



На правах рукописи

Сидоров Дмитрий Владимирович

Применение радионуклидных источников α -излучения для имитации нейтронного воздействия на кремниевые биполярные транзисторы

Специальность:

05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

9 ЯНВ 2014

Москва
2013



005544486

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Пульсар».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Синкевич В.Ф.

Официальные оппоненты: Чумаков Александр Иннокентьевич
доктор технических наук, профессор
технический директор
ОАО «ЭНПО СПЭЛС»

Ужегов Вячеслав Михайлович
кандидат технических наук, старший науч-
ный сотрудник
ведущий научный сотрудник - начальник
сектора
ФГУП «ЦНИИмаш»

Ведущая организация:

ФГУП «НИИП»
г. Лыткарино, Московской области

Защита состоится «28» января 2014 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.131.02 в МГТУ МИРЭА по адресу: 119454, г. Москва, проспект Вернадского, 78.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ МИРЭА по адресу: 119454, г. Москва, проспект Вернадского, 78. Автореферат диссертации размещен на сайте МГТУ МИРЭА www.mirea.ru

Автореферат разослан «24» декабря 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к. ф.-м. н.

 А.Н. Юрасов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Биполярные транзисторы, как и другие активные элементы, на сегодняшний день определяют возможности перспективных систем радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Скорость, точность и, конечно, долговечность – все эти качества различных систем и комплексов зависят от микроэлектронной компонентной базы. Выход из строя одного элемента может привести к потере функционирования целого комплекса. Причиной неработоспособности зачастую является ионизирующее излучение. Разработчики изделий полупроводниковой электроники принимают различный комплекс мер по снижению влияния ионизирующего излучения на работу элемента, а к самим изделиям предъявляется ряд требований, которые подтверждаются испытаниями на воздействие специальных факторов.

Согласно действующим нормативным документам испытания изделия полупроводниковой электроники (ИПЭ) на воздействие специальных факторов должны проводиться на моделирующих установках (МУ), поскольку в этом случае наиболее полно воспроизводятся реальные условия радиационного воздействия. Однако обеспечить с помощью МУ требуемую оперативность испытаний изделий микроэлектроники достаточно трудно, а во многих случаях и невозможно, что снижает эффективность проведения испытаний. Кроме того у испытаний с помощью МУ есть ряд других существенных недостатков - остаточная наведенная радиоактивность после воздействия нейтронов и высокоэнергетичных протонов на испытуемых изделиях, высокая стоимость проведения испытаний, сложность измерения параметров ИПЭ в связи с необходимостью использования дистанционной метрики.

Поэтому наряду с испытаниями на МУ в последние годы применяются и внедряются в практику методик испытаний, основанные на использовании имитирующих установок – имитаторов. Имитационные испытания ИПЭ позволяют оперативно получать информацию о радиационной стойкости разрабатываемых изделий без проведения сложных и дорогостоящих испытаний на МУ.

Использование имитационных методик испытаний позволяет сократить сроки и стоимость проведения работ по созданию современных систем РЭА.

Целью работы является разработка методики проведения имитационных испытаний нейтронного воздействия на кремниевые биполярные транзисторы с помощью радионуклидных источников α -излучения.

Для достижения поставленной цели решался следующий комплекс научных, экспериментальных и организационных задач:

- выполнен обзор представленных на отечественном и мировом рынках изотопных источников α -излучения;
- проведены дозиметрические измерения радионуклидных α -источников при различных взаимных расположениях блока детектирования и α -источника;
- исследовано пространственное распределение радиационных дефектов в кремнии при его облучении α -частицами РНИ;
- исследовано влияние режимов облучения α -частицами с целью имитации нейтронного воздействия с последующей проверкой этих режимов при облучении биполярных транзисторов с различными параметрами (тип прибора, глубины залегания эмиттерной и коллекторной областей, концентрация носителей в базе);
- определены коэффициенты эквивалентности нейтронного и альфа воздействий $K_{\text{ЭКВ } n/\alpha}$ на биполярные транзисторы;
- разработан и внедрен макет нового имитатора на основе изотопного α -источника;
- исследована применимость коэффициентов эквивалентности нейтронного и альфа воздействий $K_{\text{ЭКВ } n/\alpha}$ для имитационных испытаний интегральных микросхем операционных усилителей. Показана возможность такого применения.

Исследования по теме диссертации проводились и внедрены в ОАО «НПП «Пульсар» в процессе выполнения ОКР «Цифра-4» и ОКР «Цифра-5».

Научная новизна работы

- Экспериментально показана возможность формирования при помощи радионуклидных источников α -облучения равномерных профилей радиационных дефектов в кремниевых структурах на глубинах до 8 мкм при наличии воздушного промежутка протяженностью 15 мм между источником и мишенью.
- Определены, в режиме облучения с воздушным промежутком 15 мм, значения коэффициентов эквивалентности нейтронного и альфа воздействий $K_{\text{ЭКВ } n/\alpha}$ для кремниевых биполярных транзисторов: для р-п-р типа $K_{\text{ЭКВ } n/\alpha}$ от 1900 до 3400, для п-р-п типа $K_{\text{ЭКВ } n/\alpha}$ от 2300 до 4500, в диапазоне плотностей токов от 0,2 до 700 А/см² и уровней инжекции от $6 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-1}$.
- Экспериментально показано, что по полученным зависимостям коэффициентов эквивалентности нейтронного и альфа воздействий от уровня инжекции, можно с помощью радионуклидных источников α -излучения имитировать воздействие быстрых нейтронов на кремниевые биполярные транзисторы, работающие в усилительном режиме, с концентрацией легирующей примеси

в базе от $4,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и технологической глубиной расположения базы до 8 мкм от поверхности кристалла с учетом металлизации и слоя диэлектрика.

- Показана возможность имитационных испытаний операционных усилителей, с использованием полученных для биполярных транзисторов коэффициентов эквивалентности нейтронного и альфа воздействий и методики определения уровня инжекции для структур, входящих в состав ИМС.

