

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

УДК 539.12.043

Васин  
Денис Сергеевич

Радиационные экраны на основе покрытий из W-Si композита

АВТОРЕФЕРАТ  
магистерской диссертации на соискание степени  
магистра технических наук

по специальности по специальности 1-41 80 01 Твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на  
квантовых эффектах

Научный руководитель  
кон-т. физ.-мат. наук  
ТИШКЕВИЧ Дарья Ивановна

Минск 2021

## ВВЕДЕНИЕ

Интегральные микросхемы (ИМС), предназначенные для выполнения сложных задач, имеют в своей конфигурации элементы оперативных и постоянных запоминающих устройств (ОЗУ или ПЗУ), что делает использование ОЗУ и ПЗУ практически повсеместным. Потеря данных или искажение информации, записанных в ОЗУ или ПЗУ, – причина возникновения ошибок в электронных устройствах. Выход из строя электронных компонентов ИМС может привести как к временной утрате работоспособности отдельных электрических схем, так и полному выходу из строя всего прибора в целом. Наиболее распространённой причиной являются изменения эксплуатационных свойств электронных компонентов под влиянием различных внешних факторов. Технология комплементарный металл-окисел-полупроводник (КМОП) является наиболее распространённой для ОЗУ и ПЗУ. Изменения эксплуатационных характеристик КМОП ИМС в нормальных условиях незначительно и может быть вызвана только «старением» за счёт эффектов миграции имплантированной примеси. Использование КМОП ИМС в экстремальных условиях (температура, влажность, ионизирующее излучение (ИИ) и др.) приводит к более серьезным изменениям эксплуатационных характеристик ИМС.

Вызванная электронами высокой энергии или протонами ионизация вещества, создаёт электронно-дырочные пары. Если энергия генерации новых электронов ниже энергии уже сгенерированных, то происходит лавинное образование новых электронно-дырочных пар. Генерация таких пар в диэлектрике является основной причиной образования эффектов суммарной дозы [2, 3]. Наиболее серьёзные отклонения эксплуатационных характеристик вызывает накопление заряда в области подзатворного диэлектрика, так как, большие концентрации интерфейсного заряда-ловушки могут снизить подвижность носителей и изменить величину порогового напряжения МОП-транзистора. Данные эффекты будут способствовать нежелательному уменьшению мощности транзисторов, ухудшая временные параметры ИМС [5, 4, 6, 7].

Деградация диэлектриков в ИМС ПЗУ, под действием повышенного радиационного фона, ограничивает возможности их использования во многих отраслях промышленности, что является острой проблемой для современной науки. Наиболее актуально данная задача стоит перед космическим приборостроением, которое открывает перспективы для исследования ближнего и дальнего космического пространства. В космосе наблюдается определённая зависимость частоты регистрации частицы от её энергии и в случае высокоэнергетических ионов (ВИ), от атомной массы [8]. Появление такой зависимости связано с природой образования ИИ. Как правило, в околоземном космическом пространстве не наблюдаются ВИ, атомный номер которых больше 28 [9]. Известно, что проникающая способность ВИ с ростом атомного номера уменьшается [10]. Таким образом, особо важно увеличить

стойкость приборов к воздействию ИИ, которые присутствуют в местах предполагаемой эксплуатации электронных приборов. Опасность представляют ИИ различного типа (гамма-кванты, потоки электронов и протонов, ВИ и др.) [1, 6]. Для борьбы с отказами ИМС используют различные методы защиты такие как: схемотехнические методы проектирования (защита электрических схем от превышения тока, мажоритарное резервирование и др. [7]), технологический (использование радиационно-стойких технологий и материалов [11]) и конструктивная защита (элементы конструкций устройств, специализированные корпуса с РЭ, локальная защита [12]). Схемотехнические и технологические методы приводят к увеличению сложности устройств, что в результате значительно повышает их стоимость. Таким образом, наиболее перспективными являются конструкционные методы, которые не накладывают ограничения на используемую электронную компонентную базу.

