

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

С.С. Грабчиков<sup>1</sup>, Д.И. Тишкевич<sup>1</sup>, Д.С. Васин<sup>1,2</sup>, А.В. Труханов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

<sup>2</sup>УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
г. Минск, Республика Беларусь

*В настоящее время в медицине используется широкий спектр ионизирующих излучений в качестве диагностических методов исследования внутренних органов человека – магнитно-резонансная томография, позитронно-эмиссионная томография и компьютерная томография. Однако при их проведении увеличивается частота возникновения повреждений в ДНК в связи с пагубным воздействием ионизирующего излучения на здоровые ткани и органы пациентов.*

*В качестве защитных материалов, поглощающих высокоэнергетические излучения, как правило, применяют тяжелые элементы. Наиболее широко используется в настоящее время тяжелый металл – свинец. Это высокотоксичный материал с высокими значениями плотности и применение его создает значительные трудности для экологической обстановки при производстве и утилизации изделий радиационной защиты. Висмут нетоксичен и имеет невысокую стоимость, а широкие технологические возможности его получения делают весьма актуальным применение в качестве материала для радиационной защиты.*

*Исследованы условия электрохимического осаждения и структура покрытий висмута, влияние на них различных органических добавок. Показано, что покрытия висмута имеют ромбоэдрический тип кристаллической решетки, а введение в электролит органических добавок приводит к изменению микроструктуры и текстуры роста покрытий. Изучена эффективность радиационной защиты экранов на основе висмута при облучении электронами с энергией 1,6–1,8 МэВ. Установлено, что оптимальными с точки зрения эффективности защиты и массогабаритных параметров являются экраны из висмута характеризующиеся значениями приведенной толщины 2 г/см<sup>2</sup> и коэффициентом ослабления, равным 156.*

**Ключевые слова:** электрохимическое осаждение, висмут, экранирование, медицинская защита, электронное излучение

## MATERIALS FOR MEDICAL DIAGNOSTIC EQUIPMENT PROTECTION AGAINST IONIZING RADIATION

S.S. Grabchikov<sup>1</sup>, D.I. Tishkevich<sup>1</sup>, D.S. Vasin<sup>1,2</sup>, A.V. Trukhanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SSPA “Scientific and Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus”

<sup>2</sup>“Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”

Minsk, Republic of Belarus

*Nowadays, a wide range of ionizing radiation (IR) is used in medicine as diagnostic methods for the human internal organs investigation – magnetic resonance imaging, positron emission tomography, computed tomography. However with tomography using the frequency of damage in DNA increases due to the harmful effects of ionizing radiation on patients healthy tissues and organs.*

*Heavy elements are usually used as shields materials that effectively absorb high-energy radiation. At present the most widely used heavy metal is lead. This is highly toxic material with high density values and its application creates significant difficulties for the environmental situation in the production and disposal of radiation protection products. Bismuth is non-toxic and has a low cost, and the wide technological possibilities for its production make it relevant to use it as a material for radiation protection.*

*Electrodeposition conditions and structure of bismuth coatings were studied. The influence of organic additives on the process of bismuth electrodeposition was examined. It is shown that bismuth coatings have a rhombohedral type of crystal lattice, and the introduction of a number of organic additives into the electrolyte leads to bismuth microstructure and growth texture change. The protection efficiency of bismuth shields under 1.6–1.8 MeV radiation was studied. It is established that bismuth shields with optimal from the point of view protection efficiency and mass-dimension parameters, are characterized by 2 g/cm<sup>2</sup> reduced thickness values and an attenuation coefficient equal to 156.*

**Keywords:** electrochemical deposition, bismuth, shielding, medical protection, electron radiation

**E-mail:** dashachushkova@gmail.com

## 1. Введение

В настоящее время в медицине используется широкий спектр ИИ в качестве диагностических методов исследования внутренних органов человека. Методы магнитно-резонансной томографии (МРТ) и позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) являются активно развивающимися диагностическими и исследовательскими инструментами ядерной медицины. В основе ПЭТ лежит возможность при помощи специального детектирующего оборудования (ПЭТ-сканера) отслеживать распределение в организме биологически активных соединений, меченных позитрон-излучающими радиоизотопами [1] излучения. Например, однократное использование самого популярного меченого соединения (радиофармпрепарата 18F-FDG) для ПЭТ-нейровизуализации и лечения онкологических больных, создает эффективную дозу облучения 14 мЗв. Для сравнения предельная максимальная рабочая доза за год для работников атомной станции может достигать 50 мЗв. Основным поражающим фактором является гамма-излучение, которое возникает при аннигиляции позитронов с электронами. Для эффективного экранирования гамма-излучения при МРТ-ПЭТ диагностике были определены основные требования, предъявляемые к материалам [1]: ограниченная совместимость по проводимости; ограниченная магнитная совместимость; высокий коэффициент массового ослабления ( $d/\rho$ , где  $d$  – толщина материала;  $\rho$  – плотность материала); высокая плотность материала.

