

СЕКЦИЯ 3

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3.049.78

DOI 10.53403/9785951505033_82

А.А. Соловьев, С.А. Курдюков

**СОВРЕМЕННЫЙ МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СРЕДЕ COVENTOR MP***Закрытое акционерное общество «СКАН», Россия, г. Москва*

В статье представлен современный метод разработки микроэлектромеханических систем (МЭМС), реализованный с помощью продуктов Coventor в интеграции с MathWorks и Cadence, позволяющий моделировать МЭМС-устройства и схемы в единой среде в одном маршруте проектирования от этапа концепции и разработки геометрической конструкции до оптимизации выхода годных изделий и создания конечного продукта.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы; МЭМС; Coventor; маршрут проектирования; MathWorks; Cadence.

A.A. Soloviev, S.A. Kurdyukov

**STATE OF THE INDUSTRY DESIGN FLOW FOR MICROELECTROMECHANICAL
SYSTEMS IN COVENTOR MP ENVIRONMENT***Closed Joint Stock Company "SCAN", Russia, Moscow*

The article presents a modern method for the development of microelectromechanical systems (MEMS) implemented using Coventor products in integration with MathWorks and Cadence, allowing the simulation of MEMS devices and circuits in a single environment in a single design flow from the concept and development of the geometric design to optimizing the yield of products and creating the final product.

Keywords: microelectromechanical systems; MEMS; Coventor; design flow; MathWorks; Cadence.

Проектирование МЭМС является актуальной задачей в современной электронике связанной с ростом потребности их применения в устройствах специального и потребительского назначения. В отличие от разработки мобильных и бытовых устройств, Разработка МЭМС связано с рядом специфических проблем, такими как связь между технологией изготовления и процессом проектирования, сложность конструкции, сочетание в МЭМС-устройстве различных физических эффектов, интеграция с системами и схемами и особые требования к корпусированию [1].

Инструменты проектирования общего назначения значительно ограничивают исследование конструкции и не позволяют оптимально решать проблемы разработки МЭМС, что приводит к срыв сроков реализации проекта и задержку выхода изделия на рынок.

После завершения проектирования, для управления и определения выходных данных МЭМС-устройство необходимо интегрировать с микросхемой (ИС), для разработки которой необходима базовая МЭМС-модель сокращенного порядка, в связи с невозможность включения конечно-элементной (КЭ) модели в симулятор схем. Для этого разработчики вручную создают упрощенные МЭМС-модели на языке Verilog-A, что требует специальных знаний и длительного времени, при этом упускаются важные аспекты поведения МЭМС-устройств, такие как механические моды и нелинейные эффекты.

Таким образом, для традиционного маршрута проектирования МЭМС от концепции до создания готового устройства на каждом этапе необходимы разные модели и множество трудоемких и отнимающих большое количество времени различных итераций. Например, на этапе проектирования схемы и системы управления часто приходится возвращаться к доработке геометрической конструкции устройства. А для оптимизации выхода годных изделий и анализа взаимодействия с корпусом необходимо вернуться к полной модели, чтобы учесть все ее нелинейные эффекты и провести точное тестирование.

Единый маршрут проектирования МЭМС в CoventorMP

Специализированная платформа для разработки МЭМС CoventorMP использует современный рабочий процесс для проектирования, оптимизации и интегрирования МЭМС-устройств, позволяющий разрабатывать МЭМС от топологии до схем и систем, и анализировать эффекты из различных областей физики (механика, электростатика, жидкостное демпфирование и т. д.).

Платформа представляет единую среду для моделирования МЭМС-устройств, систем и схем в одном маршруте проектирования от моделирования сложных многодоменных мультифизических свойств устройства и связанной с ним электроникой до моделирования на системном уровне, анализа корпуса и повышения производительности изготовления с использованием программных инструментов MEMS+ и CoventorWare, включенных в CoventorMP, системой математического моделирования MATLAB Simulink (MathWorks) и средой разработки аналоговых интегральных схем Virtuoso (Cadence Design Systems) (рис. 1).