В качестве материалов радиационных экранов (РЭ), как правило, используют тяжелые материалы, например свинец. В настоящее время активно ведутся исследования альтернативных материалов для РЭ с улучшенными защитными свойствами на основе композитов и многослойных структур [14]. Изучение процессов взаимодействия ИИ с материалами РЭ и определение их ЭЗ является многоуровневой и актуальной задачей, решая которую необходимо учитывать не только процессы прохождения частиц через материал, но также генерируемое в ходе взаимодействия дополнительное ИИ. Как правило, для прогнозирования ЭЗ РЭ используют различные программные комплексы, которые позволяют уменьшить затраты на проведение экспериментальных исследований на дорогостоящих установках. В рамках данной задачи наибольшее распространение получили методы компьютерного моделирования процессов взаимодействия ионов с материалами (SRIM, GEANT4, XCOM и др.) [15, 16].

Согласно результатам моделирования [2] многослойные РЭ с чередующимися слоями различной атомной массы и плотности, позволяют увеличить поглощение ИИ, что может приводить к уменьшению накопленной дозы. Примером таких многослойных РЭ является система  $Bi/Al$ , которая может быть синтезирована электрохимическим методом на корпусах электронных приборов различной площади и формы. Композиционные материалы, такие как  $W/Cu$ , обладают более высоким значением поглощения ИИ, при этом зачастую их синтез проще, чем случай чистых материалов из тугоплавких и высокоплотных материалов, таких как  $W$ .

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Современная наука далеко продвинулась в изучении радиационных условий, ионизирующих излучений, радиационных воздействий излучения на вещество, а также на ПП и ИМС. Для обеспечения возможности эксплуатации ИМС в условиях повышенного радиационного фона и космических излучений, был разработан

ряд способов увеличения стойкости ПП и ИМС. Наиболее сложным в экранировании являются ВИ, кроме того, от плотности потока и мощности дозы ВИ излучения, зависит обратимость радиационных эффектов, а необратимые деструктивные последствия взаимодействия ВИ и компонентов ИМС, являются критичными в условиях всеобщей автоматизации оборудования. При проектировании радиоэлектронной аппаратуры, которая будет использоваться в экстремальных условиях повышенного радиоактивного фона, необходимо решить целый комплекс проблем, вызываемых отказом оборудования. И основными путями решения данной проблемы является как исключение или уменьшение воздействия различных факторов, так и уменьшение влияния излучения на полупроводниковые устройства. Отдельным классом являются способы позволяющие игнорировать отказ некоторых приборов до восстановления их функциональности. В настоящее время проблема повышения радиационной стойкости решается несколькими путями: технологический (применение специализированных технологических процессов и материалов при изготовлении бортовой аппаратуры и интегральных микросхем), конструктивный – специализированные корпуса, методы локальной защиты, схемотехнический – методы мажоритирования и др. и методика моделирования радиационных дефектов на стадии проектирования интегральных микросхем.

Как правило, ИИ ослабляют с помощью многослойных экранов, которые представляет собой структуры с чередующимися слоями тяжелых элементов с высокими порядковыми номерами и слоями легких элементов. Как правило, в качестве легких элементов предпочтительно использовать оксидные материалы (например  $Al_2O_3$ ), а в качестве слоев тяжелых элементов использовать Bi, W, Pb. Подобные экраны позволяют защитить оборудование от жесткого ионизирующего излучения различных видов. Известны также РЭ на основе композиционных материалов, состоящих из матриц легких элементов с диспергированными частицами тяжелых металлов различного вида. Таким образом, проведенное исследование является актуальным и значимым для дальнейшего развития космической техники.

**Цели и задачи исследований.** Целью магистерской диссертации является разработка и исследование радиационного экрана на основе W-Cu композита для улучшения эффективности защиты полупроводниковых приборов в условиях космической радиации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) Изучить современное состояние науки ионизирующих излучений, методы и материалы, применяемые для защиты полупроводниковых приборов от ионизирующих излучений.

