

## РАДИАЦИОННЫЕ ЭКРАНЫ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИ ОСАЖДЕННЫХ ПОКРЫТИЙ Вi И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Д.И. Тишкевич<sup>1</sup>), С.С. Грабчиков<sup>1</sup>), С.Б. Ластовский<sup>1</sup>),  
Л.С. Цыбульская<sup>2</sup>), В.С. Шендюков<sup>2</sup>), А.В. Труханов<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>)НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки 19, 220072 Минск, Беларусь, dashachushkova@gmail.com, gss@physics.by, lastov@physics.by, truhanov86@mail.ru

<sup>2</sup>)Белорусский государственный университет, НИИ физико-химических проблем, ул. Ленинградская 14, 220006 Минск, Беларусь, tsybul@bsu.by, schendi@mail.ru

Современные изделия микроэлектронной техники широко применяются в ракетно-космической, авиационной, военной и атомной технике. Однако, они весьма чувствительны к воздействию различных ионизирующих излучений (электроны, протоны, тяжелые заряженные частицы, рентгеновское и гамма излучения). В настоящее время спектр синтезируемых материалов достаточно широк, ряд из них может быть перспективен для использования в качестве экранов радиационной защиты. В качестве материала экранов, эффективно поглощающих высокоэнергетические излучения, обычно используют тяжелые элементы. Наиболее широко используемый тяжелый металл – свинец, однако он обладает рядом недостатков. Висмут является нетоксичным и обладает невысокой стоимостью, а широкие технологические возможности получения делают его весьма актуальным для применения в качестве материала радиационной защиты. Изучена эффективность радиационной защиты экранов на основе висмута при облучении электронами с энергией 1.6-1.8 МэВ. Эффективность ослабления электронного потока оценивалась по изменению вольтамперных характеристик тестовых МОП-транзисторных структур, расположенных за экранами и без экранов. Установлено, что оптимальными, с точки зрения эффективности защиты и массогабаритных параметров, являются экраны висмута, характеризующиеся значениями приведенной толщины 2 г/см<sup>2</sup> и коэффициентом ослабления равным 156.

### Введение

Современные изделия полупроводниковой и микроэлектронной техники широко применяются в ракетно-космической, авиационной, военной и атомной технике. Однако они весьма чувствительны к воздействию различных ионизирующих излучений (электроны, протоны, тяжелые заряженные частицы, рентгеновское и гамма излучения) [1]. В связи с этим проблема обеспечения эксплуатационной надежности радиоэлектронных приборов и аппаратуры в условиях радиационных воздействий стоит перед многими инженерами и разработчиками техники, эксплуатируемой как в наземных условиях, так и в условиях космического пространства.

В настоящее время спектр синтезируемых материалов достаточно широк, ряд из них может быть перспективен для использования в качестве экранов радиационной защиты [2-4]. С целью защиты от электронного, рентгеновского и гамма-излучений обычно используют алюминий, железо, медь, вольфрам, свинец, силикатное стекло и др. В качестве материала экранов, эффективно поглощающих высокоэнергетические излучения, обычно используют тяжелые элементы. Наиболее широко используемый тяжелый металл – свинец. Это высокотоксичный материал с высокими значениями плотности ( $\rho=11.35$  г/см<sup>3</sup>). Применение его создает значительные трудности для экологической обстановки при производстве и утилизации изделий радиационной защиты. Висмут относится к рассеянным элементам с содержанием  $2 \cdot 10^{-5}$  % в земной коре и обладает рядом необычных физико-химических свойств. Нетоксичность и невысокая стоимость висмута, широкие технологические возможности его получения делают весьма актуальным применение висмута в качестве материала радиационной защиты.

### Методика эксперимента

Осаждение покрытий висмута производили из перхлоратного электролита висмутирования при следующих условиях и составах раствора: висмут (III) гидроксид – 45 г/л, концентрированная 65% хлорная кислота - 225 мл/л, желатин 0,3-0,5 г/л, вода дистиллированная – до 1 л, температура 20-25°C, рабочая плотность тока 2.4-3.0 А/дм<sup>2</sup>. Анод – висмутовые стержни. Изготовлена партия экспериментальных образцов экранов – шесть образцов висмута с толщинами 972, 1340, 1598, 1952, 2236, 2640 мкм (№ 1-6). В качестве подложек использовались алюминиевые пластины размерами 40x40x0.4 мм.

