

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА
ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ВИСМУТА, ИНДИЯ, СУРЬМЫ И ТЕЛЛУРА

Горох Г.Г.¹, Федосенко В.С.¹, Эм М.¹, Таратын И.А.²

¹Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, Минск

²Белорусский национальный технический университет, Минск

Сформированы наноструктурированные системы на основе соединений висмута, индия, сурьмы и теллура, представляющие собой массивы электроосажденных нанопроводов бинарных полупроводников и наноструктурированные композитные пленки, полученные ионным наслаиванием на матрицы анодного оксида алюминия. Проведены комплексные исследования морфологии и состава полученных композитных пленок методами сканирующей электронной микроскопии и электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа.

Одним из актуальных направлений современных технологий микро- и нанoeлектроники является синтез композитных материалов определенного состава, обладающих определенными характеристиками. Одним из наиболее перспективных направлений в данной области является формирование мультикомпонентных систем химическими и электрохимическими методами в порах анодного оксида алюминия (АОА), которые сами по себе энергетически и экономически малозатратные, но и наиболее удобны для создания подобных наносистем. Научная идея состоит в создании на поверхности подложки тонкого функционального слоя с регулярно размещенными в нем наночастицами полупроводниковых соединений висмута, индия, сурьмы и теллура в качестве наноструктурированных матриц для оптоэлектронных и нанoeлектронных устройств [1].

Предлагается два технологических подхода. Первый подход заключается в использовании диэлектрической регулярной нанопористой матрицы анодного оксида алюминия (АОА) для заполнения пор в ней полупроводниками из электролитов, что позволит создать нанопровода из отдельных полупроводников и их бинарных соединений [2]. Второй подход состоит в использовании матрицы АОА для нанесения на нее соединений этих полупроводников методом ионного осаждения (ИН) [3]. В основе метода лежит циклическая обработка подложек в ион-содержащих растворах солей металлов, в результате которой на поверхности подложки происходит осаждение и взаимодействие катионов и анионов с образованием труднорастворимого соединения [4]. Модифицируя поверхность АОА и создавая матрицы разной толщины с различными размерами пор, можно

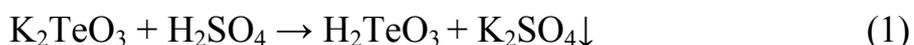
управляемо создавать наносистемы с заданными структурными параметрами [5]. В данной работе представлены результаты композитных пленок на основе полупроводников Bi, Sb, In и Te в матрицы АОА электрохимического осаждения и ионного наслаивания, и исследования морфологии и элементного состава сформированных структур.

Электрохимическое осаждение нанопроводов проводили в сформированных пористых матрицах из анодного оксида алюминия толщиной 35 мкм, с порами диаметром 40 нм с медным проводящим подслоем. Исследования процессов формирования нанопроводов проводили для пар соединений InSb-Bi и Sb-Te. Электрохимические условия осаждения антимоноида индия, теллура и висмута представлены в таблице.

Таблица – Электрохимические режимы осаждения нанопроводов

Материал	Состав электролита	Плотность тока осаждения, мА/см ²	Время осаждения, минут
InSb	0,16 М SbCl ₃ 0,12 М InCl ₃ , pH = 1.45	14,8	50
Bi	0,1 М Bi(NO ₃) ₃ , pH = 1	7,3	12
Te	0,02 М H ₂ TeO ₃	17,9	34

Электролит для осаждения теллура был получен путем смешивания прекурсоров калия теллуриата, раствор 2 %, и серной кислоты, с последующим фильтрованием осадка сульфата калия (1).



Результаты исследований нанопроводов InSb-Bi и Sb-Te представлены на рисунке 1. На СЭМ изображениях видна высокая степень заполняемости нанопор (рис. 1,а). Наличие плавного перекрытия концентраций Bi и InSb в области гетероперехода (рис. 1, б) обусловлено особенностью энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа и диаметром сканирующего луча, равным 3 мкм, который захватывает отклик как от Bi, так и от InSb на границе данных материалов в порах.

