

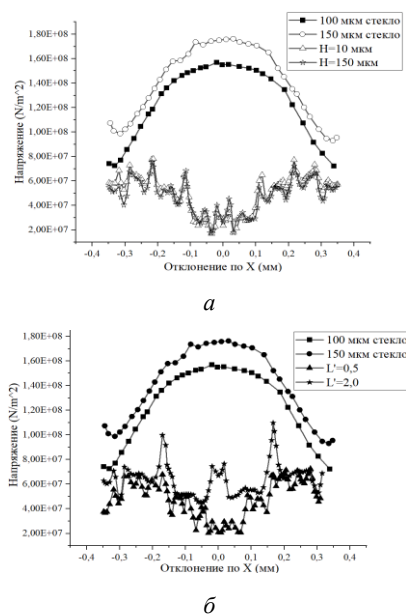


Рисунок 3 – Распределение механических напряжений в средней плоскости ЛС для плоской подложки и микроструктурированных подложек в зависимости от высоты (а), и зазора между микроштырьками (б)

Важным результатом является снижение максимальной рабочей температуры в СЛП на микроструктурированной подложке на величину до 150 °С по сравнению с плоским аналогом, что подтверждает эффективность микроструктуры для улучшения теплоотвода.

Как видно из графиков, изменение высоты микроштырьков в исследованном диапазоне (10–150 мкм) не оказывает существенного влияния на температурный профиль (рисунок 2, а). Аналогично, варьирование зазора между микроштырь-

ками также не приводит к значительным изменениям в тепловом режиме (рисунок 2, б). Это свидетельствует о том, что сам факт наличия микроструктуры, а не ее конкретные геометрические параметры в данном диапазоне, является ключевым для улучшения тепловых характеристик.

На рисунке 3 представлено распределение механических напряжений в средней плоскости ЛС (сечения 5-5 и 5'-5' на рисунке 1). В случае плоских подложек распределение механических напряжений соответствует распределению Гаусса с пиковыми значениями, которые могут превышать предел прочности стеклянного слоя и приводить к его растрескиванию. Напротив, в случае микроструктурированной подложки механические напряжения в ЛС остаются на низком уровне.

Из рисунка 3а видно, что увеличение высоты микроштырьков не влияет на уровень механических напряжений в ЛС. С другой стороны, увеличение зазора между микроштырьками приводит к росту механических напряжений в ЛС, приближаясь в пределе к плоской подложке.

Таким образом, использование микроструктурированных подложек позволяет существенно уменьшить температуру и внутренние напряжения в СЛП.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № Ф24КИТГ-010 (ГКНТ–Китай).

Литература

1. Оптимизация технологических параметров получения стекложуиноформных преобразователей / Ю.В. Трофимов [и др.] // Приборостроение-2024: материалы 17-й Межд. Науч.-техн. конф., 26–29.11.2024 г., Минск, Беларусь. – Мн.: Интегралполиграф, 2024. – С. 368–370.

УДК 681

РАСЧЕТ ПОГЛОЩАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Гриб А. А., Чижик С. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрено влияние ионизирующего излучения на полупроводниковые приборы и методы повышения их радиационной стойкости. Особое внимание уделено разработке композиционных материалов для радиационной защиты, сочетающих легкость, долговечность и высокую эффективность экранирования. С использованием программного комплекса SRIM исследован композит на основе эпоксидной смолы с добавлением вольфрама, показавший высокую эффективность поглощения ионов водорода. Полученные результаты подтверждают перспективность применения эпоксидных композитов в создании защитных систем для космической техники и других областей с повышенным радиационным фоном.

Ключевые слова: радиация, вольфрам, эпоксидная смола, композиционные материалы

CALCULATION OF THE ABSORPTION CAPACITY OF RADIATION SHIELDS TO PROTECT SEMICONDUCTOR DEVICES Gryb A.A., Chizhik S. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper considers the effect of ionizing radiation on semiconductor devices and methods for increasing their radiation resistance. Special attention is paid to the development of composite materials for radiation protection, combining lightness, durability and high shielding efficiency. Using the SRIM software package, a

composite based on epoxy resin with the addition of tungsten was studied, which showed high efficiency in absorbing hydrogen ions. The results obtained confirm the prospects of using epoxy composites in the creation of protective systems for space technology and other areas with a high radiation background.