Практическая значимость

Практическая ценность диссертации заключается в следующем:

- Определена возможность оперативного проведения исследований стойкости ИПЭ к воздействию нейтронного излучения на всех этапах проведения НИОКР с помощью РнИ α -излучения;
- Разработана на основе радионуклидного источника α -излучения имитационная установка, позволяющая оперативно проводить имитационные испытания нейтронного воздействия на ИПЭ в диапазоне температур от минус 60°C до плюс 125°C и контролировать параметры во время испытаний, при этом на изделии отсутствует остаточная радиоактивность и минимизировано влияние электромагнитных помех.
- Проведены имитационные испытания нейтронного воздействия на биполярные аналоговые микросхемы операционных усилителей с помощью радионуклидных источников α -излучения, показавшие хорошее совпадение с результатами испытаний на установках, моделирующих воздействие нейтронов.

Основные положения, выносимые на защиту

- При неколлимированном α -облучении с помощью радионуклидного источника с толщиной слоя изотопа, меньшей пробега α -частиц в нем, и наличии воздушного промежутка протяженностью от 12 до 18 мм между поверхностью источника и мишенью в кремнии с удельным сопротивлением 10 – 30 Ом·см формируется близкий к равномерному профиль радиационных дефектов протяженностью 3 – 8 мкм.
- Максимальная протяженность профиля радиационных дефектов, близкого к равномерному с погрешностью не более 10%, обеспечивается при расположении мишени на расстоянии $(15 \pm 0,5)$ мм от поверхности радионуклидного источника.

- Используя режим α -облучения с воздушным промежутком протяженностью 15 мм между радионуклидным источником и мишенью, и облучение быстрыми нейтронами, можно экспериментально получить по изменению объемного времени жизни носителей заряда в кремниевых биполярных транзисторах р-п-р и п-р-п типов зависимости коэффициентов эквивалентности нейтронного и альфа воздействий $K_{ЭКВ\ n/\alpha}$ от уровня инжекции и типа проводимости полупроводника.
- Рассчитав рабочие токи в транзисторных структурах ИМС в программе PSpice и определив структуру, работающую при минимальном уровне инжекции, можно, из-за наличия в микросхемах операционных усилителей наиболее чувствительных к нейтронному воздействию транзисторных структур, провести испытания, имитирующие воздействие быстрых нейтронов на биполярные аналоговые микросхемы, используя значения коэффициентов эквивалентности нейтронного и альфа воздействий $K_{ЭКВ\ n/\alpha}$, полученные для кремниевых биполярных транзисторов.

Апробация работы

Результаты работы доложены и обсуждены:

- на VIII-ой научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА», Дубна, 21-23 октября 2009 г.
- на научно-технической конференции «Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ», Москва, МИЭМ, 2010 г.
- на IX-ой научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА», Звенигород, 01-03 декабря 2010 г.
- на X-ой научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА», Дубна, 12-14 октября 2011 г.
- на XI-ой Всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА», Дубна, 17-19 октября 2012 г.
- на 16-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» («Стойкость-2013»), Лыткарино, 04-05 июня 2013 г.
- на XII-ой научно-технической конференции «Твердотельная электро-

ника, сложные функциональные блоки РЭА», Москва, 24-25 октября 2013 г.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 2 работы – в рецензируемых журналах, установленных ВАК по выбранной специальности. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти основных глав, заключения и списка цитируемой литературы. Основное содержание работы изложено на 124 страницах, включая: 32 таблицы, 52 рисунка, приложение и список цитируемой литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована проблема и определена основная цель работы, обоснована научная новизна полученных результатов, практическая их значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены состояние и актуальные проблемы проведения испытаний ИПЭ на моделирующих установках нейтронного воздействия и имитаторах.

Выделены основные преимущества и недостатки МУ нейтронного воздействия.

Проанализирована изложенная в ОСТ 11. 073.13 методика имитационных испытаний воздействия специальных факторов, использующая изотопный источник α -излучения [1]. Рассмотрены требования проведения имитационных испытаний.

Проанализированы теоретические расчеты, подтверждающие возможность замены нейтронов на α -частицы.

Сформулировано основное требование, которое необходимо учитывать и включать в методику имитационных испытаний с помощью изотопных источников - распределение дефектов, образующихся при облучении α -частицами радионуклидных источников должно быть близким к равномерному. Это требование необходимо для увеличения эффективности определяемых коэффициентов эквивалентности альфа и нейтронного воздействий.

Проанализированы работы [2-9], в которых приводятся данные о пространственном распределении радиационных дефектов в кремнии при облучении α -частицами радионуклидных источников. В рассматриваемых работах нет четких сведений о профиле радиационных дефектов, который бы соответствовал равномерному профилю радиационных дефектов, образуемому при нейтронном воздействии.

Во второй главе проанализированы представленные на отечественном и мировом рынках изотопные источники α -излучения, где критериями выбора α -источника являлись: активность - для обеспечения приемлемых времен на проведение имитационных испытаний; тип изотопа - для стабильности параметров излучения источника с течением времени, площадь α -источника - для применения с учетом размера кристаллов. В результате чего сделан вывод, что наиболее подходящим для имитационных испытаний являются источники типа АИП-Н, выпускаемые в Российской Федерации во ФГУП «ПО «Маяк». Источники данно-

го типа выполнены на основе изотопа плутония, скорее всего, Pu-238 с периодом полураспада 84 года и Pu-239 с периодом полураспада 24000 лет. Габаритные размеры таких источников составляют 70мм x 35 мм, а рабочая поверхность, покрытая изотопом, - 60мм x 25мм, соответственно площадь активной поверхности – 15 см². Активность источника не превышает $3 \cdot 10^8$ Бк. Средняя энергия частиц $E_{\alpha \text{ ср}} = 5,4$ МэВ.

Проведены дозиметрические измерения интегральных потоков α -частиц источника, используемого в работе. Каждый α -источник, используемый в имитационных методиках, должен проходить дозиметрические измерения, т.к. активность изотопа в паспорте точно не указывается, а она связана с основным параметром, которым является плотность потока α -излучения Φ ($\alpha/\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$). Коэффициент эквивалентности $K_{\text{ЭКВ } n/\alpha}$ напрямую связан с потоками этих двух излучений соотношением:

$$K_{\text{ЭКВ } n/\alpha} = \frac{\Phi_n}{\Phi_\alpha} \quad (1)$$

Φ_α – интегральный поток α -частиц эквивалентный (по эффекту) интегральному потоку нейтронов Φ_n .

