального анализатора. Как видно, поверхность Si чистая, на ней отсутствуют примеси С и О или их количества ниже предела чувствительности метода по этим элементам.

На спектре РОР ионов  $\text{He}^+$  от структуры покрытие/подложка (рис. 1), имеется пик в области 370–400 каналов, свидетельствующий о том, что на поверхности образца присутствует тонкая пленка Mo.

Сдвиг сигнала от кремния в область меньших каналов на энергетических спектрах, приведенных на рис. 1, подтверждает факт образования на образце покрытия. Характер энергетических спектров ионов  $\text{He}^+$  от модифицированных образцов Si (увеличение сигнала выхода на спектрах РОР в области 70 и 140 каналов) свидетельствует о присутствии в осажденных на кремний покрытиях атомов С и О.

Появление С и О в покрытиях обусловлено, как уже отмечалось, наличием в вакууме мишенной камеры достаточного количества остаточных газов, содержащих С и О, которые, очевидно, осаждаются в процессе формирования структуры тонкая пленка Si на ее поверхность, взаимодействуя с атомами металла покрытия. На спектре проявляются тонкие детали в части сигналов низкой интенсивности, в области 240–248 каналов формируется ступенька. Ее появление отражает тот факт, что в состав покрытия, осаждаемого на поверхность кремниевого образца, входят атомы Si.

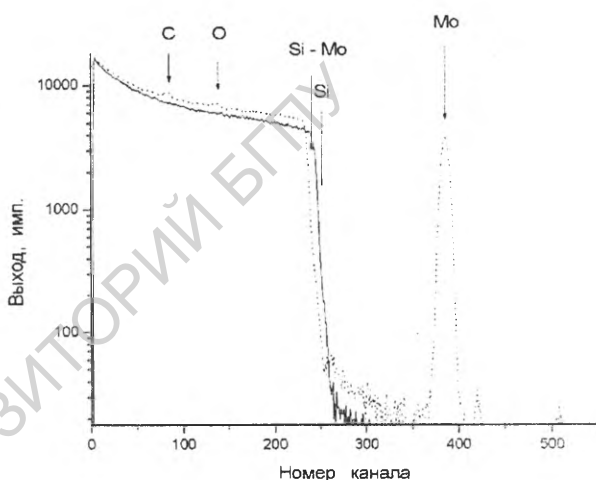


Рис. 1. Энергетический спектр РОР ионов гелия с  $E_0 = 1,4 \text{ МэВ}$  от (111) Si (сплошная линия), и с покрытием на основе молибдена (пунктирная линия). Ускоряющий потенциал 3 кВ

очевидно, продиффундировавшие на поверхность в результате ионной бомбардировки в процессе роста тонкой пленки.

На рисунке 2 показаны профили глубинного распределения компонентов конструкции, получаемой при нанесении титановой пленки на Si. Профиль Ti характеризуется концентрацией, снижающейся от 4,2 ат. % на поверхности до 1 ат. % в области межфазной границы системы. Более того, атомы Ti идентифицируются в Si на глубине 130 нм с концентрацией  $\sim 0,03$  ат. %, что свидетельствует об их радиационно-стимулированной диффузии вглубь в процессе нарастания покрытия под радиационным воздействием ассистирующих ионов. Профиль атомов водорода в покрытии качественно согласуется с пространственным распределением титана, однако их концентрация на порядок выше и равна нулю в кремнии.

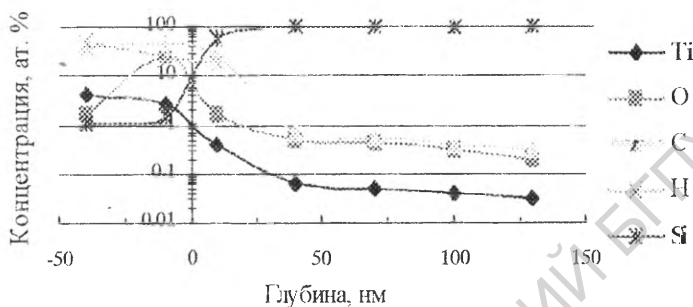


Рис. 2. Профили компонентов в системе Ti/Si, полученной методом ИАНПУС. Ускоряющий потенциал 3 кВ

