

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

Белякова Александра Владимировича

на диссертационную работу

Венедиктова Максима Михайловича

«Методы контроля параметров полевых транзисторов, подвергающихся нейтронному воздействию», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Разработчики радиационностойкой аппаратуры нуждаются в методах контроля и обработки информации о характере поведения электронных компонентов до, в момент и после нейтронного воздействия. Такие методы контроля и обработки экспериментальных данных позволяют обоснованно реализовывать при проектировании аппаратуры программные и схемотехнические решения с целью повышения радиационной стойкости, ограничивающие ток или отключающие питание проблемных полупроводниковых приборов и ИС на время действия различных видов радиации т.е. решения, позволяющие повысить уровень стойкости радиотехнической аппаратуры в целом.

Кроме того, у интегральных схем при уменьшении топологических норм изготовления от субмикронных (0,35 мкм) к нанометровым (60 нм и менее) наблюдается увеличение интенсивности сбоев от нейтронного облучения, а также при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ). Причём, при малых энергиях ТЗЧ экспериментальная регистрация сбоев является серьёзной проблемой, так что затруднено определение сечения сбоя и минимального потока частиц, вызывающего сбой. Следовательно, очевидна необходимость контроля вероятности сбоев интегральных схем на основе анализа величины критического заряда электронов и дырок, возникающих при воздействии ТЗЧ и нейтронов в активной области полевых транзисторов.

Целью диссертации является разработка и практическое применение новых методов контроля физических процессов в полевых СВЧ транзисторах Шоттки, подвергающихся стационарному и импульсному нейтронному воздействию, с учётом процессов ионизации полупроводниковой структуры.

Таким образом, актуальность данной диссертационной работы не вызывает сомнений.

### **Анализ содержания диссертации**

Диссертация изложена на 135 страницах, включая 38 рисунков, 17 таблиц и список цитируемой литературы из 120 наименований. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения.

**Во введении** показаны актуальность и разработанность темы, цели и задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов. **В первой главе** говорится о существующей необходимости в прогнозировании поведения полевых транзисторов после облучения и необходимости разработки метода контроля параметров при нестандартном поведении транзисторов после нейтронного воздействия, позволяющего проводить отбраковку потенциально ненадёжных образцов. Также показано, что традиционный контроль коэффициента шума до и после импульсного гамма-нейтронного облучения не позволяет определять уровень бессбойной работы транзисторов в момент облучения. В связи с этим необходима разработка расчётно-экспериментального метода контроля коэффициента шума в момент воздействия радиации. Обсуждается проблема обработки результатов исследований с использованием функции Вейбулла и критериев, определяющих вероятность сбоя на основе. В связи с тем, что точная аппроксимация закона распределения функцией Вейбулла невозможна по причине недостатка информации о минимальном сечении сбоев ИС для малых значений энергии частиц, такие способы не дают гарантированного определения уровня бессбойной работы. Следовательно, необходимо использовать комбинацию из наиболее часто применяемых критериев с целью повышения достоверности определения уровня бессбойной работы. Кроме того, рассмотрены аналитические и численные

физико-топологические модели полевых транзисторов, а также методы моделирования процессов транспорта электронов в канале полевых транзисторов и определения их статических и ВЧ параметров с учетом радиационного воздействия. **Во второй главе** описаны, впервые выявленные изменения коэффициентов усиления и шума после нейтронного воздействия в сторону улучшения исходных значений, т.е. увеличения коэффициента усиления и снижения коэффициента шума транзисторов. Теоретически и экспериментально показано, что отклонение конструктивных параметров полевых транзисторов (толщины и уровня легирования канала, а также длины затвора) от оптимума до облучения может приводить к повышению коэффициента усиления и снижению коэффициента шума после нейтронного облучения, за счет изменения концентрации активных доноров в канале до оптимального значения. Предложен расчетно-экспериментальный метод контроля, позволяющий провести расчет параметров транзисторов как до, так и после радиационного облучения на основе комплекса из численной и аналитической физико-топологических моделей. **В третьей главе** предложен оригинальный подход к проведению физико-топологического моделирования транспорта электронов в полупроводниковых структурах полевых транзисторов в момент нейтронного облучения, который основан на калибровке результатов расчетов по экспериментальным значениям коэффициента шума до и после облучения, а также результатам измерения коэффициента усиления до, в момент и после импульсного ( $\sim 1$  мс) нейтронного воздействия. Применение этого подхода позволяет контролировать физические процессы транспорта электронов в полупроводниковой структуре, приводящие к изменению коэффициента шума в момент нейтронного воздействия и дает возможность проводить оптимизацию параметров транзисторов с учетом указанных процессов. **В четвёртой главе** говорится о том, что в некоторых конструкциях современных ИС критический заряд электронов и дырок, собираемых при ионизации полупроводника в момент формирования кластера радиационных дефектов, может существенно уменьшаться. Поэтому возможно возникновение одиночных сбоев при нейтронном облучении в области малых