2) Разработать метод получения радиационных экранов на основе композита  $W_{0,85}Cu_{0,15}$  и исследовать их.

3) Исследовать эффективность защиты от ионизирующих излучений радиационных экранов на основе композита  $W_{0,85}Cu_{0,15}$ .

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является покрытие на основе композита  $W_{0,85}Cu_{0,15}$ , полученный методом твердофазного синтеза порошкового вольфрама и меди. Предметом исследования является радиационный экран на основе покрытий композита  $W_{0,85}Cu_{0,15}$ .

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** С использованием композита  $W_{0,85}Cu_{0,15}$  удалось добиться улучшения эффективности защиты полупроводниковых приборов, от космической радиации, упростить технологию изготовления радиационных экранов, сделав её экологичной и экономически целесообразной. Таким образом работа соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь, в котором особое внимание уделяется поиску новых функциональных материалов, которые могут быть использованы при изготовлении радиационных экранов ИМС и могут обеспечить получение таких их характеристик, как: оптимальные параметры эффективности защиты, высокие показатели линейного поглощения энергии, минимизация геометрических размеров в сочетании с простотой технологии изготовления. В связи с этим полученные результаты представляют научный и практический интерес, поскольку направлены на исследование и формирование радиационных экранов для ИМС на основе покрытий композита  $W_{0,85}Cu_{0,15}$ , использование которого позволяет усовершенствовать конструкцию, а также упростить технологию изготовления ИМС для работы в условиях космоса.

**Практическая значимость полученных результатов.** Композиционные материалы на основе  $WCu$ , обладают высоким потенциалом практического применения в радиационном экранировании и для создания тугоплавких электродов. Одним из приемлемых материалов для создания радиационных экранов на основе покрытий композиционного материала, является синтезированный твердофазным методом композит  $W_{0,85}Cu_{0,15}$ . Отличительная его особенность – потенциальная возможность его синтеза без использования сверхвысоких температур или сложной механической обработки, что весьма важно при формировании РЭ.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие основные положения:

1) Композит  $W_{0,85}Cu_{0,15}$  с плотностью  $16,3 \text{ г/см}^3$ , имеющий гетерофазное строение, состоящий из объемноцентрированной кубической фазы вольфрама и гранецентрированной кубической фазы меди, выполняющей функцию матрицы растворителя, с ростом толщины которого от 0,6 до 1,5 мм, эффективность экранирования потоков электронов с энергиями  $1,6 \div 1,8 \text{ МэВ}$  увеличивается от 96 до 156 единиц, соответственно, перспективен для разработки корпусов нового поколения аппаратуры авиакосмической техники с повышенными требованиями к радиационной стойкости.

2) Композит  $W_{0,85}Cu_{0,15}$  с плотностью  $16,3 \text{ г/см}^3$ , с ростом толщины которого от 120 до 450 мкм, эффективность экранирования потоков высокоэнергетических ионов  $Ne$  с энергиями 1,00 ГэВ увеличивается от 0 до 5

единиц, соответственно, а при толщине от 50 до 185 мкм, эффективность экранирования потоков высокоэнергетических ионов Ag с энергиями 1,47 ГэВ увеличивается от 0 до 576 единиц, соответственно, что делает перспективен для разработки корпусов приборов нового поколения аппаратуры авиакосмической техники с повышенными требованиями к радиационной стойкости.

**Личный вклад соискателя.** Основные результаты, изложенные в работе, получены автором самостоятельно. Автор проводил экспериментальные исследования по изготовлению радиационного экрана на основе композита  $W_{0,85}Cu_{0,15}$ , а также исследования структурно-морфологических параметров материала. Научному руководителю в совместных работах принадлежат предметные постановки задач, выбор направлений исследования, руководства при проведении экспериментальных исследований и анализе полученных результатов.

**Апробация результатов диссертации.** Основные теоретические результаты и законченные этапы диссертационной работы, а также результаты прикладных исследований и разработок отражены множестве научных трудов.