Величина интегрального потока α -частиц определялась с помощью измерителя скорости счета УИМ 2-2. Для этого к входу измерителя подключался блок детектирования БДЗА-01.

С целью точного определения значения плотности потока α -частиц на источнике размещался алюминиевый экран с калиброванным отверстием для определения плотности потока α -частиц Φ_α .

Интегральный поток α -частиц определялся из предположения, что поток α -частиц с источника равномерен.

Дозиметрические измерения проводились при различном расположении α -источника и блока детектирования:

- блок детектирования располагался на различных расстояниях h относительно α -источника (рис.1);
- между блоком детектирования и источником были расположены коллимационные пластины, диаметр коллиматора $d = 10$ мм, таким образом определялась плотность потока при коллимированном облучении.

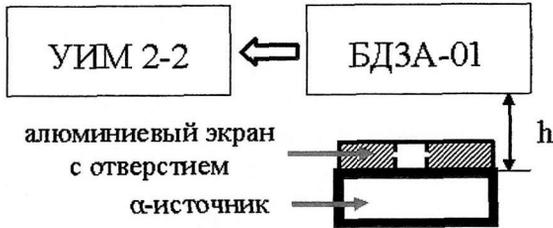


Рис.1 Блок-схема установки для проведения измерений плотности неколлимированного потока α -частиц

Помимо этого были определены плотности потоков α -частиц в случае, когда алюминиевый экран с отверстием располагался вплотную к сцинтилятору блока детектирования.

На рис. 2 представлены результаты измерений в случае, когда блок детектирования располагался на различных расстояниях h от поверхности источника и при различном расположении экрана. Видно, что полученные результаты хорошо согласуются между собой.

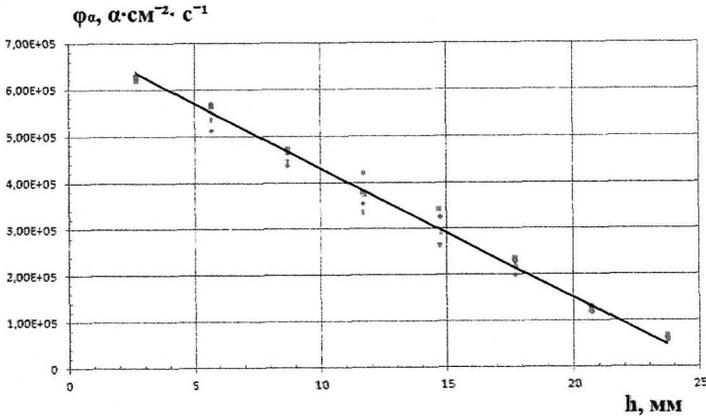


Рис. 2 Зависимость плотности потока α -частиц от расстояния до детектора

При расположении экрана на источнике в результате дозиметрических измерений можно «просканировать» поверхность α -источника и получить информацию о распределении слоя изотопа по рабочей поверхности источника.

Также было выполнено:

1. Оценка эффективной площади источника. Оценка проведена с учетом пробега α -частиц, расстояния до мишени и взаимного расположения мишени и изотопного источника. По результатам сделан вывод, что смещением мишени (до 6 мм) от центральной точки источника можно пренебречь.

2. Теоретический расчет влияния температуры и атмосферного давления на значения плотностей потоков α -частиц. При изменении указанных параметров меняется и пробег α -частиц. Расчет показал, что при изменении атмосферного давления на $\Delta p = 30$ мм. рт. ст. и температуры на $\Delta T = 5$ °С плотность потока α - частиц изменится не более чем на 9%.

3. Оценка ионизационной составляющей радионуклидных источников. Величину влияния ионизационной составляющей α -источников на ИПЭ можно оценивать при помощи γ -облучения и коэффициента эффективности γ - и α - воздействий $K_{эф \gamma/\alpha}$.

В третьей главе исследованы изменения удельного сопротивления, полученные по изменению сопротивления растекания, и концентрации основных носителей, полученные из вольт-фарадных характеристик (частоты подаваемого переменного сигнала – 2 кГц, 100 кГц и 1 МГц), по глубине в кремниевых полупроводниковых структурах, облученных α -частицами РНИ:

- при расположении облучаемого образца непосредственно на источнике излучения и на различных расстояниях от него;

- при облучении образца коллимированным потоком α -частиц через отверстие диаметром $d=10$ мм при различной длине коллиматора.

Исследование проводилось на эпитаксиальных пленках и диодных структурах.

Эпитаксиальные структуры выбраны толщиной 30 и 40 мкм, исходя из максимального пробега α -частиц в кремнии (при энергии α -частиц $E_\alpha = 4,5$ МэВ $x_{Si} = 22$ мкм), с удельными сопротивлениями: 10 Ом·см, 30 Ом·см. Образцы диодных структур выбраны p^+ - n типа на основе эпитаксиальных пленок с удельным сопротивлением $\rho = 25$ Ом·см, глубина p - n перехода составляет 3,5 мкм, базовая область составляет 70 мкм.

При непосредственном расположении мишени на α -источнике все α -частицы, вылетевшие из источника под различными углами, будут участвовать в дефектообразовании. Концентрация дефектов постепенно спадает от поверхности вглубь мишени до максимальных глубин пробега α -частиц в кремнии. При продолжительном облучении вклад дефектов, образующихся ближе к поверхности, в изменение удельного сопротивления уменьшается вследствие того, что значительная их часть уже не сможет захватывать основные носители, т.к. уровень

Ферми окажется ближе к середине запрещенной зоны, чем уровни некоторых дефектов [10 - 13]. За счет этого профиль распределения удельного сопротивления (рис.3) постепенно выравнивается по глубине исследуемого образца.