Другим не менее важным методом для исследования внутренних органов человека является метод компьютерной томографии (КТ), основанный на измерении и компьютерной обработке разности ослабления рентгеновского излучения различными по плотности тканями. В настоящее время рентгеновская КТ является основным то-

мографическим методом исследования внутренних органов человека с использованием рентгеновского излучения. Однако при проведении компьютерной томографии увеличивается частота возникновения повреждений в ДНК. При проведении КТ доза излучения оказалась в 120 раз выше, чем при однократном рентгенологическом обследовании грудной клетки [2].

В настоящее время спектр синтезируемых материалов достаточно широк, ряд из них может быть перспективен для использования в качестве экранов радиационной защиты [3–5]. С целью защиты от электронного, рентгеновского и гамма-излучений используют алюминий, железо, медь, вольфрам, свинец, силикатное стекло и др. В качестве материала экранов, эффективно поглощающих высокоэнергетические излучения, как правило, применяют тяжелые элементы. Наиболее широко используемый тяжелый металл – свинец. Это высокотоксичный материал с высокими значениями плотности ( $\rho = 11,35 \text{ г/см}^3$ ). Применение его создает значительные трудности для экологической обстановки при производстве и утилизации изделий радиационной защиты. Альтернативой данному материалу может являться висмут. Он относится к рассеянным элементам с содержанием  $2 \cdot 10^{-5} \%$  в земной коре и обладает рядом необычных физико-химических свойств – низкими коэффициентом теплопроводности и поперечного сечения тепловых нейтронов, сравнительно высокой химической стойкостью к окислению и нерастворим в соляной кислоте в отсутствие кислорода. Висмут нетоксичен и имеет невысокую стоимость, широкие технологические возможности его получения делают весьма актуальным его применение в качестве материала для радиационной защиты.

Особенно остро проблема защиты от ИИ стоит во время КТ диагностики молочных и щитовидных желез, т.к. они весьма радиационно-чувствительны к рентгеновскому излучению. В работах [6–8] изучены методы создания висмутовой защиты и раскрываются основные эксплуатационные характеристики. Показано, что данные экраны обладают высокой эффективностью экранирования 30 % и более. Авторы работ [9,10] делают вывод о том, что несмотря на технические нюансы по использованию висмутовых экранов, они все же остаются наилучшими кандидатами для защиты от рентгеновского излучения.

При нанесении оксида висмута на легкие ткани можно обеспечить степень ослабления рентгеновского излучения аналогичную, как и в случае свинцовой одежды [11]. Текстильные материалы с частицами  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  применяют при изготовлении спецодежды для медицинского персонала, работающего на рентгеновских и гамма-установках [12]. Использование многослойных структур, содержащих слои на основе легких (Sn, Sb, Ba) и тяжелых (W и Bi) элементов, на полимерной подложке обеспечивает ослабление, эквивалентное случаю чистого свинца, но на 25 % с более низкими массогабаритными параметрами [13]. При этом многослойные структуры обеспечивают в 5 раз более высокое ослабление, чем свинцовая защита, при напряжении на рентгеновской трубке 50 кВ. Но этот эффект постепенно уменьшается и при напряжении 150 кВ исчезает [14].

Необходимо отметить, что для создания эффективной радиационной защиты толщина материалов экранов должна составлять порядка 1 мм и более. В связи с этим в настоящей работе была поставлена задача разработки режимов электрохимического осаждения для синтеза покрытий висмута толщиной 100–2700 мкм, исследования их структуры, некоторых физико-технических свойств и эффективности ослабления потоков электронного излучения.

## 2. Методика эксперимента

Осаждение покрытий висмута производили из перхлоратного электролита висмутирования [15] при следующих условиях и составах раствора: висмут (III) гидроксид –

45 г/л, концентрированная 65 %-ная хлорная кислота – 225 мл/л, желатин – 0,3–0,5 г/л, вода дистиллированная – до 1 л, температура – 20–25 °С, рабочая плотность тока – 2,4–3,0 А/дм<sup>2</sup>. Для улучшения адгезии висмутового покрытия с алюминиевой подложкой перед осаждением висмута наносили подслои химически осажденного Ni-P. Анод – висмутовые стержни. В качестве источника тока использовался потенциостат ПИ-50.01.

Изготовлено две партии экспериментальных образцов экранов: первая партия для исследования структурных свойств покрытий – шесть образцов с толщинами висмута 100, 200, 300, 400, 500 и 600 мкм (№1–6); вторая партия для определения коэффициентов ослабления электронов – шесть образцов висмута с толщинами 972, 1340, 1598, 1952, 2236, 2640 мкм (№7–12). В качестве подложек использовались алюминиевые пластины размерами 40×40×0,4 мм.

Для улучшения качества висмутовых покрытий (снижение внутренних напряжений, повышение пластичности) использован ряд органических добавок – резорцин, крезол, красители (акридиновый желтый и сафраниновый фиолетовый RV), оксиэтилированные спирты (синтанол ДС-10, тритон Х-100), желатин. Добавки вводились в электролит в концентрации 1 г/л, как по отдельности, так и в сочетании друг с другом.