Keywords: radiation, tungsten, epoxy resin, composite materials

Адрес для переписки: Гриб А. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mnt@bntu.by

Влияние радиации на полупроводниковые приборы представляет собой критически важную область исследований, особенно в контексте их применения в условиях повышенного радиационного фона – таких как космические аппараты, атомные электростанции или военная техника. Воздействие ионизирующего излучения может вызывать различные эффекты в полупроводниковых материалах, приводя к деградации характеристик устройств или их полному отказу. В космической отрасли особенно востребованы радиационно-стойкие, долговечные, надежные, легкие и малогабаритные электронные компоненты. Ключевой проблемой обеспечения надежности работы электронного оборудования в таких условиях остается устойчивость к ионизирующему излучению.

Для снижения воздействия радиации на полупроводниковые приборы применяются различные подходы: использование радиационно-стойких материалов, специальные конструктивные решения, технологические усовершенствования и схемотехнические методы. Радиационные экраны часто сочетают в себе несколько из этих подходов.

Разработка новых композиционных материалов позволяет преодолеть ограничения существующих радиационных экранов. С помощью компьютерного моделирования процессов облучения изучается эффективность экранирования и основные параметры материалов, что открывает путь к созданию защитных систем, отвечающих современным требованиям: легкости, экологичности, долговечности и высокому коэффициенту ослабления излучения.

Для моделирования пробега ионов в твердых телах широко используется программный комплекс SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter). Модуль TRIM (Transport of Ions in Matter) в его составе позволяет рассчитывать пространственное распределение ионов, потери энергии, повреждение структуры мишени, распыление, ионизацию и генерацию фоонов в сложных многокомпонентных средах.

SRIM поддерживает задание энергии ионов в широком диапазоне (до 2 ГэВ), моделирование многослойных мишеней (до 8 слоев) и с высокой точностью описывает ионизационные потери, энергетические спектры отдачи, траектории частиц, процессы имплантации и другие физические явления.

С использованием пакета SRIM был исследован композиционный материал на основе эпоксидной смолы с 50 %-ным содержанием частиц вольфрама.

Результаты показали, что образец толщиной 1 мм полностью останавливает ионы водорода с энергией до 9,6 МэВ (рисунок 2). Несмотря на высокую плотность вольфрама, общая плотность композита оказывается ограниченной из-

за матрицы из полимерной смолы, что влияет на степень защиты от ионизирующего излучения.

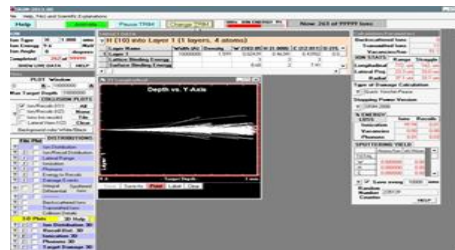


Рисунок 1 – Пробег водорода с энергией иона 9,6 МэВ в программном пакете SRIM

Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация состава композиционных материалов с целью повышения их радиационной стойкости при сохранении низкой плотности и технологичности. Введение наночастиц высоко- Z элементов, использование многослойных структур и гибридных матриц открывает возможности для создания материалов нового поколения, способных эффективно экранировать широкий спектр ионизирующих излучений.



Рисунок 2 – Глубина пролета частицы водорода от энергии иона в композитном материале

Кроме того, применение методов численного моделирования в сочетании с экспериментальными исследованиями позволяет не только прогнозировать поведение композитов в условиях радиационного облучения, но и разрабатывать материалы, адаптированные под конкретные условия эксплуатации. Такой подход существенно сокращает сроки разработки и снижает стоимость создания радиационно-стойких систем, что имеет ключевое значение для космической отрасли и других высокотехнологичных сфер.

В заключение следует отметить, что композиты на основе эпоксидной смолы демонстрируют высокий потенциал для применения в радиационной защите благодаря своей термической стабильности, радиационной стойкости и доступности. Эти свойства делают их перспективными материалами для создания эффективных и экономичных радиационных экранов.