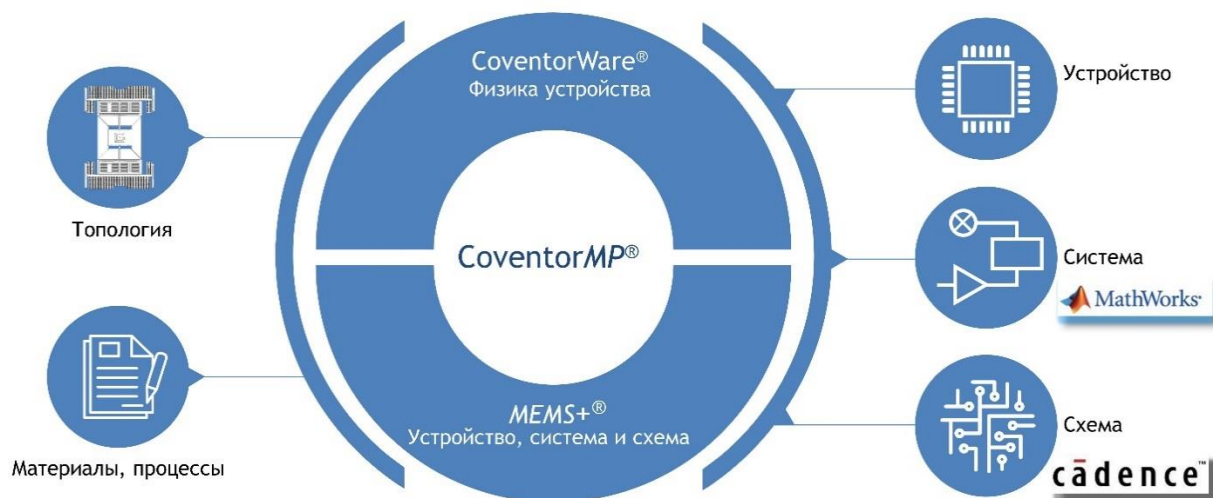


Рис. 1. Платформа автоматизированного проектирования МЭМС-устройств CoventorMP

Главной инновационной идеей данного метода разработки МЭМС является создание общей модели из 3D-параметрических компонентов заданной формы с адаптированной сеткой для исследования схемы управления вместе с МЭМС-устройством, единой для всех этапов проектирования, позволяя передвигаться между этапами в обе стороны (см. рис. 2). Данный подход позволяет исключить ручное создание МЭМС-моделей сокращенного порядка (ROM) и отдельных моделей для каждого этапа проектирования, сокращая срок реализации проекта.



Рис. 2. Маршрут проектирования МЭМС в среде CoventorMP на основе единой модели для всех этапов

Прогнозирование производительности МЭМС на основе единого моделирования имеет огромное значение для жизненного цикла продукта. Быстрые и параллельные исследования на уровне устройств позволяют одновременно оптимизировать схемы управления и исследовать влияния изменений геометрии конструкции, технологических процессов и/или материалов на производительность, выход годных изделий без дорогостоящих и трудоемких итераций сборки и тестирования.

Используемые модели – это не только графическое представление проекта, но и его имитация, позволяющая им быть визуально наглядными и простыми для понимания. Данная методология учитывает трехмерные электростатические колебания, связанную электромеханику с эффектами контакта, изгиба и газового демпфирования, определяет смещение при нулевом ускорении из-за тепловой деформации корпуса, моделирует вибрации и ударные нагрузки, решая такие проблемы проектирования, как соединение между корпусом и устройством, контактные силы на ограничителях перегрузки и другие статические и переходные эффекты, позволяя создавать устройства, отвечающие критериям эффективности.

Создание геометрической конструкции МЭМС-устройства

Реализация проекта начинается с создания конструкции МЭМС-устройства.

Инструмент MEMS+

С помощью специализированного программного продукта MEMS+ компании Coventor, предназначенного для проектирования МЭМС из стандартных блоков библиотеки элементов заданной формы с адаптированным под геометрию МЭМС (углы боковых стенок, многослойность, перфорации, гребенчатые структуры) разбиением сетки (рис. 3), обеспечивается простота разработки конструкции устройств и скорость моделирования. Получаемая параметрическая модель позволяет повысить скорость автоматизированного анализа конструкции по сравнению с традиционным методом конечных элементов (МКЭ), а также оптимизировать конструкцию в процессе проектирования.