Анализ спектров электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа и маппинг распределения элементов по образцу Sb-Te показал, что несмотря на последовательное электрохимическое осаждение сурьмы и теллура, теллур обнаружился по всей длине нанопроводов (рис. 2, г, д). Наблюдается увеличение относительной концентрации теллура на верхней границе нанопроводов, незначительное снижение концентрации теллура по мере их углубления и постепенное выравнивание до определенного значения по всей протяженности нанопровода. Это явление можно объяснить подтравом стенок пористого оксида в щелочной среде электролита для осаждения теллура, дальнейшей миграцией ионов теллура под действием электрического поля в образовавшихся пустотах между стенками пор

и нанопроводами сурьмы вплоть до основания пор и заполнением этих пустот теллуrom.

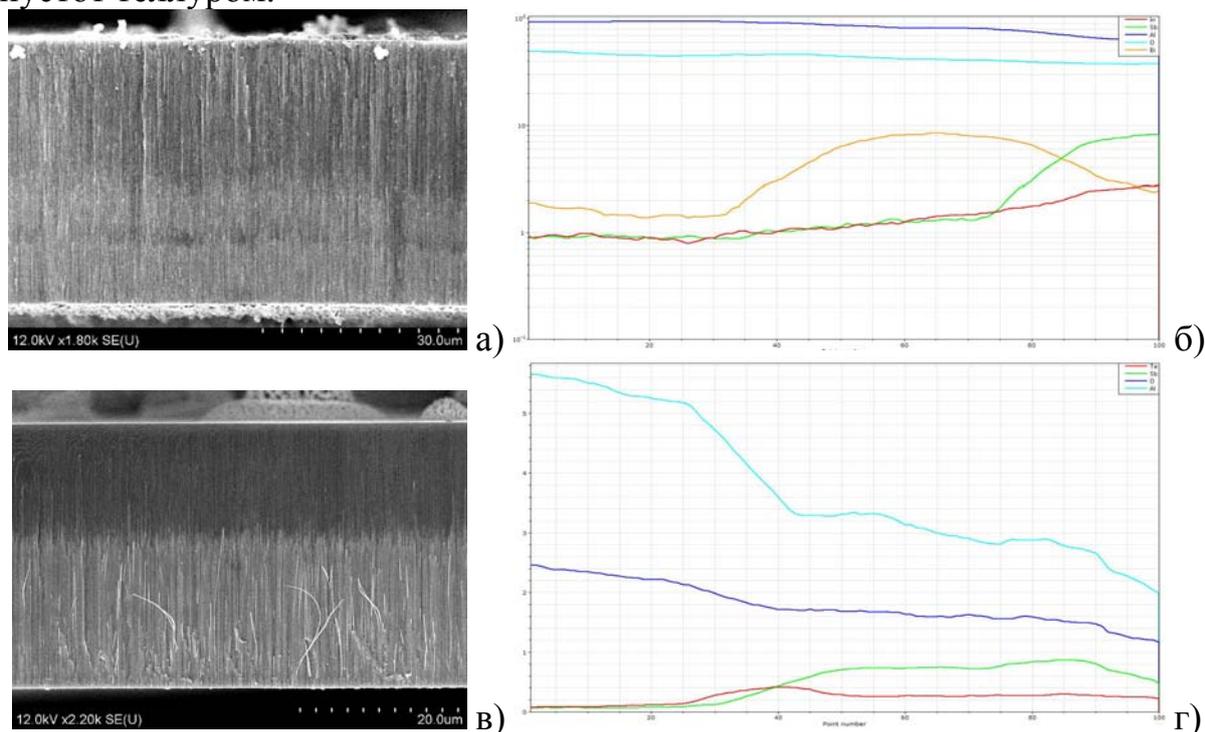


Рис. 1 СЭМ изображение и результаты энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа пористого темплейта со сформированными структурами InSb-Bi (а,б) и Sb-Te (в,г)