Исследование морфологии поверхности и микроструктуры висмута проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) LEO 1455VP. Перед исследованием экспериментальные образцы подвергали очистке в ультразвуковой ванне и полировке. Рентгенофазовый анализ выполняли на дифрактометре PanAnalyticalEmperean с использованием монохроматизированного Cu K $\alpha$ -излучения. Фазовый анализ проводился при съемке со скоростью детектора 2 градуса в минуту. Для определения параметров решетки осуществлялась прецизионная запись дифракционных линий, расположенных в дальней угловой области с целью уменьшения погрешности измерения, со скоростью детектора 0,125 градуса в минуту.

Толщину покрытий висмута ( $d$ ) определяли гравиметрическим методом. Приведенную толщину экранов ( $d_{np}$ ) рассчитывали по формуле

$$d_{np} = d\rho_{Bi}, \quad (1)$$

где  $\rho_{Bi}$  – плотность висмута.

Облучение образцов проводилось на линейном ускорителе электронов ЭЛУ-4. Номинальная энергия электронов после окна вывода составляла  $E_e = 4$  МэВ, флюенс  $\Phi = (0,5 \div 50) \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Плотность потока электронов контролировалась с помощью цилиндра Фарадея и составляла  $4 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.

Как известно [16], при радиационном воздействии коэффициент ослабления излучения веществом (по поглощенной дозе) существенно зависит от энергетического спектра излучения. Для снижения энергии электронов между мишенью и окном вывода электронов устанавливалась дюралюминиевая пластина толщиной 5 мм (рис. 1). Пучок электронов, выходящий из окна вывода ускорителя, падает на замедляющий дюралюминиевый экран и далее, с энергией 1,6–1,8 МэВ и сопутствующим тормозным излучением, направляется на исследуемый радиационный (защитный) экран, за которым установлен тестовый образец. Расстояние от окна вывода электронов до замедляющего экрана составляло 0,5 м, а до радиационного экрана – 1 м.

Коэффициент ослабления потоков электронов радиационными экранами определяли из отношения флюенсов падающего на экран и прошедшего через экран потоков электронов. В качестве тестовых структур использовались транзисторные МОП-структуры (элементы логических КМОП ИМС IN74AC04N производства ОАО «Интеграл»). Данный метод определения поглощенной дозы излучения основан на изменении радиационно-чувствительных параметров МОП-транзисторов (МОПТ) и достаточно удобен с точки зрения практической реализации. Измерения сток-затворных вольт-

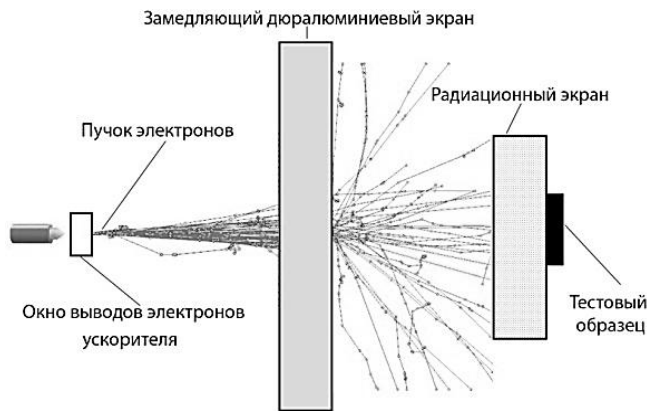


Рис. 1. Схема испытаний радиационных экранов

Для нахождения поглощенной дозы прошедшего защитный экран излучения рассчитывалось значение  $\Delta U$  для р-МОПТ, защищенной экраном, а для поглощенной дозы падающего на защитный экран излучения – микросхемы, не защищенной экраном. Значения коэффициента экранирования (коэффициента ослабления) ( $K_s$ ) определяли из соотношения

$$K_s = \Phi / \Phi_0, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – флюенс электронов, соответствующий параметрическому отказу тестовой приборной структуры, защищенной экраном;  $\Phi_0$  – флюенс электронов, соответствующий параметрическому отказу тестовой приборной структуры без экрана.

Параметрический отказ фиксировался при изменении порогового напряжения  $\Delta U = 0,05$  В.

### 3. Результаты и их обсуждение

**Структура покрытий висмута.** Висмут является тяжелым элементом с порядковым номером 83, массовым числом 208,98 и плотностью 9,747 г/см<sup>3</sup>. На рис. 2 приведены рентгеновские спектры покрытий висмута различной толщины (партия 1), полученных из электролита, не содержащего органических добавок. С увеличением толщины покрытия количество рефлексов увеличивается, однако их интенсивность падает, что свидетельствует о формировании кристаллитов различной ориентации. Согласно проведенным оценкам толщина слоя, участвующего в формировании дифракционной картины, составляет приблизительно 5 мкм. По данным рентгеновской дифракции структура всех образцов покрытий висмута характеризовалась ромбоэдрическим типом кристаллической решетки. Важно отметить, что покрытия висмута, полученные из электролита без добавок, имеют ярко выраженную текстуру (012). Данная текстура сохраняется и при введении в электролит органических добавок – крезола, резорцина, желатина, синтанола.