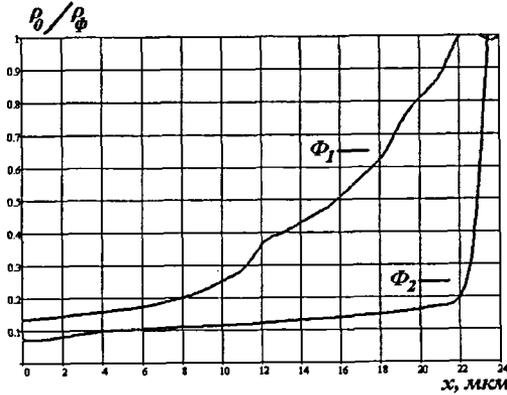


Рис. 3 Распределение относительной величины удельного сопротивления по глубине при неколлимированном облучении
 $\Phi_1 = 5,11 \cdot 10^{10} \text{ а/см}^2$, $\Phi_2 = 1,64 \cdot 10^{11} \text{ а/см}^2$

дефектообразование наблюдается преимущественно в конце пробега α -частиц в кремнии (рис.4, кривая Φ_1). С ростом интегрального потока облучения область с резким увеличением удельного сопротивления расширяется (рис.4, кривая Φ_2), что объясняется тем же эффектом (уменьшением захвата основных носителей на радиационные дефекты с приближением уровня Ферми к середине запрещенной зоны).

При наличии воздушного промежутка между изотопным источником и мишенью часть α -частиц, вылетевших из источника под ма-

Коллимированное облучение характеризуется отношением диаметра коллиматора d к его длине l . Чем оно меньше, тем выше степень коллимации пучка α -частиц. За счет коллимации и воздушного промежутка между α -источником и исследуемым образцом, равным l , α -частицы, вышедшие из источника под малыми углами к поверхности источника, не влияют на образование дефектов, т.к. просто не смогут достигнуть поверхности исследуемого образца. В связи с этим максимальное де-

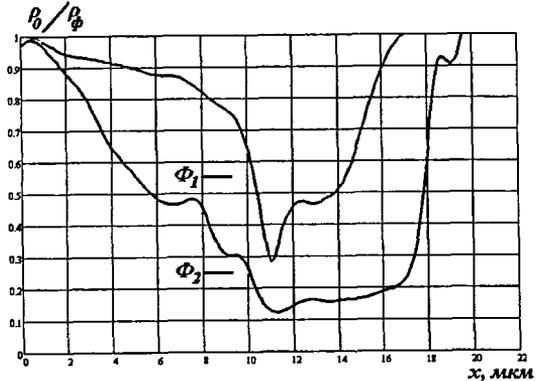


Рис. 4 Распределение относительной величины удельного сопротивления по глубине при коллимированном облучении с $l = 18 \text{ мкм}$
 $\Phi_1 = 3,14 \cdot 10^{10} \text{ а/см}^2$, $\Phi_2 = 9,36 \cdot 10^{10} \text{ а/см}^2$

лыми углами к поверхности источника, не участвует в образовании дефектов, т.к., как и в случае коллимированного облучения, эти частицы не будут достигать поверхности исследуемого образца.

Меняя расстояние до α -источника, можно снизить количество образующихся радиационных дефектов у поверхности, при этом изменение у поверхности будет гораздо больше чем в глубине мишени, т.е. при некоторой протяженности воздушного промежутка в образце может существовать область с относительной равномерностью дефектообразования (рис.5). Участок равномерности удельного сопротивления ρ , с погрешностью не более 10 % сохраняется в диапазоне интегральных потоков α -частиц от $1,3 \cdot 10^{10} \text{ а/см}^2$ до $2,51 \cdot 10^{10} \text{ а/см}^2$.

Так же в режиме с воздушным зазором и расстоянием $h=15\text{мм}$ были облучены эпитаксиальные структуры. На рис. 6 представлены пространственные распределения относительной величины концентрации легирующей примеси (фосфора) в эпитаксиальных структурах $\frac{26\text{КЭФ}10}{250\text{ЭКЭС}0,01}$ при α -облучении на расстоянии $h = 15 \text{ мм}$ интегральными потоками $\Phi_1 = 2,59 \cdot 10^{10} \text{ а/см}^2$ и $\Phi_2 = 5,18 \cdot 10^{10} \text{ а/см}^2$, полученные из C-V характеристик с барьером Шоттки на

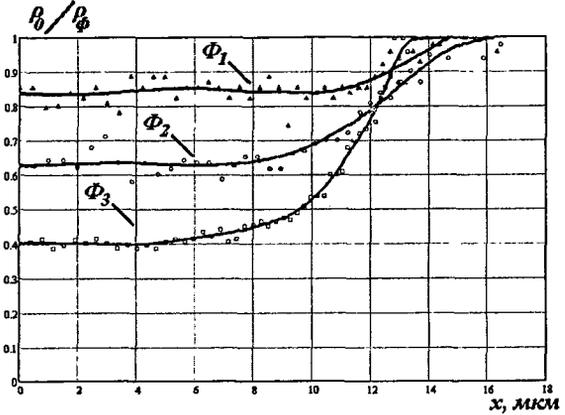


Рис. 5 Распределение относительной величины удельного сопротивления по глубине при облучении с $h = 15 \text{ мм}$ различными интегральными потоками $\Phi_1 = 1,3 \cdot 10^{10} \text{ а/см}^2$, $\Phi_2 = 1,7 \cdot 10^{10} \text{ а/см}^2$, $\Phi_3 = 2,51 \cdot 10^{10} \text{ а/см}^2$

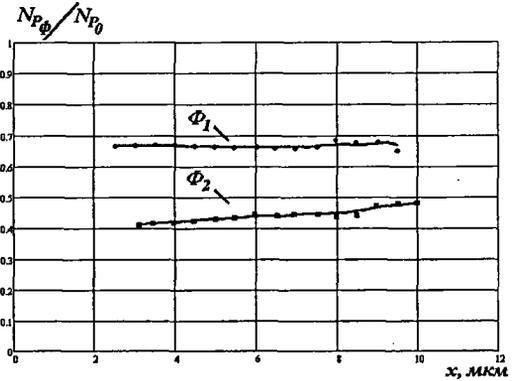


Рис. 6 Распределение относительной величины концентрации донорной примеси по глубине при облучении различными интегральными потоками $\Phi_1 = 2,59 \cdot 10^{10} \text{ а/см}^2$, $\Phi_2 = 5,18 \cdot 10^{10} \text{ а/см}^2$

высокоомном слое (частота подаваемого переменного сигнала – 1 МГц), где N_{P_0} и N_{P_f} – концентрации фосфора до и после облучения. Данные зависимости определяют уменьшение электрически активного фосфора из-за включения его в состав радиационных дефектов (Е-центров). Равномерность приведенных зависимостей по глубине образца свидетельствует о равномерности распределения радиационных дефектов, содержащих фосфор. Причем эта равномерность сохраняется и при различных интегральных потоках облучения.