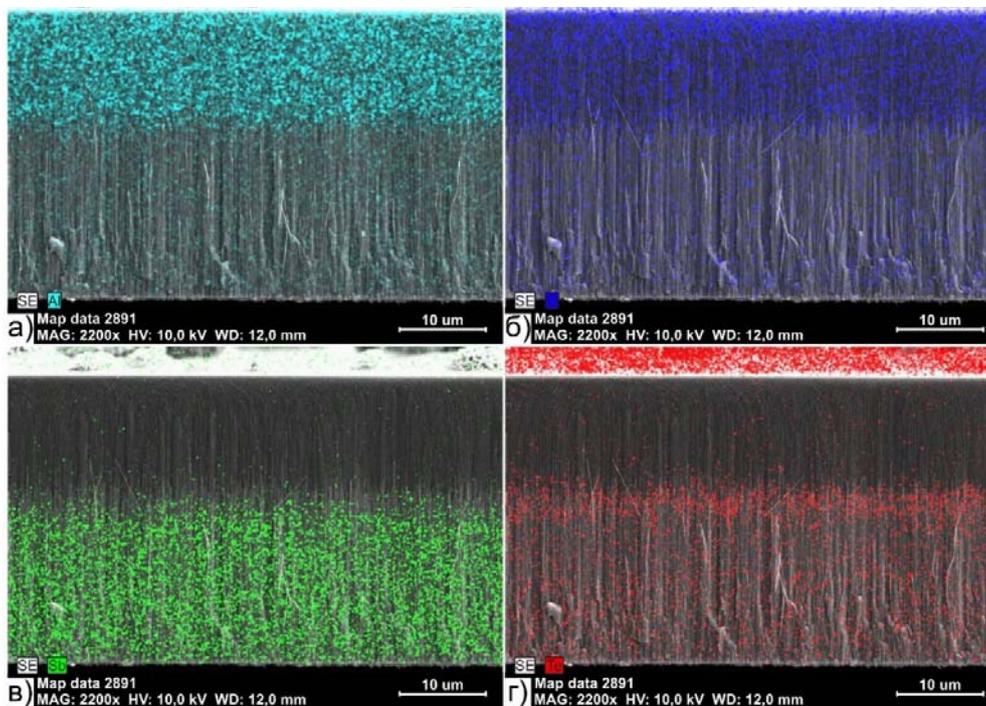


Рис. 2 Рентгеноспектральный микроанализ пористого анодного оксида алюминия с нанопроводниками сурьмы и теллура. Маппинг (а) алюминия, (б) кислорода, (в) сурьмы, (г) теллура
На рисунке 3 представлены электронно-микроскопические исследо-

вания последовательно осажденных соединений Bi–Te; Bi–Sn и Sn–Te, сформированные методом ионного последовательного осаждения из катионных растворов 0,05 М SnSO₄; 0,1 М Bi(NO₃)₃, 0,02 М H₂TeO₃, в качестве и анионного раствора служила подогретая вода.