Облучение образцов проводилось на линейном ускорителе электронов ЭЛУ-4. Номинальная энергия электронов после окна вывода составляла  $E_e = 4$  МэВ, флюенс  $\Phi = (0.5-50) \cdot 10^{13}$  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 [5], при радиационном воздействии коэффициент ослабления излучения веществом (по поглощенной дозе) существенно зависит от энергетического спектра излучения. Для приближения характеристик спектра электронов ускорителя ЭЛУ-4 к спектру электронов радиационного пояса Земли (РПЗ) между мишенью и окном вывода электронов устанавливалась дюралюминиевая пластина толщиной 5 мм (рис. 1). Пучок электронов, выходящий из окна вывода ускорителя, падает на заземляющий 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.

Коэффициент ослабления потоков электронов радиационными экранами определяли из отношения

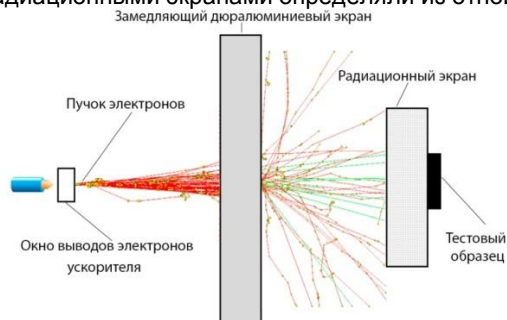


Рис. 1. Схема испытаний радиационных экранов

ния 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»).

Поглощенная доза определялась по величине сдвига ВАХ, а именно – изменению падения порогового напряжения ( $\Delta U$ ) при токах утечки  $I_c = 10^{-7}$  А для р-МОПТ. Эффективность экранирования определялась по изменению ВАХ, а именно – порогового напряжения для р-МОПТ, расположенных за экраном и без экрана. Значения коэффициента экранирования (коэффициента ослабления) ( $K_3$ ) определяли из соотношения:

$$K_3 = \Phi / \Phi_0, \quad (1)$$

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.

### Результаты испытаний экранов

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. 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  $\text{SiO}_2$  и на уровни поверхностных состояний вызывает сдвиг пороговых напряжений, а увеличение плотности поверхностных состояний приводит к дополнительному рассеянию подвижных носителей заряда и к уменьшению крутизны сток-затворной ВАХ МОПТ.

На рисунке 2а 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 параметрическо-

го отказа  $\Delta U = 0.05$  В соответствует флюенс электронов порядка  $\Phi_0 = 2.3 \cdot 10^{12}$   $\text{см}^{-2}$ .

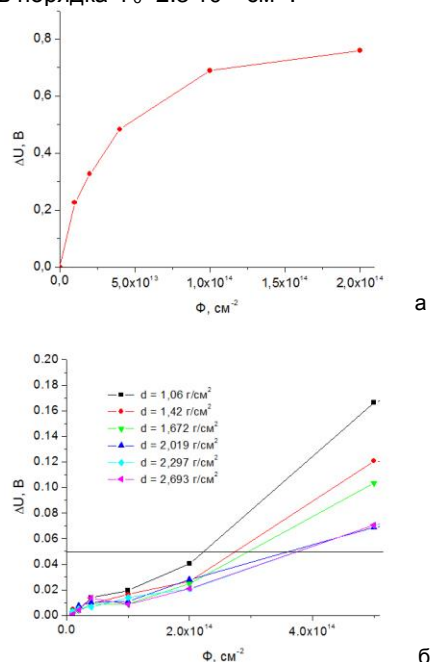


Рис. 2. Изменение порогового напряжения  $\Delta U$  для р-МОПТ при облучении электронами микросхемы, не защищенной экраном (а) и защищенной экранами на основе висмута с различной приведенной толщиной

На рисунке 2б 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 висмутового экрана. Из результатов, представленных на рисунке 2б, следует, что все используемые экраны обладают достаточно высокими значениями коэффициентов ослабления. Оценим из соотношения (1) величину  $K_3$  для тестовых структур при условии параметрического отказа при  $\Delta U = 0.05$  В. Результаты расчетов значений  $K_3$  образцов в зависимости от приведенной толщины приведены в таблице 1.