Вследствие того, что равномерность дефектообразования сохраняется в структурах с меньшим удельным сопротивлением, то можно предположить, что такая же тенденция сохранится и в сильнолегированных структурах.

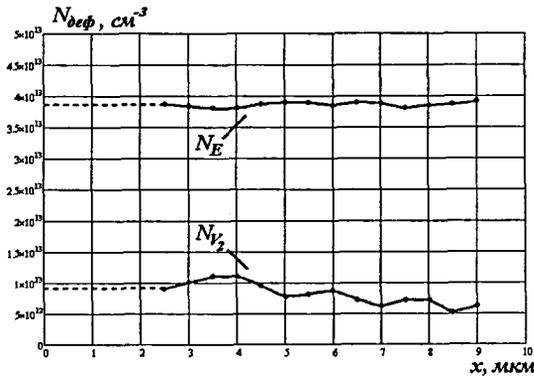


Рис. 7 Распределение радиационных дефектов по глубине в кремнии при облучении в режиме «воздушный зазор» на расстоянии 15 мм от поверхности источника интегральным потоком $\Phi = 2,51 \cdot 10^{10}$ а/см²

примеси до 10^{17} см⁻³ при α -облучении вносят Е-центры, т.к. уровень Ферми будет ниже положения энергетических уровней А-центров, а сечения захвата Е-центров больше, чем у остальных центров [14], которые могут участвовать в удалении носителей.

Эффективность рекомбинационных центров зависит от концентрации этих центров, сечения захвата носителя и от положения уровня Ферми. Исходя из того, что из всего количества различных радиационных дефектов на изменение времени жизни носителей заряда влияют только один-два из них [15]. Так же принимая во внимание сечения захвата носителей [14], можно сделать вывод, что в материале р-типа наиболее эффективными рекомбинационными центрами будут дивакансии ($E_v + 0.19$) и так как их распределение будет равномерным, то равномерным будет и распределение остальных радиационных центров в р-материале.

На рис. 7 представлены распределения концентрации Е-центров (N_E) и дивакансий (N_{V_2}) по глубине. Из рисунка видно, что существует достаточно протяженная область с равномерной концентрацией дефектов (для Е-центров до 9 мкм, для дивакансий до 8 мкм). Также можно сделать вывод, что основной вклад в изменение концентрации основных носителей в кремнии п-типа в материалах с концентрациями

В четвертой главе определены коэффициенты эквивалентности нейтронного и альфа воздействий $K_{ЭКВ\ n/\alpha}$ по экспериментальным данным деградации коэффициента передачи тока в транзисторных структурах при α -облучении с воздушным зазором протяженностью 15 мм.

Для оценки применимости варианта α -облучения, обеспечивающего распределение дефектов, близкое к равномерному, с целью имитации нейтронного воздействия проведены сравнительные эксперименты по облучению одних и тех же транзисторных структур на пластине последовательно радионуклидным источником α -излучения и источником быстрых нейтронов со средней энергией $E_n \approx 1,3$ МэВ.

Экспериментальная выборка составляла не менее десяти структур каждого типа. Структуры отличались типом проводимости базы, концентрацией основных носителей в базе прибора и различным расположением базовой области прибора от поверхности (см. таблицу 1).

Диапазон средних значений концентраций основных носителей в базе прибора составлял от $4,5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ до $6 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Эффективность дефектообразования при α и нейтронном облучении оценивалась по величине изменения объемных рекомбинационных потерь ΔR_V , которая имеет в общем случае две составляющие: ΔR_A – изменение рекомбинационных потерь в активной базе и $\Delta R_{ЭП}$ – изменение рекомбинационных потерь в эмиттерном переходе. При этом обе составляющие линейно зависят от интегрального потока облучения Φ .

Таким образом, коэффициент эффективности нейтронного и альфа воздействий $K_{ЭФ\Phi\ n/\alpha}$ для исследованных структур равен:

$$K_{ЭФ\Phi\ n/\alpha} = \frac{\Delta R_{Vn}}{\Delta \Phi_n} \bigg/ \frac{\Delta R_{V\alpha}}{\Delta \Phi_\alpha} \quad (2)$$

где: ΔR_V – изменение рекомбинационных потерь на линейном участке зависимостей $\Delta(\overline{Y_{h_{21E}}}) = f(\Phi)$,

$\Delta(\overline{Y_{h_{21E}}})$ – среднее значение изменения обратной величины коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером h_{21E} на пластине при облучении.

Коэффициент эквивалентности нейтронного и альфа воздействий $K_{ЭКВ\ n/\alpha}$ равен обратной величине коэффициента эффективности нейтронного и альфа воздействий $K_{ЭФ\Phi\ n/\alpha}$:

$$K_{ЭКВ\ n/\alpha} = \frac{1}{K_{ЭФ\Phi\ n/\alpha}} \quad (3)$$

Для всех структур получены данные об изменениях h_{21E} при альфа- и нейтронном облучениях в диапазоне токов и рассчитаны величины $K_{ЭКВ \text{ n/a}}$ для каждого типа прибора. На рис.8 приведены рассчитанные по формуле (3) зависимости $K_{ЭКВ \text{ n/a}}$ от уровня инжекции в базу транзисторов с учетом погрешности дозиметрии.

Данные по средним глубинам залегания эмиттерного (\bar{x}_e) и коллекторного (\bar{x}_k) переходов, площади эмиттерного перехода, концентрации легирующей примеси в базе, типу проводимости базовой области, а так же по обозначениям на рис.8 приведены в таблице 1.