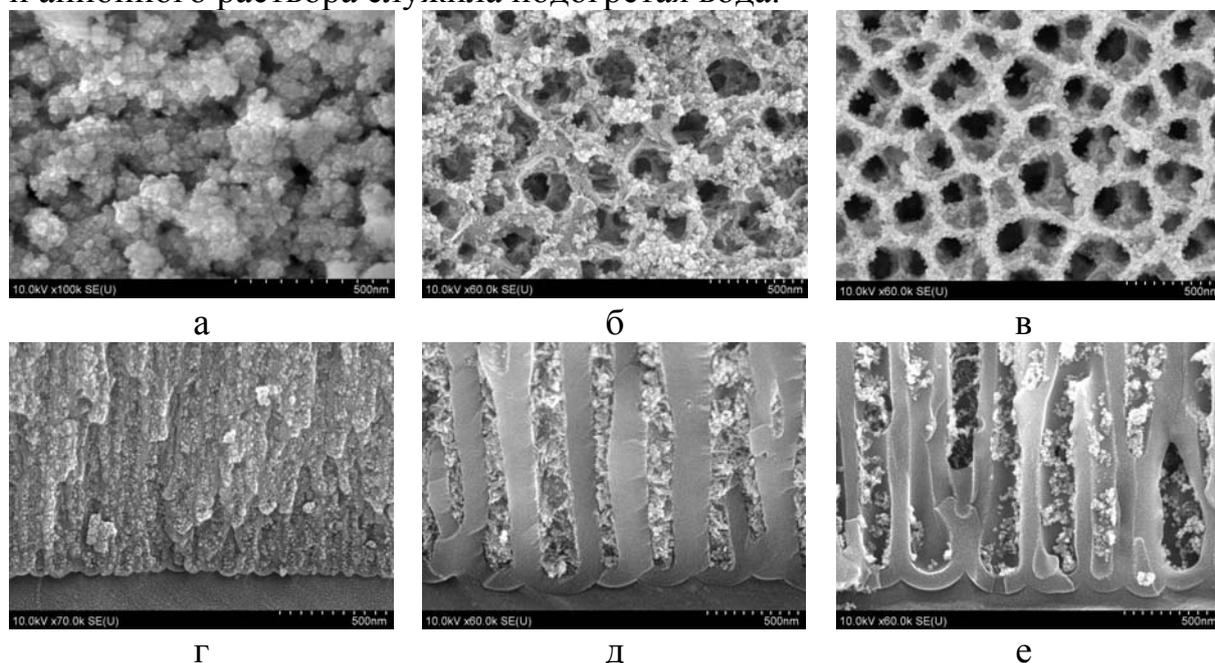
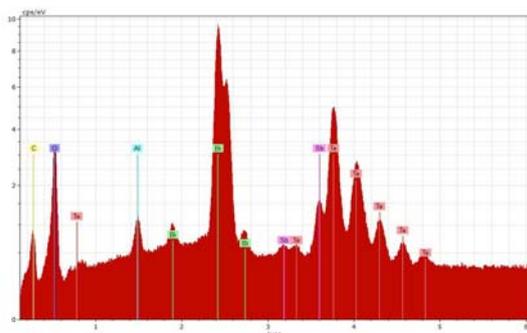


Рис. 3 СЭМ изображения поверхностей (а,б,в) и сколов (г,д,е) соединений Bi–Sn–Te (а,г); Sn–Te (б,д) и Bi–Te (в,е) в порах АОА

На рисунках 3а и 3г представлены электронно-микроскопические изображения поверхности и скола композитного соединения Bi–Sn–Te в матрице АОА. Поверхность композита представляет собой сплошную пленку, равномерно закрывающую поры снаружи. Внутри пор полученный осадок также равномерно заполнил весь объем пор без пустот. На рисунке 3б и 3д представлены поверхность и скол двухкомпонентного соединения Sn–Te в матрице АОА. Осадок представляет собой более рыхлую консистенцию, входы в поры остаются открытыми. На рисунке 3в и 3е представлены изображения поверхности и скола соединения Bi–Te. В данном случае поры остались практически пустыми, мелкие частицы осели лишь на стенках пор и на поверхности оксида, не закрывая входы в поры.

На рисунке 4 приведены результаты электронно-зондового рентгеновского спектрального микроанализа сформированных композиционных систем – EDX спектры и таблицы данных. В EDX-спектре металлоксидных систем Bi–Sn–Te (рис. 4а) присутствуют все элементы исследуемой системы с преобладанием Bi и Te. Атомарное соотношение Bi, Te, Sn, Al и O с учетом всех элементов, входящих в состав пленок, составило 17,49% Bi: 25,37% Te: 39,71% O: 5,96%Sn и 4,48%Al. (рис. 4б). Соотношение элементов металлоксидных систем Bi_xTe_yO_z в порах АОА приведено на рисунках 4в и 4г, соответственно. В данной системе преобладает Bi, его количество в три раза превосходит количество Te, однако, в объеме матрицы АОА их

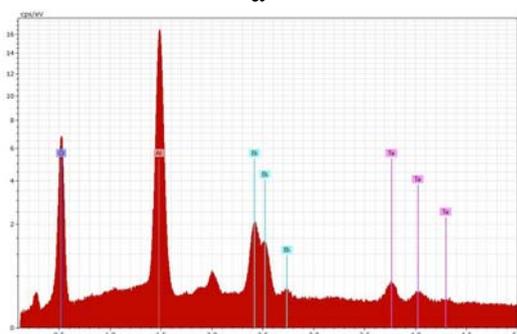
количество не велико. Атомарное соотношение Bi, Te и O с учетом всех элементов, входящих в состав пленок, составило 3,13% Bi: 1,08% Te: 57,30% O: и 38,49%Al. (рис. 4г).