**Публикации.** Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 20 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций, а также в 5 научном журнале (см. список опубликованных работ).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из общей характеристики работы, введения, трех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 49 наименований. Общий объем диссертации составляет 62 страницы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы по исследованию материалов, применяемых для радиационных экранов от ионизирующих излучений, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **первой главе** приведен анализ литературных данных, обзор научных статей, патентов по теме магистерской диссертации. Рассмотрена перспективность использования покрытий композиционного материала WCu при изготовлении радиационных экранов.

Во **второй главе** рассмотрены экспериментальные и расчётные методы синтеза покрытий композиционного материала на основе WCu. Описан метод изучения структуры и морфологических параметров композиционного материала на основе WCu. Описан метод оценки эффективности защиты радиационного экрана от электронного излучения и высокоэнергетических ионов с помощью экспериментальных и расчётных методов.

В **третьей главе** приведены результаты экспериментального исследования и расчётов. Представлены результаты изучения структуры и морфологических параметров композиционного материала на основе WCu.

Описаны результаты исследования эффективности защиты радиационного экрана от электронного излучения и высокоэнергетических ионов.

В **заключении** кратко изложены основные результаты магистерской диссертации, приведены основные характеристики радиационного экрана на основе покрытий композиционного материала WCu.

В **графической части** приведена краткая презентация основных результатов магистерской диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы был произведен анализ литературных источников по основным направлениям исследования диссертационной работы. Проведён литературный обзор по теме: радиационные условия на околоземных орбитах и в открытом космическом пространстве; методы защиты полупроводниковых приборов от ионизирующих излучений; материалы применимые для защиты радиоэлектронной аппаратуры от ионизирующих излучений и методы их получения. В ходе анализа информации выяснили, что космическое ИИ имеет широкий спектр энергий, а также обширный видовой состав, в который входят как без массовые частицы, такие как гамма-кванты, элементарные частицы (протоны, электроны, нейтроны) и ионы с различным  $Z$ . ИИ приводит к различного рода эффектам, многие из которых опасны для электроники. Таким образом, выяснили, что тип частицы, от которой производится защита влияет на конструкцию и материалы радиационных экранов. Рассмотрели применяемые для защиты от ИИ технологии и методы. И выяснили, что наиболее действенным решением повышения радиационной стойкости являются радиационные экраны. Рассмотрели материалы, применяемые для радиационной защиты, что позволило сделать вывод о необходимости использования в радиационной защите, как легких, так и тяжёлых элементов. Где тяжёлые элементы увеличивают эффективность поглощения первичного ИИ, а лёгкие элементы уменьшают потоки вторичного ИИ. Таким образом, исследование материалов радиационной защиты является востребованным международным научным сообществом.

Методом твердофазного синтеза получены образцы композиционного материала  $W_{0,85}Cu_{0,15}$ , обладающего необходимыми для интегрирования радиационных экранов в металлокерамические корпуса ИМС технологическими качествами, – согласование по ТКР и высокая способность к пайке неактивными флюсами.

Результаты РСА показали, что основные линии спектра композиционного материала вольфрам-медь соответствует объемноцентрированной кубической (ОЦК) фазе сплава вольфрам-медь и гранцентрированной кубической (ГЦК) фазе меди. Композиционный материал вольфрам-медь состоит из двух фаз: фазы вольфрам-медь  $W_{0,6}Cu_{0,4}$  и медной фазы Cu.

Данные энергодисперсионного РЭМ показывают, что на поверхности композиционного материала  $W_{0,85}Cu_{0,15}$  преимущественно содержится

вольфрам – 94,76 масс. % (86,20 ат. %), а также медь – 5,24 масс. % (13,80 ат. %).