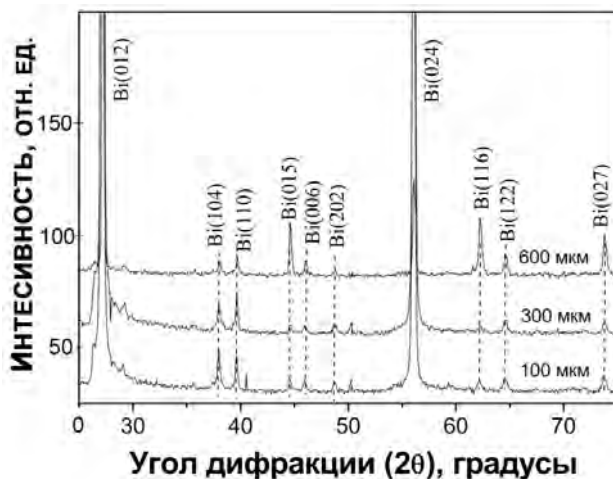


Рис. 2. Спектры рентгеновской дифракции покрытий Bi толщиной 100, 300 и 600 мкм

Сформированные покрытия висмута толщиной 100 мкм обладают крупнозернистым строением (рис. 3, а). Зерна в виде дендритов размерами от 10 до 30 мкм имеют ограниченную форму и резкие границы. Поскольку продольные размеры зерен сопоставимы с толщиной покрытий, по-видимому, можно полагать, что на рис. 3, а представлен первый слой висмута, выращенный на алюминиевой подложке. С увеличением толщины покрытия характер морфологии поверхности значительно меняется. При толщинах 300 и 600 мкм покрытия висмута лишены дендритов (рис. 3, б, в). СЭМ изображения поверхности представляет собой совокупность крупномасштабной составляющей с овальными образованиями размерами от 80 до 120 мкм и мелкозернистой составляющей с кристаллитами размерами от 4 до 12 мкм. В работе [17] при изучении висмутовых покрытий, осажденных на медные подложки из электролита, содержащего  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  и  $\text{HNO}_3$ , также при толщинах более 100 мкм наблюдалось прекращение дендритного роста кристаллитов в покрытиях.

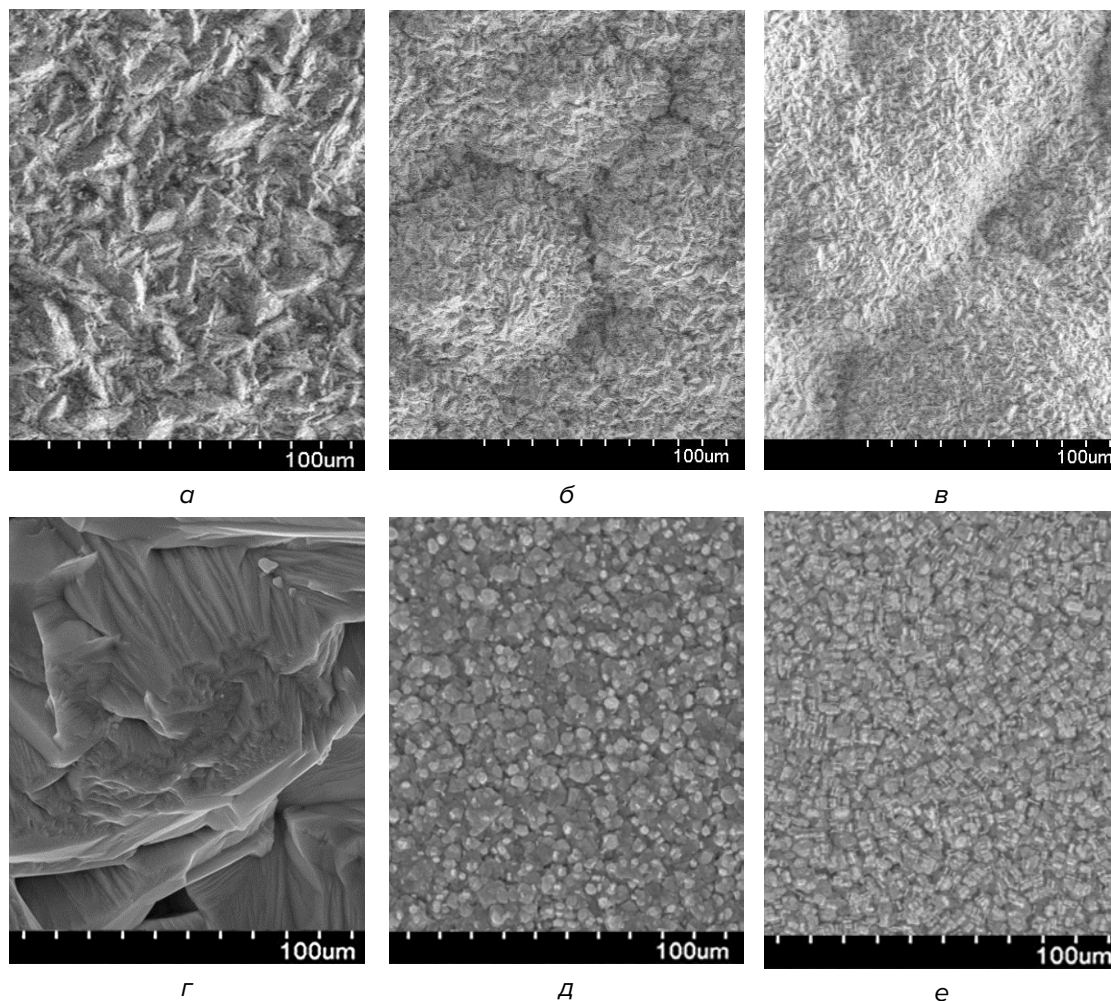


Рис. 3. РЭМ-изображение поверхности образцов с покрытиями висмута толщиной 100 мкм (а), 300 мкм (б) и 600 мкм (в), полученные из перхлоратного электролита без добавок и с добавками различной природы (толщина 100 мкм): добавка RV(г), желатин + резорцин (д), желатин + крезол (е)