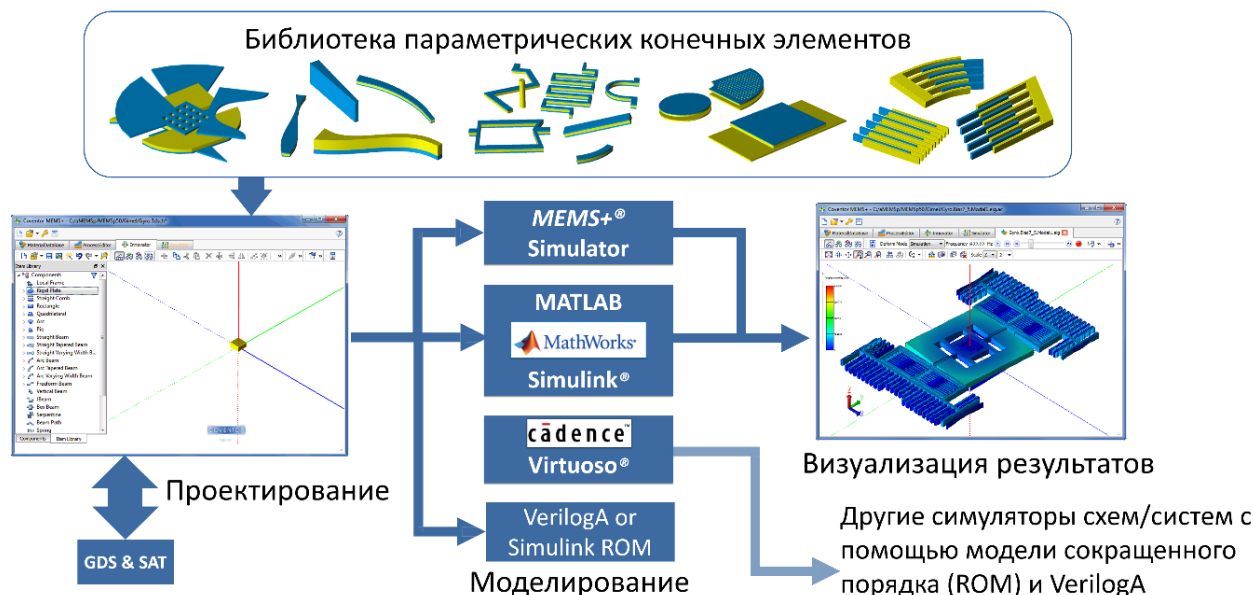


Рис. 3. Проектирование на основе библиотеки Coventor MEMS+

При анализе модели учитываются различные физические эффекты, используемые в МЭМС-системах, в том числе из таких областей, как механика, электростатика, демпфирование, пьезофизика. Система позволяет выполнять моделирование переходных процессов, а также температурных режимов с учетом термомеханических эффектов. Возможно также проведение исследований влияния деформации корпуса и подложки на

характеристики МЭМС-устройств. После завершения имитационного моделирования доступна визуализация результата в 2D- или 3D-формате, которая дает возможность увидеть конструкцию в движении.

Инструмент CoventorWare

Но маршрут проектирования не исключает использование и обычного анализа МКЭ. Для точной настройки и верификации конструкции MEMS+, используется специализированный инструмент МКЭ – CoventorWare (Designer & Analyzer) (рис. 4), включающий в себя гибридные решатели метода конечных / граничных элементов (МКЭ / МГЭ), а также набор алгоритмов построения сетки для генерации шестнадцатеричных ячеек, которые являются оптимальными для МЭМС-структур и обеспечивают более точный анализ в областях с высоким напряжением и для геометрий с высоким соотношением сторон, типичных для МЭМС. Решатели работают как в линейном, так и в нелинейном режиме, с поддержкой нескольких процессоров через графических интерфейс или скрипт.