Кислород распределен в покрытии неравномерно: его концентрация возрастает с 1,7 ат. % на поверхности покрытия до 25 ат. % вблизи ПИПП, а в кремнии, хотя его концентрация снижается в несколько раз, но остается выше, чем концентрация Ti примерно на порядок. Профиль C качественно согласуется с пространственным распределением кислорода в изучаемой системе, однако их концентрация в 20 раз выше на поверхности и в 2 раза в покрытии. В кремнии же концентрация C сопоставима с концентрацией O. Появление в изучаемых покрытиях O, C, и H мы связываем, как отмечалось выше, с осаждением на поверхность покрытия в процессе его роста совместно с атомами Ti, углеводородной фракции и O из остаточного вакуума в мишенной камере, откачиваемой диффузионным масляным насосом.

Отметим, что используя ROP невозможно напрямую определить присутствие водорода в покрытии. Вместе с тем данные о наличии значительного содержания водорода в системах и его распределении по покрытию, полученные при моделировании спектров ROP программой RUMP, были подтверждены в прямых независимых экспериментах с использованием резонансной ядерной реакции  ${}^1\text{H}({}^{15}\text{N}, \alpha){}^{12}\text{C}$  [9].

К особому свойству осаждения покрытий методом ИАНПУС можно отнести обнаруженную ранее встречную диффузию атомов кремния через покрытие циркония на поверхность формируемой системы [10], которая впервые наблюдается нами также при потенциале на мишени 3 кВ. При этом отметим, что концентрация Si не спадает по экспоненциальному закону, как можно было бы ожидать, если движущей силой процесса захвата атомов кремния в покрытие было бы атомное перемешивание в каскадах атомных столкновений, а остается практически постоянной по толщине покрытия, достигая 1–2 ат. %. Возможно, такое поведение атомов подложки

связано с особенностями структуры покрытия, в составе которого имеются низкоразмерные включения металла, так как известно [11], что поликристаллические материалы, в которых доля межзеренной границы велика, отличаются диффузной подвижностью атомов на несколько порядков по величине выше, чем в монокристаллических материалах.

Распределения по глубине радиационных дефектов в кремнии (междоузельные атомы Si) с введенным Хе маркером (1), с титановым покрытием на исходном Si (2) и на Si с Хе маркером (3) представлены на рис. 3.

Характер повреждения структуры кремния при его модифицировании, отсутствие «полочки» на профиле дефектов, генерируемых ионами  $Ti^+$ , кривая 2 на рис. 3 свидетельствует о том, что смещенные в междоузлия атомы Si диффундируют на поверхность и далее входят в состав покрытия.

Этот эффект еще отчетливее проявляется в изменении профиля дефектов в образце с введенным Хе маркером. А именно междоузельные атомы Si диффундируют при нанесении титанового покрытия в глубь кристалла и в само покрытие, способствуя при этом диффузии атомов титана, углерода и кислорода вглубь (рис. 2), что также предсказывается результатами [12].

На рисунке 4 представлены изображения топографии поверхности исходных и модифицированных материалов.

### Характеристика топографии поверхности исходного и модифицированного материала

Параметр	Кремний исходный	Материал покрытия	
		C	Ti
Средняя шероховатость, нм	0,169	0,314	1,101
Средняя ровность, нм	0,393	0,682	1,207
Проективная площадь, мкм <sup>2</sup>	24,946	24,813	25,030
Полная/проективная	1,012	1,001	1,004

Как следует из приведенных в таблице данных, средняя шероховатость весьма незначительна и изменяется от  $\sim 0,2$  нм у исходного кремния до  $\sim 1,1$  нм на поверхности кремния с покрытием на основе титана. Средняя ровность наоборот очень высока, то есть неровность составляет лишь  $\sim 0,4$  нм у поверхности исходного кремния, достигая  $\sim 1,2$  нм у поверхности модифицированного кремния. Полная площадь фрагмента практически не отличается от проецируемой площади.