Изучение морфологии поверхности образцов, осажденных из перхлоратного электролита, содержащего и не содержащего органические добавки, методом СЭМ показало, что без добавок формируются крупнокристаллические пленки с размером

зерен в десятки микрон (рис. 3, а). При введении в электролит таких добавок, как резорцин, крезол, желатин и синтанол, наблюдается заметное уменьшение размера кристаллитов, что в ряде случаев сопровождается повышением пластичности осажденного покрытия. Особенно сильно размер кристаллитов уменьшается до  $2\div 6$  мкм при комбинированном введении в электролит добавок; эффективны следующие комбинации: синтанол + резорцин, желатин + крезол, желатин + резорцин (рис. 3, д, е).

В присутствии некоторых органических добавок, таких как RV, акридиновый желтый, при осаждении формируются крупнокристаллические покрытия висмута, содержащие совокупность вытянутых зерен со сложной формой и резкими гранями (рис. 3, е).

При этом текстура роста покрытий висмута изменяется с ориентации (012) на ориентацию (110) (рис. 4). Характерно, что такое изменение текстуры наблюдается только для покрытий, полученных с применением добавки RV в достаточно узком диапазоне плотностей тока от 1,5 до 2,0 А/дм<sup>2</sup>.

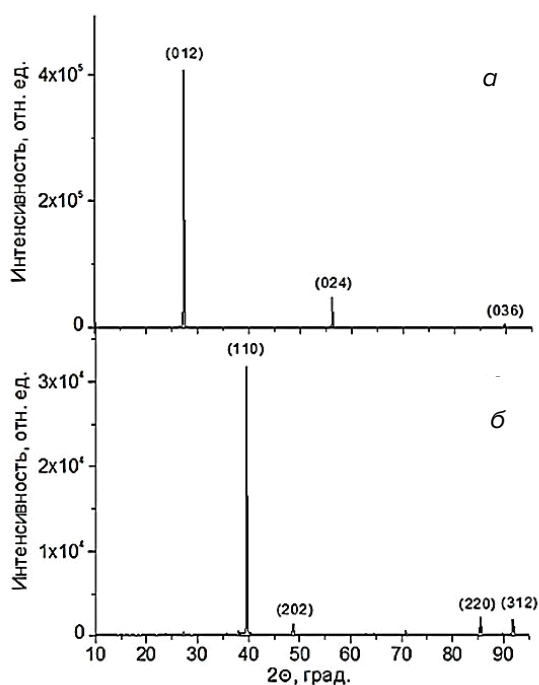


Рис. 4. Рентгенограммы висмутовых покрытий, осажденных из электролита без добавок (а) и с добавкой RV (5 г/л) (б)

**Радиационно-защитные свойства покрытий висмута.** Общим в изменении сток-затворных характеристик ВАХ тестовых структур р-МОПТ при облучении электронами является сдвиг в сторону отрицательных значений напряжения с ростом дозы облучения. Наблюдается также несколько нехарактерный для р-МОПТ рост токов утечки с увеличением флюенса. Изменения характеристик транзисторов связаны с захватом свободных носителей заряда на глубокие центры в объеме диэлектрика с образованием поверхностных состояний на границах раздела диэлектрик – полупроводник. Захват носителей заряда в объеме SiO<sub>2</sub> и на уровне поверхностных состояний вызывает сдвиг пороговых напряжений, а увеличение плотности поверхностных состояний приводит к дополнительному рассеянию подвижных носителей заряда и уменьшению крутизны сток-затворной ВАХ МОПТ. Рост токов утечки р-МОПТ с увеличением флюенса обусловлен соответствующим ростом токов утечки защитных диодов на входе и выходе микросхем.

На рис. 5, а представлена зависимость сдвига порогового напряжения  $\Delta U$  (по абсолютной величине) от флюенса электронного облучения незащищенной экраном тестовой структуры. Из полученных результатов был определен флюенс электронов, при котором наступает параметрический отказ незащищенного экраном р-МОПТ. Фиксируемому значению параметрического отказа  $\Delta U = 0,05$  В соответствует флюенс электронов порядка  $\Phi_0 = 2,3 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