GDS топология и описание процесса
или импорт из MEMS+

Создание сетки 3D-модели

Моделирование

Визуализация результатов

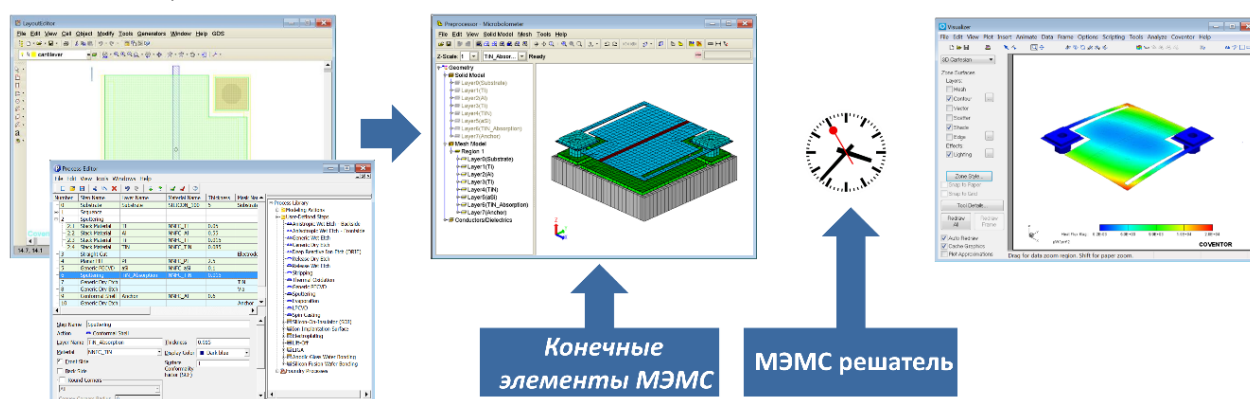


Рис. 4. Проектирование МЭМС-устройств в CoventorWare

Набор решающих программ CoventorWare обеспечивает быстрое физическое моделирование и позволяет выполнять следующие виды анализов:

- модальный анализ;
- квазистатическая сопряженная электромеханика (притяжение, отталкивание, электростатический изгиб пружины);
- гармонический анализ;
- алгоритм быстрой развертки по частоте для пьезоэлектрических BAW-резонаторов;
- газовое демпфирование для любой трехмерной геометрии;
- рассеяние энергии за счет термоупругого демпфирования и потерь в анкере;
- анализ чувствительности пьезорезистивных датчиков;
- детальный анализ напряжений.

Скриптовой интерфейс MATLAB

Автоматизировать построение модели из файла GDS, созданного в CoventorWare или с помощью конечных элементов заданной формы с адаптированным разбиением сетки из библиотеки MEMS+, можно с помощью пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB компании MathWorks. MATLAB предоставляет множество возможностей для постобработки, преимущества математического анализа и использования скриптов, мощные инструменты оптимизации и статического анализа.

Скрипты MATLAB, многочисленные примеры которых доступны в директориях дистрибутива MEMS+ и в интерактивной справочной системе платформы CoventorMP,

позволяют проводить быстрые расчеты проектов, искать компромиссы в геометрической конструкции, изменять параметры устройства, создавать и настраивать анализы и выполнять моделирование из интерфейса командной строки MATLAB. Скрипты, предусмотренные MEMS+, поддерживают анализы ударного воздействия (рис. 5), постоянного, модального, переменного тока, Pull-in, нелинейного частотного гистерезиса и переходных процессов, параметрическое моделирование с несколькими переменными, не требуя дополнительного инструментария.