а

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [wt.%]
O	8	K-series	7,05	7,51	39,71	0,9
Te	52	L-series	35,94	38,28	25,37	1,1
Bi	83	L-series	40,58	43,21	17,49	1,3
C	6	K-series	0,93	0,99	6,98	0,2
Sb	51	L-series	8,06	8,58	5,96	0,3
Al	13	K-series	1,34	1,43	4,48	0,1
Total:			93,90	100,00	100,00	

б



в

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [wt.%]
O	8	K-series	28,22	33,38	57,30	3,3
Al	13	K-series	31,96	37,81	38,49	1,5
Bi	83	M-series	20,13	23,82	3,13	0,7
Te	52	L-series	4,22	5,00	1,08	0,2
Total:			84,54	100,00	100,00	

г

Рис. 4 EDX спектры и таблицы данных композиционных металлоксидных систем Bi–Sn–Te (а,б); и металлоксидных систем $Bi_xTe_yO_z$ (в,г) в порах АОА

Проведенный комплекс исследований позволил разработать научные основы технологии изготовления перспективных полупроводниковых матрично-пленочных структур для сенсорных и фотоэлектрических микросистем.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ РБ на 2021-2025 г. «Материаловедение, новые материалы и технологии» (задание № 2.19 и задание № 1.14).

Литература

1. Investigations into the physical properties of SnO_2/MoO_3 and SnO_2/WO_3 bilayered structures along with photocatalytic and antibacterial applications / A. Arfaouia [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2018. – Vol. 648. – P. 12–20.
2. Obukhov I.A., Gorokh G.G., Lozovenko A.A., Smirnova E.A. Matrices of indium antimonide nanowires and their applications // *Infocommunication and radioelectronic technologies*. – 2018. – Т. 1. – No. 1. – P. 78–94.
3. Zakhlebayeva A., Lazavenka A., Gorokh G. Multicomponent Sn–Mo–O-containing films formed in anodic alumina matrixes by ionic layer deposition // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – V.37. – Part 4. – P. 4064-4070. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.252>

4. Successive Ionic Layer Deposition (SILD): Advanced Method for Deposition and Modification of Functional Nanostructured Metal Oxides Aimed for Gas Sensor Applications / V.P. Tolstoy, S.D. Han, G. Korotcenkov // Metal Oxide Nanostructures and Their Applications : Ed. A. Umar and Y.-B. Hahn. – 2010. – Vol. 3. – P. 1–58.
5. Gorokh G., Zakhlebayeva A., Lazavenka A., Sobolev N., Zhylinski V., Bogomazova N., Yarmolich M., Kalanda N. / Functional Multicomponent Metal Oxide Films Based on Sr, Sn, Fe and Mo in the Anodic Alumina Matrices // Physica Status Solidi (b). – 2020. – Vol. 257. – No. 3. – 1900283 (8 pp.). – <https://doi.org/10.1002/pssb.202070018>

FORMATION AND STUDY OF NANOSTRUCTURED
SYSTEMS BASED ON SEMICONDUCTOR COMPOUNDS
OF BISMUTH, INDIUM, ANTIMONY AND TELLURIUM

Gorokh G.¹, Fiadosenka U.¹, Em M.¹, Taratyn I.²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

²Belarusian National Technical University, Minsk

Nanostructured systems based on bismuth, indium, antimony and tellurium compounds have been formed, representing arrays of electrodeposited nanowires of binary semiconductors and nanostructured composite films obtained by ion layering on anodic aluminum oxide matrices. Comprehensive studies of the morphology and composition of the obtained composite films have been carried out using scanning electron microscopy and electron probe X-ray spectral microanalysis.