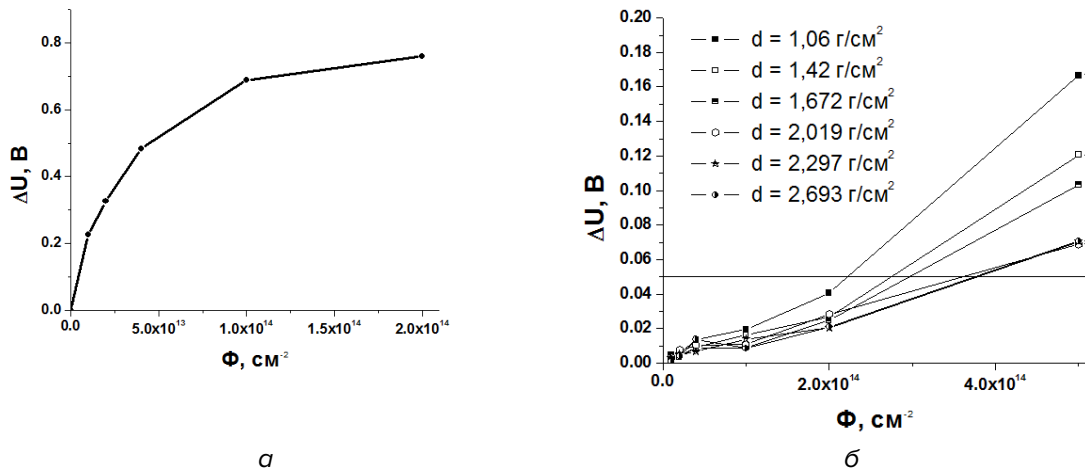


Рис. 5. Изменение порогового напряжения  $\Delta U$  для р-МОПТ при облучении электронами микросхемы, не защищенной экраном (а) и защищенной экранами на основе висмута с различной приведенной толщиной (б)

На рис. 5, б показаны зависимости сдвига порогового напряжения при облучении электронами р-МОПТ, защищенных экранами на основе висмута. Для всех защищенных экранами МОПТ наблюдается рост  $\Delta U$  во всем исследуемом диапазоне флюенсов электронного облучения. Однако при одних и тех же значениях флюенса электронов изменения порогового напряжения существенно меньше для защищенных образцов по сравнению с незащищенными образцами. При этом данный эффект усиливается с увеличением толщины висмутного экрана. Из результатов, представленных на рис. 5, б, следует, что все используемые экраны обладают достаточно высокими значениями коэффициентов ослабления. Оценим из соотношения (2) величину  $K_3$  для тестовых структур при условии параметрического отказа при  $\Delta U = 0,05$  В. Результаты расчетов значений  $K_3$  образцов экранов N°7–12 на основе висмута в зависимости от приведенной толщины приведены в таблице.

Табл. 1

**Флюенс электронов, соответствующий параметрическому отказу ( $\Delta U = 0,05$  В) тестовой приборной структуры, и значения коэффициента эффективности экранирования  $K_3$  образцов экранов на основе висмута с различной приведенной толщиной**

Номер экрана	Приведенная толщина экрана, г/см <sup>2</sup>	Значение $\Phi$ , см <sup>-2</sup>	$K_3 = \Phi/\Phi_0$
7	1,1	$2,2 \cdot 10^{14}$	95
8	1,4	$2,7 \cdot 10^{14}$	117
9	1,7	$3,0 \cdot 10^{14}$	130
10	2,0	$3,6 \cdot 10^{14}$	156
11	2,3	$3,8 \cdot 10^{14}$	162
12	2,7	$3,8 \cdot 10^{14}$	165



Как видно из данных таблицы, значения  $K_3$  увеличиваются с ростом приведенной толщины экранов. При этом увеличение толщины висмута до значений  $d_{np} = 2,0$  г/см<sup>2</sup> значительно сильнее отражается на изменении  $K_3$ , чем при  $d_{np} > 2,0$  г/см<sup>2</sup>. В целом зависимости  $K_3(d_{np})$  можно аппроксимировать полиномом второй степени

$$K_3 = A + B_1 d_{np} + B_2 d_{np}^2, \quad (3)$$

где  $A = -28,046$ ;  $B_1 = 137,15884$ ;  $B_2 = -23,9592$ .

Анализ полученных результатов показывает, что уже при толщине экрана  $d_{np} = 1,7$  г/см<sup>2</sup> достигается ослабление накопленной образцом дозы в  $K_3 = 130$  раз. Чрезмерное наращивание толщины висмута не дает явного выигрыша в радиационно-защитных свойствах экранов. Можно заключить, что наиболее оптимальными для защиты от электронов с точки зрения массогабаритных параметров являются экраны с толщинами висмута порядка  $1,7 \div 2,0$  г/см<sup>2</sup>.

Сопоставление ВАХ тестовых ИМС, измеренных в условиях защиты экранами на основе висмута и свинца с эквивалентными значениями приведенных толщин ( $d_{np} = 1,6$  г/см<sup>2</sup>) показали, что при воздействии потоков электронов дозами до  $3 \times 10^{13}$  см<sup>-2</sup> изменения пороговых напряжений для висмута и свинца весьма близки.