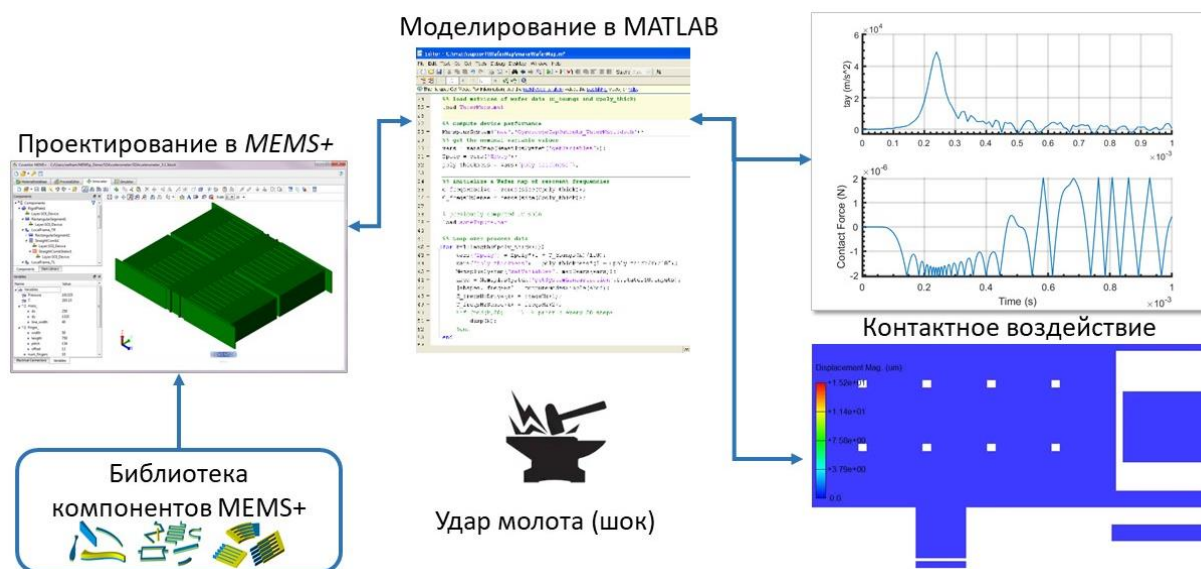


Рис. 5. Анализ ударного воздействия на модель акселерометра в MATLAB

Скриптовой интерфейс MATLAB также может использоваться для создания и редактирования базы данных материалов, технологических процессов, для моделирования демпфирования сжатой пленки и соединения с подложкой и т.д. Инструменты визуализации включают встроенные функции построения 2D- и 3D-графиков и диаграмм, позволяющие быстро проанализировать данные, например, взаимосвязь между результатами, переменными и параметрами, или же быть загружены обратно в модуль MEMS+ Scene3D.

Моделирование систем и схем с МЭМС

После разработки МЭМС-устройства, следующей задачей является моделирование его работы в составе системы или совместно с управляющей схемой.

Simulink (MathWorks) и Virtuos (Cadence Design Systems)

Инструмент MEMS+ интегрирован со средой динамического междисциплинарного моделирования технических систем Simulink (MathWorks) или средой разработки аналоговых интегральных схем Virtuos (Cadence Design Systems), что делает модель мультимодальной и обеспечивает общую платформу и эффективную методологию для разработчиков МЭМС-систем и ИС с МЭМС-структурами (рис. 6).

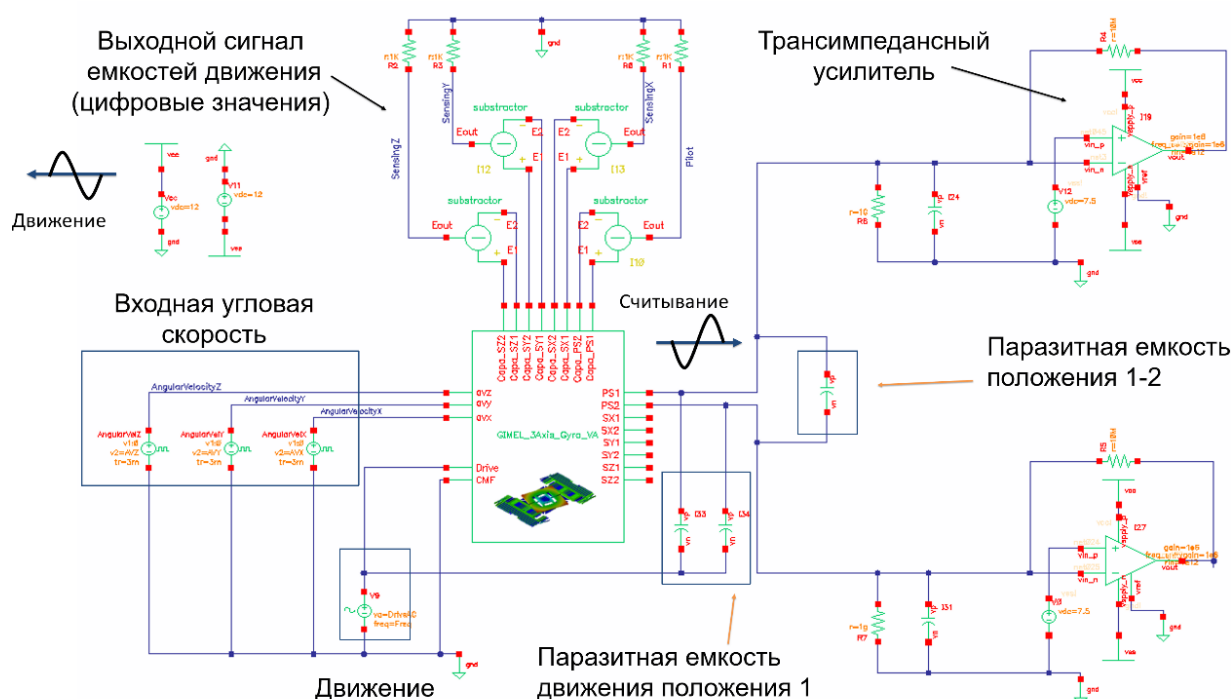


Рис. 6. Модель гироскопа, интегрированная в среду Simulink

Simulink – это динамический симулятор, позволяющий визуализировать работу системы. Импортированный блок МЭМС-устройства включает все настройки, установленные в MEMS+. Открыв настройки МЭМС-блока, можно изменить параметры конструкции прямо из интерфейса Simulink или же Virtuosio без необходимости снова передавать ее обратно в MEMS+.