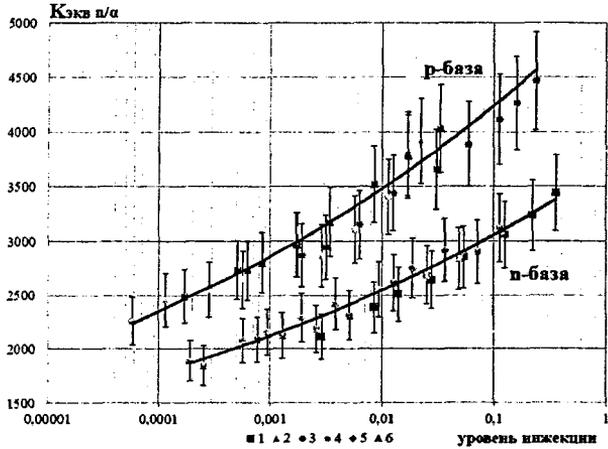


Рис. 8. Зависимость коэффициента эквивалентности $K_{ЭКВ}$ от уровня инжекции

Таблица 1

\bar{x}_e , мкм	\bar{x}_k , мкм	$S_{ЭП}$, см ²	N_6 , см ⁻³	тип базы	обозначение
0,6	0,9	$0,27 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{17}$	n	1
0,8	2	$4,41 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{17}$	n	2
1,8	2,6	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{16}$	n	3
1,25	2,6	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{16}$	p	4
2	3,5	$1,28 \cdot 10^{-4}$	10^{17}	p	5
2,5	4,0	$2,03 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{16}$	p	6

Из рисунка видно, что величины $K_{ЭКВ \text{ n/a}}$ для всех испытанных транзисторов в зависимости от типа проводимости базовой области ложатся на одну и ту же кривую. При этом величина $K_{ЭКВ \text{ n/a}}$ растет с увеличением уровня инжекции. Этот результат связан с тем, что рекомбинационные процессы при нейтронном облучении имеют более сильную инжекционную зависимость, чем при α -облучении, т.к. они определяются процессами рекомбинации на разупорядоченных областях в отличие от α -облучения, где наряду с разупорядоченными областями существенный вклад в рекомбинацию вносят точечные дефекты [16].

Таким образом, видно, что коэффициент $K_{ЭКВ\ n/\alpha}$ зависит от типа прибора (n-p-n, p-n-p), а также от уровня инжекции, при котором работает транзистор.

В связи с тем, что испытания ИПЭ проходят в диапазоне температур, то проведен ряд экспериментов по облучению транзисторных структур α -частицами радионуклидных источников при пониженных температурах. Для этого разработан макет имитационной установки.

Испытательная камера снабжена нагревателем. Перед проведением испытаний камера прогревается для уменьшения влажности воздуха, что реализуется при помощи вмонтированного вентилятора в стенку камеры. После прогрева окно с вентилятором перекрывается.

Низкая температура достигается благодаря парам азота, поступающим по медным трубкам. Трубки вмонтированы в охлаждающий столик. Подача паров азота регулируется при помощи нагревателя в сосуде Дьюара.

В пятой главе проведены исследования облучения интегральных микросхем операционных усилителей (ОУ) α -частицами с использованием определенных в настоящей работе коэффициентов эквивалентности нейтронного и альфа воздействий в целях проверки возможности использования коэффициентов для микросхем.

В связи с тем, что коэффициенты эквивалентности определены по изменению объемного времени жизни носителей заряда, то они могут быть использованы для приборов, работающих в усилительном режиме, т.к. коэффициент передачи тока биполярного транзистора h_{21E} наиболее сильно зависит от изменения времени жизни [17].

Наиболее чувствительным параметром ОУ к радиационному воздействию является: коэффициент усиления K_U (для усилителей с обратной связью по напряжению) или коэффициент преобразования $K_{ГП}$ (для усилителей с токовой обратной связью), входные токи $I_{ВХ}$ [18] ($I_{ВХ1}$ - по неинвертирующему входу, $I_{ВХ2}$ - по инвертирующему входу), поэтому они выбраны критериями возможности применения коэффициентов эквивалентного воздействия. В связи с тем, что в микросхеме несколько биполярных транзисторов, коэффициент эквивалентного воздействия определялся для каждого из них, а для проведения имитационных испытаний выбирался наименьший, что в свою очередь гарантирует качество проведенной оценки.

Расчет токов коллектора биполярных транзисторов ИМС ОУ осуществлялся при помощи программы PSpice, входящей в пакет прикладных программ OrCad. Для расчета была смоделирована электрическая схема испытываемой

ИМС ОУ с использованием библиотек биполярных транзисторов, используемых в микросхеме.

В таблице 2 приведены сведения о токах коллектора, уровнях инжекции и коэффициентах эквивалентности для транзисторов, входящих в состав исследованной ИМС. Наименьший коэффициент эквивалентного воздействия у приборов работающих при меньших уровнях инжекции.

Таблица 2

р-п-р транзисторы				п-р-п транзисторы			
обозначение	I_K , мкА	уровень инжекции	$K_{ЭКВ} \text{ п/}\alpha$	обозначение	I_K , мкА	уровень инжекции	$K_{ЭКВ} \text{ п/}\alpha$
TP05	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-1}$	3430	TN05	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$	4410
TP15	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-1}$	3480	TN15	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	4500
TP20D	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-1}$	3390	TN20D	$8,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	4330
TP30D	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-1}$	3410	TN30	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	3840
TP50	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	3260	TN30D	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	4370
				TN50	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	4110

В таблице 3 приведены исходные значения измеряемых параметров ОУ.

Таблица 3

Образец №	1	2	3	4	5	6	7	8
$K_{ПР}$, В/мА	1288	1383	1211	1250	1554	1541	1578	1615
$I_{ВХ1}$, мкА	-0,76	-2,34	-0,51	-1,41	-4,87	-4,7	-6,01	-5,99
$I_{ВХ2}$, мкА	0,33	1,65	0,3	6,48	-13,21	-14,09	-2,17	-2,32

В таблицах 4 и 5 представлены значения параметров микросхем после воздействия различных потоков нейтронов и α -частиц.