Наблюдаемый в эксперименте характер зависимостей  $K_3(d_{np})$  обусловлен взаимодействием электронов и тормозного излучения с веществом. При увеличении толщины экранов в диапазоне значений  $d_{np} \leq 2,0$  г/см<sup>2</sup> эффективно снижает вклад электронной составляющей в поглощенную дозу защищаемого образца, что и наблюдается в эксперименте (см. рис. 5, б и таблицу). При значениях  $d_{np} \approx 2,0$  г/см<sup>2</sup> все электроны рассеиваются материалом экрана. В этом случае и при  $d_{np} > 2,0$  г/см<sup>2</sup> вклад в поглощенную дозу вносят вторичные виды излучений, преобладающим из которых является тормозное излучение. Последнее обладает высокой проникающей способностью, и защита от него изделий электронной техники с помощью экранов локальной защиты становится малоэффективной. Поэтому при достижении определенных значений приведенной толщины экранов ( $d_{np} \approx 2$  г/см<sup>2</sup>) и дальнейшем ее росте ход зависимостей  $\Delta U = \Delta U(\Phi)$  для  $d_{np} = 2,0$ ;  $2,3$  и  $2,7$  г/см<sup>2</sup> практически совпадает (рис. 5, б) и значения  $K_3$  незначительно отличаются друг от друга (табл. 1).

#### 4. Выводы

Изучены условия электрохимического осаждения и структура покрытий висмута. Получены партии образцов покрытий толщиной от 100 до 2640 мкм, имеющих ромбоэдрический тип кристаллической решетки. Показано, что введение в перхлоратный электролит органических добавок – RV, акридинового желтого – приводит к изменению текстуры с ориентации (012) на ориентацию (110); введение органических добавок – резорцина, крезола, желатина и синтанола – способствует измельчению микроструктуры и уменьшению размеров зерен от  $80 \div 120$  мкм до  $2 \div 6$  мкм, сопровождается повышением пластичности покрытий.

Исследования радиационно-защитных свойств экранов на основе висмута при облучении тестовых структур р-канальных МОПТ (элементов КМОП ИМС) электронами с энергией  $1,6\text{--}1,8$  МэВ и экспозиционными дозами до  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> показали, что с ростом значений приведенной толщины  $d_{np}$  от  $1,1$  до  $2,7$  г/см<sup>2</sup> величина коэффициента эффективности экранирования  $K_3$  возрастает от 95 до 165. Наиболее оптимальными, с точки зрения массогабаритных параметров, являются значения  $d_{np}$  порядка  $1,7 \div 2,0$  г/см<sup>2</sup>. Увеличение толщины экранов более  $2$  г/см<sup>2</sup> не приводит к существенному росту  $K_3$ , что обусловлено преимущественным вкладом в поглощенную дозу защищаемых образцов тормозного излучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. The role of magnetic susceptibility in magnetic resonance imaging: MRI magnetic compatibility of the first and second kinds / J.F. Schenck [et al.] // *Med. Phys.* – 1996. – Vol. 23, P. 815–850.
2. Stanford University Medical Center, DNA damage seen in patients undergoing CT scanning, study finds / Stanford University Medical Center // *ScienceDaily* – Standfort – <http://www.sciencedaily.com/releases/2015/07/150722144634.htm>).
3. Борц, Б. В. Моделирование прохождения электронов через слоистый композиционный материал / Б. В. Борц, И. Г. Марченко, П. Н. Бездверный // *Вопр. атом.науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение* (94). – 2009. – Вып. 3 – С. 175–177.
4. Першенков, В. С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В. С. Першенков, В. Д. Попов, А. В. Шальнов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.
5. Nikiforov, A. Y. Simulation of Space Radiation Effects in Microelectronic Parts / A. Y. Nikiforov, A. I. Chumakov // *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure.* – Kluwer Academic Publishers, 2004. – P. 165–184.
6. McCollough, C. Point/counterpoint. The use of bismuth breast shields for CT should be discouraged / C. McCollough, J. Wang, R. Gould, C. Orton // *Med. Phys.* – 2012. – Vol. 39, №5. – P.2321–2324.
7. Mendes, M Assessment of patient dose reduction by bismuth shielding in CT using measurements GENAT4 and MCNPX simulations / M. Mendes [et al.] // *Radiation protection dosimetry.* – 2015. – №165. – P.175–181.
8. Kim, S. Dosimetric characterization of bismuth shields in CT: measurements and Monte Carlo simulations / S. Kim [et al.] // *Radiation protection dosimetry.* – 2009. – Vol.113. – №2. – P.105–110.
9. Morford, K. Bismuth shielding during CT exams: a literature review / K. Morford, L. Watts // *Radiology management.* – 2012. – P.45–47.
10. Zatelli, G. Efficacy of bismuth shields for paediatric MSCT applications: dosimetric and image quality evaluations / G. Zatelli, G. Belli, C. Cesarini, A. Ciccarone // *Proceedings of Congress of the International Radiation Protection association (IRPA), Buenos Aires, 19–24 october 2008.* – P.128.
11. Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments / J. P. McCaffrey [et al.] // *Med. Phys. J.* – 2007. – Vol. 34, N 2. – P. 530–537.
12. Bismuth oxide-coated fabrics for X-ray shielding / Huda Ahmed Maghrabi [et al.] // *Textile Research J.* – 2015. – Vol. 1, N 10. – P. 1.
13. Shielding properties of lead-free protective clothing and their impact on radiation doses / H. Schlattl [et. al.] // *Med. Phys. J.* – 2007. – Vol. 34, N 11. – P. 4270–4280.
14. Optimizing non-Pb radiation shielding materials using bilayers / J. P. McCaffrey [et al.] // *Med. Phys. J.* – 2009. – Vol. 36, N 12. – P. 5587–5594.
15. Tishkevich, D.I. Electrochemical deposition regimes and critical influence of organic additives on the structure of Bi films / D.I. Tishkevich, S.S. Grabchikov, L.S. Tsybulskaya, V.S. Shendyukov, S.S. Perevoznikov, S.V. Trukhanov, E.L. Trukhanova, A.V. Trukhanov, D.A. Vinnik // *J. of All. and Comp.* – 2018. – Vol. 735. – P. 1943–1948.
16. Особенности оценки радиационной стойкости микросхем в специализированных защитных корпусах / Уланова А.В [и др.] // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС-2012).* – 2012. – N 1. – С. 584–587.
17. Electrodeposition of bismuth from nitric acid electrolyte / E. Sandnes [et. al.] // *ElectrochimicaActa* – 2007. – N 52. – P. 6226.