После симуляции можно визуализировать результаты в 2D формате в самом Simulink, или же открыть их в MEMS+ для наглядной демонстрации в 3D.

Модели можно передавать и в другие среды проектирования с помощью встроенного экспорта в формат Verilog или в формат моделей сокращенного порядка (ROM) с уменьшенным количеством степеней свободы и без учета нелинейной физики. Данные модели используются для импорта сложных геометрических структур и позволяют сократить время моделирования в сотни раз.

Оптимизация выхода годных изделий и эффекты корпусирования

После разработки систем и схем, переходим на этап прогнозирования выхода годных изделий до их реального изготовления, используя интеграцию MEMS+ с MATLAB. С помощью скрипта MATLAB можно вычислить изменение модуля Юнга, толщины и частоты мод, провести анализ методом Монте-Карло, исследовать влияние угла боковой стенки канавки при процессе травления на квадратурную погрешность микрогироскопа в зависимости от положения элемента на пластине, спрогнозировать Добротность (Q-фактор) в результате давления в полости, включая влияние термоупругого демпфирования (TED) и температуры при фиксированном давлении.

Важным фактором для любого МЭМС является термостойкость и устойчивость к деформациям устройства в корпусе. Конструкция корпуса устройства влияет на все предыдущие этапы проектирования, как и на геометрию устройства, так и на схему управления. CoventorMP позволяет легко связывать модели корпусов с моделью МЭМС-устройства. Для моделирования влияния деформации корпуса на характеристики устройства используется гибридный подход, сочетающий МКЭ с мультифизическим анализом. С

помощью скрипта MATLAB может быть выполнен параметрический анализ для исследования деформации корпуса, изменения дифференциальной емкости и резонансных частот в зависимости от температуры, что трудно реализуемо в аналогичных программных средах.

CoventorMP заслуживает внимания разработчиков как специализированная комплексная платформа для проектирования МЭМС-устройств и систем. ЗАО «СКАН» официальный дистрибьютор компании Lam Research (Coventor) в России, предлагает полноценную версию CoventorMP для ознакомления и временные лицензии для бесплатного тестирования. Специалисты ЗАО «СКАН» готовы проконсультировать пользователей, ответить на возникшие вопросы и продемонстрировать возможности САПР, в том числе с использованием проектов пользователей.

Библиографический список

1. Соловьев А., Курдюков С. Современные решения для моделирования и проектирования МЭМС в среде CoventorMP // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2021. – № 3(204). – С. 66-71.
2. [Электронный ресурс]: – URL: <http://scanru.ru/products/coventor> (дата обращения 09.08.2021).
3. [Электронный ресурс]: – URL: <https://www.coventor.com> (дата обращения 09.08.2021).

УДК 539.23:535.37

DOI 10.53403/9785951505033_88

К.В. Дуров, Л.Н. Мартынов, Р.Н. Крюков, К.В. Сидоренко, Д.Е. Николичев, А.В. Ершов
**ОПТИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПЛЕНОК СУБОКСИДОВ
КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ РАЗНОЙ СТЕХИОМЕТРИИ ДЛЯ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ
СТРУКТУР**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Россия, г. Нижний Новгород

Тонкие (~ 100 нм) пленки субоксидов кремния и германия (SiO_x и GeO_x) получали реактивным магнетронным ВЧ-распылением Si или Ge в Ar-плазме с добавлением кислорода для вариации соотношения x в пределах 0÷2, количественно определенного методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Рассмотрено влияние условий осаждения и последующего отжига на оптические свойства пленок, изученные угловой спектроскопической эллипсометрией, Фурье-ИК-спектроскопией и фотолюминесценцией (ФЛ). Обнаружено, что отжиг при ~ 750 и ~ 1000 °С соответственно для GeO_x и SiO_x приводит к проявлению пленками свойств, характерных для систем с ансамблями нановключений полупроводника в диоксидной матрице, что наиболее четко наблюдается для $x \sim 1.8$ у обеих систем. Отожженные кремнийсодержащие пленки показали комнатную ФЛ в области ~ 750 нм. ФЛ системы GeO_x проявилась очень слабо. Разная эффективность ФЛ объясняется влиянием безызлучательной рекомбинации на интерфейсных дефектах.

Ключевые слова: магнетронное распыление; пленки; субоксид кремния; субоксид германия; нанокристаллы; фотолюминесценция.