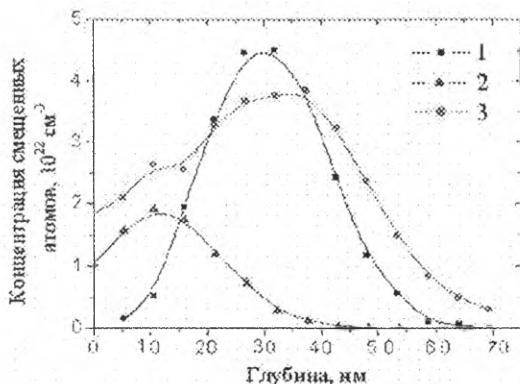


Рис. 3. Распределение дефектов по глубине в Si после: 1 – имплантации ионов Хе<sup>+</sup> с E = 40 кэВ дозой D =  $9 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>; 2 – только модифицирования нанесением Ti (потенциал 7 кВ); 3 – имплантации ионов Хе<sup>+</sup> и модифицирования нанесением Ti (потенциал 7 кВ)

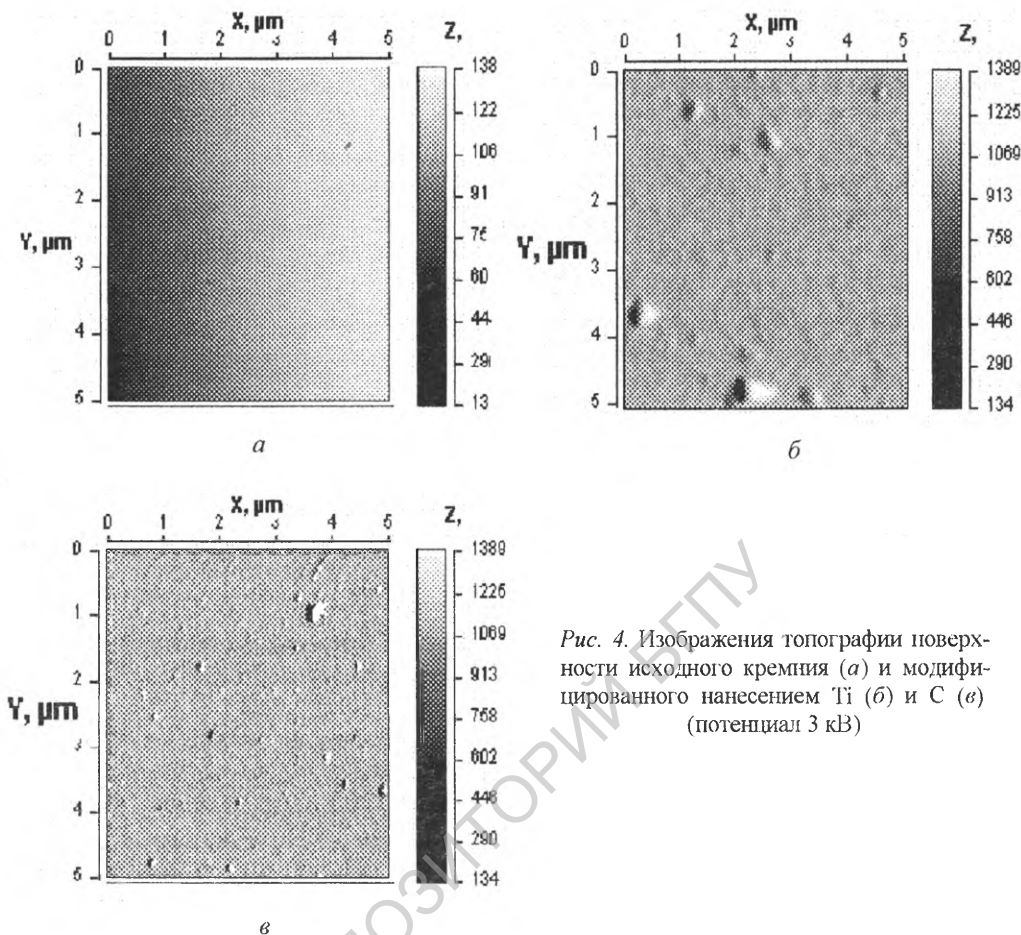


Рис. 4. Изображения топографии поверхности исходного кремния (а) и модифицированного нанесением Ti (б) и C (в) (потенциал 3 кВ)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе при диагностике поверхности исходного и модифицированного кремния выполнен элементный послойный анализ поверхности конструкций покрытие-подложка, сформированных ионно-ассистированным нанесением тонких пленок. Установлено, что в состав покрытий входят атомы водорода, углерода, кислорода, захватываемые в осаждаемое покрытие из остаточного вакуума мишенной камеры, создаваемого паромасленным диффузионным насосом, а также атомы кремния из подложки. Движущей силой появления атомов подложки в покрытиях служат встречные диффузионные потоки радиационных дефектов (междоузельных атомов Si), генерируемых ассистирующими нанесение покрытий ионами. Качество поверхности исходного и модифицированного кремния высокое.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gotoh Y., Kagamimori K. et al. // Surf. Coat. Technol. 2002. V. 158–159. P. 729–731.
2. Tashlykov I. S., Kasperovich A. V., Wolf G. // Surf. Coat. Techn. 2002. V. 158–159. P. 498–502.
3. Тульев В. В., Поплавский В. В., Ташлыков И. С. // Материалы IV Междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом – 2001». Минск, 3–5 окт. 2001. Т. 1. С. 312–314.

4. Colligon J. // J. Vac. Sci. Technol. 1995. V. 13. P. 1649–1657.
5. Ensinger W. // Surf. Coat. Technol. 1998. V. 100–101. P. 336–347.
6. Ostrovskaya L., Perevertailo V. et al. // Diamond Relat. Mater. 2002. V. 11. P. 845–849.
7. Doolittle L. R. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1986, V. B15. P. 227–238.
8. Bøgh E. // Canad. J. of Phys. 1968. V. 46. P. 653–659.
9. Бобрович О. Г., Ташлыков Й. С. и др. // ФХОМ. 2006. № 1. С. 54–58.
10. Бобрович О. Г., Ташлыков И. С. // ФХОМ. 2002. № 5. С. 40–43.
11. Золотухин И. В., Калишин Ю. Е. и др. Новые направления физического материаловедения. Учеб. пособие. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та., 2000. 360 с.
12. Ташлыков И. С., Андреев М. А. // ФХОМ. 2006. № 3. С. 29–32.

## ХИМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{La}_{1-x}\text{Bi}_x\text{FeO}_3$

**А. Ф. Ревинский<sup>1,2</sup>, И. И. Макоед<sup>2</sup>, К. Кокошкевич<sup>1</sup>,  
К. И. Янушкевич<sup>3</sup>, А. И. Галяс<sup>3</sup>, В. В. Тригук<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Технический университет Белостока, Bialystok, Poland*

<sup>2</sup>*УО «Брестский государственный университет  
имени А. С. Пушкина», rev@physics.brsu.brest.by*

<sup>3</sup>*ГНУ «Объединенный институт физики твердого тела  
и полупроводников НАН Беларуси»*

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы широкое применение в области спиновой электроники находят сегнетомагнетики – материалы, обладающие одновременно магнитным и электрическим упорядочением. Наиболее изученным соединением является феррит висмута  $\text{BiFeO}_3$ , для которого получены убедительные экспериментальные доказательства наличия сегнетоэлектрических и магнитных свойств [1, 2]. Дополнительный интерес к исследованию свойств данного соединения вызван недавним открытием гигантского магнитоэлектрического эффекта в тонких пленках  $\text{BiFeO}_3$ , а также наличием в феррите висмута ряда фазовых превращений, индуцированных магнитным полем [3]. Важным в плане практического применения  $\text{BiFeO}_3$  является открытие для данного соединения магнитоэлектрического эффекта [4]. Это означает, что в данной молекуле можно наблюдать намагниченность в электрическом поле и электрическую поляризацию в магнитном поле. Благодаря такой взаимосвязи, представляется возможность считывать информацию в виде намагниченности отдельного домена непосредственно, т. е. не преобразуя магнитный сигнал в электрический. Это обстоятельство открывает широкие возможности использования сегнетомагнетиков в спиновой электронике.

Несмотря на большое число работ, посвященных исследованию электрофизических свойств образцов системы  $\text{La}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$ , вопрос об их электронном строении, типах проводимости, условиях взаимодействия сегнетоэлектрической и магнитной подсистем пока остается открытым. Ранее нами исследовались объемные поликристаллические образцы данной системы [5]. Целью настоящей работы является получение и исследование электронного строения и физических свойств тонких пленок сегнетомагнетиков системы  $\text{La}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$ .