Композиционный материал  $W_{0,85}Cu_{0,15}$  с плотностью 16,3 г/см<sup>3</sup>, имеет гетерофазное строение, состоит из объемноцентрированной кубической фазы вольфрама и гранецентрированной кубической фазы меди, выполняющей функцию матрицы растворителя, с ростом толщины экрана от 0,6 до 1,5 мм, эффективность экранирования потоков электронов с энергиями 1,6÷1,8 МэВ увеличивается от 96 до 156 единиц, соответственно. Помимо этого исследование показало что с ростом толщины данного экрана от 120 до 450 мкм, эффективность экранирования потоков высокоэнергетических ионов Ne с энергиями 1,00 ГэВ увеличивается от 0 до 5 единиц, а при толщине от 50 до 185 мкм, эффективность экранирования потоков высокоэнергетических ионов Ar с энергиями 1,47 ГэВ увеличивается от 0 до 576 единиц.

Методом компьютерного моделирования показано, что экраны  $W_{0,85}Cu_{0,15}$  эффективно ослабляют излучение электронов в диапазоне энергий от 0,5 до 6 МэВ ( $K_0 = 10^4-10$ ). Для протонов космического пространства (энергии от 0,04 до 500 МэВ для орбитального наклонения 60° и круговой орбиты с высотой 300 км) защитный экран обеспечивает ослабление суммарной поглощенной дозы до 6 раз. Наиболее эффективны радиационные экраны для орбит с большим вкладом электронов (ГСО, ГЛОНАСС и ВЭО). Для орбит с большим вкладом протонов (МКС и круговой полярной) экраны менее эффективны.

Разработанный материал и технология, перспективны для изготовления корпусов нового поколения электронной компонентной базы, применяемой в космической технике с повышенными требованиями к радиационной стойкости.

## Список опубликованных работ

1. Tishkevich, D.I. Function composites materials for shielding applications: Correlation between phase separation and attenuation properties / D.I. Tishkevich, S.S. Grabchikov, S.B. Lastovskii, S.V. Trukhanov, **D.S. Vasin**, T.I. Zubar, A.L. Kozlovskiy, M.V. Zdorovets, V.A. Sivakov, T.R. Muradyan, A.V. Trukhanov // Journal of Alloys and Compounds, Vol. 771, 2019
2. Tishkevich D.I., Correlation of the synthesis conditions and microstructure for Bi-based electron shields production/ Tishkevich D.I., Grabchikov S.S., Lastovskii S.B., Trukhanov S.V., Zubar T.I., **Vasin D.S.**, Trukhanov A.V.//Journal of Alloys and Compounds, Vol. 749, 2018
3. Tishkevich, D.I. Early-Stage Growth Mechanism and Synthesis Conditions-Dependent Morphology of Nanocrystalline Bi Films Electrodeposited from Perchlorate Electrolyte/ D.I. Tishkevich, S.S. Grabchikov, T.I. Zubar, **D.S. Vasin**, S.V. Trukhanov, A. Vorobjova, D. Yakimchuk, A Kozlovskiy, M Zdorovets , S Giniyatova, D Shimanovich, D Lyakhov, D Michels, M Dong, S Gudkova A.V. Trukhanov //Nanomaterials 2020, 10, 1245.



4. Tishkevich, D.I. Modeling of paths and energy losses of high-energy ions in single-layered and multilayered materials/ D I Tishkevich, S S Grabchikov, E A Grabchikova, **D S Vasin**, S B Lastovskiy, A S Yakushevich, D A Vinnik, T I Zubar, I V Kalagin, S V Mitrofanov, D V Yakimchuk A V Trukhanov//IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 848

5. Tishkevich, D.I. Effect of the Synthesis Conditions and Microstructure for Highly Effective Electron Shields Production Based on Bi Coatings/ D.I. Tishkevich, S.S. Grabchikov, S.B. Lastovskii, S.V. Trukhanov, T.I. Zubar, **D.S. Vasin**, A.V. Trukhanov, A.L. Kozlovskiy, M.V. Zdorovets //ACS Applied Energy Materials, Vol. 1, №4, 2018

Библиотека БГУИР