Таблица 4

нейтроны	$\Phi_n = 7 \cdot 10^{12} \text{ п/см}^2$				$\Phi_n = 3 \cdot 10^{13} \text{ п/см}^2$			
Образец №	1	2	3	4	1	2	3	4
$K_{ПР}$, В/мА	1056	1110	1015	1035	651	690	660	663
$I_{ВХ1}$, мкА	0,57	-1,05	0,9	-0,3	4,96	3,08	5,33	3,39
$I_{ВХ2}$, мкА	-3,62	-1,69	-3,39	2,98	-16,03	-12,47	-15,61	-8,29

Таблица 5

α -частицы	$\Phi_\alpha = 2,14 \cdot 10^9 \text{ а/см}^2$				$\Phi_\alpha = 9,18 \cdot 10^9 \text{ а/см}^2$			
Образец №	5	6	7	8	5	6	7	8
$K_{ПР}$, В/мА	1189	1171	1207	1243	676	650	712	707
$I_{ВХ1}$, мкА	-2,28	-2,09	-3,74	-3,42	1,4	1,76	-0,93	-0,69
$I_{ВХ2}$, мкА	-17,9	-18,36	-6,11	-6,08	-28,97	-29,7	-14,88	-15,49

На рисунке 10 представлены зависимости средних значений относительных изменений коэффициента преобразования $K_{\text{пр}}$ от флюенса излучения, а также границы соответствующих среднеквадратичных отклонений. В первой точке изменение коэффициента преобразования при α - и нейтронном воздействиях составляют 18% и 23%, соответственно, во второй – 48% и 56%, соответственно. На рис. 11 представлена зависимость изменения обратной величины коэффициента преобразования от интегрального потока α -частиц, линейность представленной на рисунке зависимости указывает на, преимущественно, объемные изменения в ИМС.

На рис.12 и рис.13 представлены аналогичные зависимости модуля изменения входных токов от флюенса излучения.

Используя значение коэффициента эквивалентности α - и γ - воздействия, была проведена оценка влияния ионизационной составляющей на ОУ.

За время облучения α -частицами t_{α} равное $3,06 \cdot 10^4$ с, поглощенная доза $D_{\text{погл}}$ составляет 33,4 кРад (H_2O). Исходя из полученного значения дозы исследуемы образцы ОУ были облучены γ -квантами на установке ГОИС-5. В таблице 6 представлены значения коэффициента преобразования $K_{\text{пр}}$ и входных токов $I_{\text{вх1}}$, $I_{\text{вх2}}$ ОУ до и после воздействия γ -квантов.

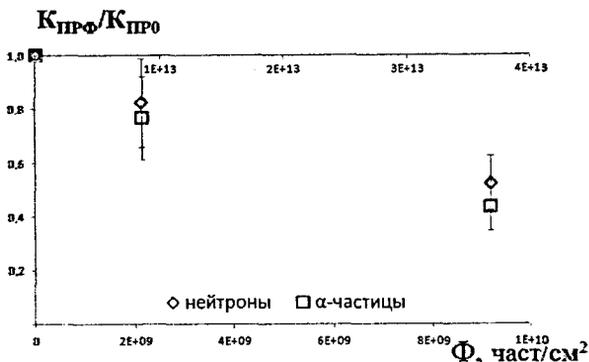


Рис.10 Зависимость относительной величины изменения коэффициента преобразования от интегрального потока α -частиц

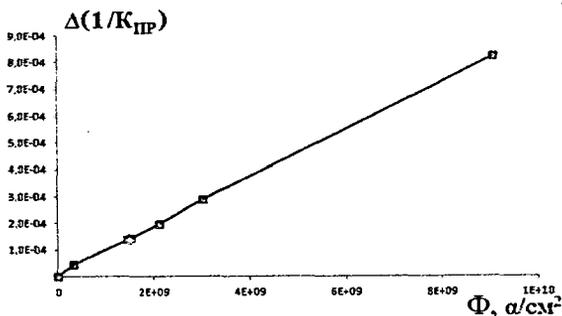


Рис.11 Зависимость изменения обратной величины коэффициента преобразования от интегрального потока α -частиц

Таблица 6

γ-кванты	исходные				$D_{\text{ПОГЛ}} = 33,4 \text{ кРад (H}_2\text{O)}$			
	Образец №	9	10	11	12	9	10	11
$K_{\text{ПР}}, \text{ В/мА}$	1288	1094	1044	1028	1252	1050	990	998
$+I_{\text{ВХ}}, \text{ мкА}$	-2,65	-1,73	-1,34	-1,13	-2,32	-1,37	-0,62	-1,19
$-I_{\text{ВХ}}, \text{ мкА}$	1,08	-0,95	-1,24	-1,09	1,12	-0,72	0,2	-0,6

Рис.12 Зависимость изменения $|\Delta I_{\text{ВХ1}}|$ от флюенса излученияРис.13 Зависимость изменения $|\Delta I_{\text{ВХ2}}|$ от флюенса излучения

Соответственно вкладом ионизационной составляющей на фоне общих изменений параметров ОУ можно пренебречь.

Также полученные коэффициенты эквивалентности использовались для оценки радиационной стойкости микросхем, разработанных в рамках ОКР «Цифра-4» и «Цифра-5» в ОАО «НПП «Пульсар».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Экспериментально доказана возможность применения радионуклидных источников α -излучения для имитации нейтронного воздействия на кремниевые биполярные транзисторы.
2. Показана возможность применения радионуклидных источников α -излучения для имитации нейтронного воздействия на кремниевые интегральные микросхемы, выполненные по биполярной технологии.
3. При использовании коэффициента эквивалентности $K_{ЭКВ \ n/\alpha}$ для биполярных транзисторов с глубиной залегания базы до 8 мкм от поверхности кристалла с учетом металлизации и слоя диэлектрика необходимо учитывать уровень инжекции и тип материала базовой области.
4. При проведении дозиметрических измерений радионуклидных источников α -излучения целесообразно ограничивать потоки α -частиц, располагая экран с отверстием непосредственно на детекторе. Таким образом будет происходить усреднение потока α -части со всей эффективной площади источника.
5. Изменение климатических условий не вносит искажений на величины измеряемых плотностей потоков α -частиц, а наибольшую погрешность при проведении дозиметрических измерений дает блок детектирования (20%), что должно учитываться в имитационных методиках.
6. Наиболее приемлемым режимом облучения, обеспечивающим равномерное распределение радиационных дефектов с погрешность $\leq 10 \%$, является режим, при котором мишень располагается на расстоянии 15 мм от поверхности α -источника.
7. Разработана имитирующая установка на основе радионуклидных источников α -излучения, работающая в диапазоне температур от минус 60°C до плюс 125 °C и позволяющая оперативно проводить испытаний полупроводниковых приборов с контролем параметров во время испытаний.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Аврасин Э.Т., Вологдин Э.Н., Гантман И.Я., Сидоров Д.В., Смирнов Д.С. Экспериментальные исследования использования радионуклидных источников альфа-излучения в полупроводниковой технологии и при имитационных испытаниях изделий полупроводниковой электроники на стойкость к воздействию специальных факторов. // *Материалы VIII научно-техн. конф. молодых специалистов. Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА.* – Дубна. – 2009. – С. 101 – 102.