## REFERENCES

1. The role of magnetic susceptibility in magnetic resonance imaging: MRI magnetic compatibility of the first and second kinds / J.F. Schenck [et al.] // *Med. Phys.* – 1996. – Vol. 23, P. 815–850.
2. Stanford University Medical Center, DNA damage seen in patients undergoing CT scanning, study finds / Stanford University Medical Center // *ScienceDaily* – Standfort – <http://www.sciencedaily.com/releases/2015/07/150722144634.htm>).
3. Borc B.V., Marchenko I.G., Bezvernii P.N. Modelirovanie prohozdeniya elektronov cherez sloisty kompozitsionnyi material [The modeling of electron transmission through laminated composition material]. *Voprosi atomnoi nauki i tehniki = Fizika radiacionnih povrezhdeniy i radiacionnoe materialovedenie*, 2009, no. 94, pp. 175–177. (in Russian)
4. Pershenkov V.S. Poverhnosnie radiacionnie effecti v elementah integral'nih mikroschem [Surface radiation effects in the integrated microcircuits elements]. Moscow, Energoatomizdat, 1988, 256 p. (in Russian)
5. Nikiforov, A.Y. Simulation of Space Radiation Effects in Microelectronic Parts / A.Y. Nikiforov, A.I. Chumakov // *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure.*- Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 165–184.
6. McCollough, C. Point/counterpoint. The use of bismuth breast shields for CT should be discouraged / C. McCollough, J. Wang, R. Gould, C. Orton // *Med. Phys.* 2012. –Vol. 39, №5. P.2321–2324.
7. Mendes, M Assessment of patient dose reduction by bismuth shielding in CT using measurements GENAT4 and MCNPX simulations / M. Mendes [et al.] // *Radiation protection dosimetry.* –2015. №165. P.175–181.
8. Kim, S. Dosimetric characterization of bismuth shields in CT: measurements and Monte Carlo simulations / S. Kim [et al.] // *Radiation protection dosimetry.* 2009. Vol.113. №2. P.105–110.

9. Morford, K. Bismuth shielding during CT exams: a literature review / K. Morford, L. Watts // Radiology management. 2012. P.45–47.
10. Zatelli, G. Efficacy of bismuth shields for paediatric MSCT applications: dosimetric and image quality evaluations / G. Zatelli, G. Belli, C. Cesarini, A. Ciccarone // Proceedings of Congress of the International Radiation Protection association (IRPA), Buenos Aires, 19–24 october 2008. P.128.
11. Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments / J. P. McCaffrey [et al.] // Med. Phys. J. 2007. Vol. 34, N 2. P. 530–537.
12. Bismuth oxide-coated fabrics for X-ray shielding / Huda Ahmed Maghrabi [et al.] // Textile Research J. – 2015. Vol. 1, N 10. P. 1.
13. Shielding properties of lead-free protective clothing and their impact on radiation doses / H. Schlattl [et. al.] // Med. Phys. J. 2007. Vol. 34, N 11. P. 4270–4280.
14. Optimizing non-Pb radiation shielding materials using bilayers / J. P. McCaffrey [et al.] // Med. Phys. J. 2009. Vol. 36, N 12. P. 5587–5594.
15. Tishkevich, D.I. Electrochemical deposition regimes and critical influence of organic additives on the structure of Bi films / D.I. Tishkevich, S.S. Grabchikov, L.S. Tsybul'skaya, V.S. Shend'yukov, S.S. Perevoznikov, S.V. Trukhanov, E.L. Trukhanova, A.V. Trukhanov, D.A. Vinnik // J. of All. and Comp. – 2018. – Vol. 735. – P. 1943–1948.
16. Ulanova A.V. [et al.] Osobennosti ocenki radiacionnoi stoikosti microshem v specializirovannih zashitnih korpusah [Features of the evaluation of the radiation resistance of microcircuits in specialized protective enclosures] // Problemi razrabotki perspektivnih micro- i nanoelectronnih system (MES-2012). 2012. N 1, pp. 584–587. (in Russian)
17. Electrodeposition of bismuth from nitric acid electrolyte / E. Sandnes [et. al.] // ElectrochimicaActa – 2007. N 52. P. 6226.

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 26.04.18*