линейных потерь энергии атомов отдачи (1-14 МэВ), чего ранее, для ИС, изготовленных по технологии с топологическими нормами более 0.5 мкм не наблюдалось. На основе физико-топологического моделирования предложен обобщенный подход к анализу нестационарных зависимостей токов стока и затвора транзисторов и определению критического заряда, генерируемого в полевых транзисторах, облучаемых ТЗЧ и нейтронами, который позволяет оценить сечение сбоев ИС при уменьшении топологических норм изготовления. **В заключении** изложены основные научные и практические результаты работы. **В приложении** приведён акт внедрения результатов работы.

#### **Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат адекватно и полно отражает содержание диссертации.

**Научная новизна работы** состоит в том, что в диссертации с использованием комплекса из аналитической и численной физико-топологических моделей впервые разработаны расчетно-экспериментальные методы контроля параметров полевых СВЧ транзисторов Шоттки до и после нейтронного воздействия, контроля коэффициента шума полевых СВЧ транзисторов Шоттки в момент нейтронного воздействия, контроля сечения сбоев интегральных схем при стационарном нейтронном воздействии в области малых значений энергий частиц.

**Практическая значимость** состоит в том, что достигнут технический эффект, заключающийся в определении: 1) особенностей поведения полевых СВЧ транзисторов в момент и после нейтронного облучения; 2) статистических характеристик распределения параметров облученных изделий в партии. Предложен подход к разбраковке партии транзисторов и интегральных схем по уровню радиационной стойкости на основе экспериментальных данных статистически значимой выборки образцов.

**Обоснованность и достоверность результатов работы** доказываются применением современных методов теоретического анализа и вычислительных методик моделирования физических процессов в полупроводниковых приборах;

апробацией предложенных подходов и методов на международных, всероссийских и региональных конференциях.

### **Практическое использование результатов работы**

Согласно приведённому акту внедрения результатов диссертации, предложенные в работе методы контроля были успешно использованы при выполнении опытно – конструкторских работ в филиале РФЯЦ ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седякина».

### **Публикации результатов**

По теме диссертации опубликовано 14 работ, из них 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК. Получено 2 патента на изобретения.

### **Замечания к работе**

1. Реализация разработанных методов контроля предполагает итерационное численное моделирование (блок-схемы на рисунках 1.8, 2.1, 3.2, 4.1). Решается задача многомерной оптимизации. Неясно, какие методы здесь применялись, например, покоординатный или градиентный спуск, может быть что-то иное? Каким образом гарантируется "попадание" в абсолютный (не локальный экстремум)? Если при варьировании параметров применялись методы Монте-Карло, то какое количество итераций использовалось? Имеет ли смысл здесь говорить о влиянии периода (полупериода) генератора псевдослучайных чисел?

2. Когда речь заходит об облучении, как о способе улучшения (подгонки) характеристик, то насколько воспроизводимыми и стабильными являются эти эффекты? Непонятно, можно ли говорить о потенциальном промышленном использовании этого эффекта.

3. Проблему измерения коэффициента шума во время излучения в диссертации предлагается решать при помощи "прогнозной калибровки", однако, неясно из каких соображений делается предположение, что сама форма зависимости коэффициента шума от коэффициента усиления сохраняется во время излучения.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки рассматриваемой диссертационной работы.

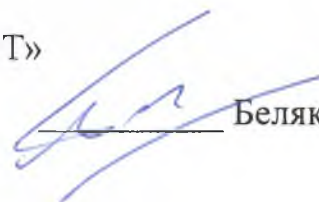
## Заключение

Диссертация «Методы контроля параметров полевых транзисторов, подвергающихся нейтронному воздействию» Венедиктова Максима Михайловича является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития приборостроения в космической, атомной и оборонной отраслях страны и отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842.

Диссертационная работа «Методы контроля параметров полевых транзисторов, подвергающихся нейтронному воздействию», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует паспорту специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», а её автор, Венедиктов Максим Михайлович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Ведущий инженер-программист ООО «МФИ СОФТ»

кандидат физико-математических наук

  
\_\_\_\_\_ Беляков А.В.

Телефон: +7(831) 246-32-75

Адрес электронной почты: abelyako@gmail.com

Адрес: 603086, Нижний Новгород, Портовый пер., д.8, кв.7

Подпись (ФИО) заверяю

  
  
СПЕЦИАЛИСТ ПО КАДРОВОМУ  
АДМИНИСТРИРОВАНИЮ И  
МОТИВАЦИИ