2. Аврасин Э.Т., Вологдин Э.Н., Гантман И.Я., Сидоров Д.В., Смирнов Д.С. Исследование пространственного распределения концентрации основных носителей в кремнии, облученном α -частицами радионуклидных источников. // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы.* – 2010. – Вып. 1. – С. 58 – 63.

3. Сидоров Д.В. Экспериментальные исследования использования радионуклидных источников альфа-излучения в полупроводниковой технологии и при имитационных испытаниях изделий полупроводниковой электроники на стойкость к воздействию специальных факторов. // *Тез. докл. научно-техн. конф. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ.* – Москва. – 2010. – С. 302.

4. Вологдин Э.Н., Гантман И.Я., Сидоров Д.В. Исследование изменения электрофизических параметров кремния при его облучении α -частицами радионуклидных источников. // *Материалы. IX научно-техн. конф. Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА.* – Звенигород. – 2010. – С. 169.

5. Вологдин Э.Н., Гантман И.Я., Сидоров Д.В. Исследование изменения электрофизических параметров кремния при его последовательном облучении альфа-частицами радионуклидных источников и бета-частицами радионуклидных источников при повышенных температурах. // *Материалы X научно-техн. конф. молодых специалистов. Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА.* – Дубна. – 2011. – С. 156 – 159.

6. Вологдин Э.Н., Гантман И.Я., Сидоров Д.В. Разработка требований к методике имитации воздействия нейтронного излучения на изделия полупроводниковой электроники с помощью альфа-частиц радионуклидных источников. // *Материалы XI Всероссийской научно-техн. конф. Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА.* – Дубна. – 2012. – С. 164 – 165.

7. Вологдин Э.Н., Гантман И.Я., Сидоров Д.В. Анализ режимов облучения кремниевых полупроводниковых приборов альфа-частицами радионуклидных источников с целью создания методики имитации воздействия нейтронного излуче-

ния. // Материалы XI Всероссийской научно-техн. конф. Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. – Дубна.– 2012. – С. 166 – 170.

8. Вологдин Э.Н., Гантман И.Я., Сидоров Д.В. Анализ пространственного распределения радиационных дефектов при облучении кремния альфа-частицами радионуклидных источников. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2013. – Вып. 1. – С. 52 – 59.

9. Вологдин Э.Н., Сидоров Д.В. Анализ применимости методики имитации воздействия нейтронного излучения на изделия полупроводниковой электроники с помощью радионуклидных источников α -излучения. // Тез. докл. 16 Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем «Стойкость-2013». – Лыткарино. – 2013. – С. 85 – 86.

10. Вологдин Э.Н., Сидоров Д.В., Синкевич В.Ф. Применение радионуклидных источников α -излучения для имитации нейтронного воздействия на интегральные микросхемы операционных усилителей. // Материалы XII научно-техн. конф. Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. – Москва.– 2013. – С. 247 – 252.

Цитируемая литература

1. ОСТ 11.073.013-2008 ч.10.
2. Коломенская Т.И., Кумахов М.А., Булгаков Ю.В. – ФТП, 1968, т.2, в.8 с. 1206 – 1207.
3. Губская В.И., Звягин В.И., Кучинский П.В., Ломако В.М. – ФТП, 1979, т.13, в.1, с. 171 – 173.
4. Губская В.И., Кучинский П.В., Ломако В. М., Петрунин А.П. – ФТП, 1981, т.15, в.2, с. 421 – 422.
5. Берман Л.С., Ременюк А.Д., Шуман В.Б. – ФТП, 1981, т.15, в.6, с. 1155 – 1158.
6. Берман Л.С., Маляренко А.М., Ременюк А.Л., Суханов В.Л., Толстобров М.Г. // ФТП. 1988. Т.22. В.5. с. 844 – 848.
7. Берман Л.С., Иванов А.М., Строкан Н.Б. // Письма в ЖТФ. 1993. Т.19. В.20. с. 24 – 28.
8. А.М. Иванов, Н.Б. Строкан, В.Б. Шуман. Письма ЖТФ, 23, 79 (1997).
9. Иванов А.М., Строкан Н.Б., Шуман В.Б. Свойства $p^+ - n -$ структур с заглубленным слоем радиационных дефектов // ФТП. – 1998. – т. 32, №3. – с.359 – 365.
10. В.С. Вавилов, Н.А. Ухин. Радиационные дефекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. Москва: Атомиздат, 1969.
11. В.С. Вавилов. Действие излучений на полупроводники. – Москва: Физматгиз, 1963.

12. Е.А. Ладыгин. Радиационная технология твердотельных электронных приборов. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1976.
13. Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов: – Москва, 1998.
14. В.А. Козлов, В.В. Козловский. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α -частицами. Обзор. // ФТП. -2001, -т.35. вып.7. – с. 769 - 795.
15. К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. – Москва: Бином, 2012.
16. Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов: – Москва, 1998.
17. Г.Г. Райкунов, Н.А. Анфимов, Н.Г. Паничкин и др. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2013
18. Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев, В.А. Вавилов. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. - Минск: Наука и техника, 1986. – 256 с.

Сидоров Дмитрий Владимирович

Применение радионуклидных источников α -излучения для имитации нейтронного
воздействия на кремниевые биполярные транзисторы

Автореферат

Заказ № 38. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ОАО «НПП «Пульсар»

105187, Москва, Окружной проезд, 27

Подписано к печати 13 декабря 2013 г.