Таблица 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, $\text{г/см}^2$	Значение $\Phi$ , $\text{см}^{-2}$	$K_3 = \Phi / \Phi_0$
№ 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, приведенных в таблице 1, значения  $K_3$  увеличиваются с ростом приведенной толщины экранов. При этом увеличение толщины висмута до значений  $d_{пр} = 2.0 \text{ г/см}^2$  значительно сильнее отражается на изменении  $K_3$ , чем при  $d_{пр} > 2.0 \text{ г/см}^2$ .

Анализ полученных результатов показывает, что уже при толщине экрана  $d_{пр}=1.7 \text{ г/см}^2$  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  $1.7\text{-}2.0 \text{ г/см}^2$ .

Наблюдаемый в эксперименте характер зависимостей  $K_3(d_{пр})$  обусловлен взаимодействием электронов и тормозного излучения с веществом. 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 ( $d_{пр} \approx 2 \text{ г/см}^2$ ) и дальнейшем ее росте ход зависимостей  $\Delta U = \Delta U(\Phi)$  для  $d_{пр} = 2.0, 2.3$  и  $2.7 \text{ г/см}^2$  практически совпадает (рис. 2б), и значения  $K_3$  незначительно отличаются друг от друга (табл. 1).

### Заключение

Исследования радиационно - защитных свойств экранов на основе висмута при облучении тестовых структур р-канальных МОПТ (элементов КМОП ИМС) электронами с энергией 1.6-

1.8 МэВ и экспозиционными дозами до  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  показали, что с ростом значений приведенной толщины  $d_{пр}$  от 1.1 до  $2.7 \text{ г/см}^2$  величина коэффициента эффективности экранирования  $K_3$  возрастает от 95 до 165. Наиболее оптимальными, с точки зрения массогабаритных параметров, являются значения  $d_{пр}$  порядка  $1.7\text{-}2.0 \text{ г/см}^2$ . Увеличение толщины экранов более  $2 \text{ г/см}^2$  не ведет к существенному росту  $K_3$ , что обусловлено преимущественным вкладом в поглощенную дозу защищаемых образцов тормозного излучения.

### Список литературы

1. Spratt J.P., Passenheim B.C., Leadon R.E., Clark S. Strobel D.J. Effectiveness of IC shielded packages against space radiation // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1997. V. 44. № 6. P. 2018-2025.
2. Борц Б.В., Марченко И.Г., Бездверный П.Н. Моделирование прохождения электронов через слоистый композиционный материал // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2009. Т. 94. № 4-2. С. 175-177.
3. Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 256 с.
4. Nikiforov A.Y. Chumakov A.I. Simulation of Space Radiation Effects in Microelectronic Parts // Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 165-184.
5. Уланова А.В., Согоян А.В., Чумаков А.И. и др. Особенности оценки радиационной стойкости микросхем в специализированных защитных корпусах. // МЭС-2012.

## RADIATION SHIELDS FOR SEMICONDUCTOR DEVICES BASED ON ELECTROLYTICALLY DEPOSITED Bi COATINGS AND THEIR EFFECTIVENESS OF ELECTRON IRRADIATION PROTECTION

D. Tishkevich<sup>1</sup>), S. Grabchikov<sup>1</sup>), S. Lastovskii<sup>1</sup>), L. Tsybulska<sup>2</sup>), V. Shendyukov<sup>2</sup>), A. Trukhanov<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Scientific and Practical Materials Research Centre of the NAS of Belarus,

19 P. Brovki str., 220072 Minsk, Belarus,

dashachushkova@gmail.com, gss@physics.by, lastov@physics.by, truhanov86@mail.ru

<sup>2</sup>Research Institute for Physical Chemical Problems, Belarusian State University,  
14 Leningradskaya str., 220006 Minsk, Belarus, tsybul@bsu.by, schendi@mail.ru

The microelectronic products are widely used in aerospace, aviation, military and nuclear engineering. However, they are very sensitive to the various ionizing radiations (electrons, protons, heavy charged particles, X-ray and gamma radiation). The common used material for radiation protection is lead. In recent years, bismuth deposition has become an interesting subject for the electrochemical community because of bismuth's unique electrical, physical and chemical properties.

The protection efficiency of shields based on bismuth under 1.6-1.8 MeV electron irradiation energy was measured. The electron beam attenuation efficiency was estimated by the changing of current-voltage characteristics of semiconductor test structures which were located behind the shields and without them. It has been determined that optimal protection effectiveness and mass-dimensional parameters have bismuth shields with  $2 \text{ g/cm}^2$  reduced thickness and 156 attenuation coefficient.