Литература

1. Multilayer radiation shield for satellite electronic components protection / H. Daneshvar [et al.] // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Article number 20657.
2. Shape-memory polymeric artificial muscles: mechanisms, applications and challenges / Y. Chen [et al.] // Molecules. – 2020. – Vol. 25. – Art. 4246.
3. Elsaf, M. Ecofriendly and radiation shielding properties of newly developed epoxy with waste marble and WO₃

nanoparticles / M. Elsaf, N. Almousa, N. Al-Harbi // Molecules. – 2022. – Vol. 25. – Article number 5977.

4. SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter: [software] / J. F. Ziegler, J. P. Biersack, M. D. Ziegler. – 2013. – URL: <http://www.srim.org/SRIM/Tutorials/Tutorials.htm> (date of access: 12.12.2025).

5. Леонова, Н. Л. Компьютерное моделирование: курс лекций / Н. Л. Леонова. – СПб., 2015. – 88 с.

УДК 621.3.049.77

КОМПЛЕКТ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ВЫСОКОИМПЕДАНСНЫХ ДАТЧИКОВ

Дворников О. В.¹, Чеховский В. А.²

¹ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»

²«Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета
Минск, Беларусь

Аннотация. Для проектирования аналоговых интерфейсов датчиков с высоким внутренним импедансом разработан комплект микросхем, содержащий три варианта операционных усилителей (ОУ) и два варианта зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ). Конструктивными особенностями микросхем являются: формирование устройств на специализированном базовом кристалле (БК) с реализацией требуемых функций и параметров за счет применения разных комплектов фотошаблонов для изготовления межсоединений элементов БК, применение входного полевого транзистора, управляемого *p-n*-переходом, уменьшение напряжения смещения нуля и входного тока ОУ с помощью подстройки сопротивлений резисторов. Приведены результаты моделирования статических и динамических параметров ОУ и ЗЧУ, а также зависимости длительности фронта нарастания и уровня шумов ЗЧУ от емкости датчика, соединенного со входом.

Ключевые слова: операционный усилитель, зарядочувствительный усилитель, полевой транзистор, управляемый *p-n*-переходом, базовый кристалл.

SET OF ANALOG MICROCIRCUITS FOR PROCESSING SIGNAL FROM HIGH IMPEDANCE SENSORS

Dvornikov O. V.¹, Tchekhovsky V. A.²

¹JSC «MNIPI»

²Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University
Minsk, Belarus

Abstract. A set of microcircuits containing three variants of operational amplifiers (OpAmp) and two variants of charge-sensitive amplifiers (CSA) has been developed for designing analog interfaces of sensors with high internal impedance. The design features of the microcircuits are: formation of devices on a specialized master chip (MC) with implementation of the required functions and parameters due to the use of different sets of photomasks for manufacturing interconnections of MC elements, use of an input JFET, reduction of the offset voltage and input current of the OpAmp by adjusting the resistors. The results of simulation the static and dynamic parameters of the OpAmp and CSA, as well as the dependences of the duration of the rising edge and the noise level of the CSA on the capacitance of the sensor connected to the input are presented.

Keywords: operational amplifier, charge sensitive amplifier, JFET, master chip.

Адрес для переписки: Дворников О. В., ул. Я. Коласа, 73, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: oleg_dvornikov@tut.by

Введение. В различных областях приборостроения необходима регистрация токов крайне малой величины, т. е. менее 10^{-12} А, или обработка сигналов высокоомных датчиков, внутреннее сопротивление которых превышает сотни мегаом.

В том случае, когда необходимо измерение тока или заряда, генерируемого датчиком, обычно применяется ОУ с резистором R_F и конденсатором C_F в цепи отрицательной обратной связи, а для передачи напряжения от высокоимпедансного датчика к относительно низкоомным цепям – повторитель напряжения на ОУ. Для указанных задач преимущественно применяют ОУ с входными JFET, которые обладают

существенно меньшим уровнем низкочастотного шума по сравнению с MOS-транзисторами.

Однако, существует ряд датчиков, например, полупроводниковые детекторы, выходной сигнал которых представляет собой короткий токовый импульс. В этом случае к ЗЧУ, обрабатывающему такие сигналы, предъявляются жесткие требования по длительности фронта нарастания выходного сигнала и его зависимости от емкости датчика.

Традиционные ОУ для обеспечения высокого коэффициента усиления напряжения применяют несколько усилительных каскадов, а запас по фазе в широкой полосе частот получают с помощью