УДК 004.3:004.9

компьютерное МОДЕЛИРОВАНИЕ работы ячеek энергонезависимой памяти на основе технологии RERAM

*Абгарян Каринэ Карленовна,*

*д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, заведующая отделом**1,*

[*kristal83@mail.ru*](mailto:kristal83@mail.ru)

*1ФИЦ ИУ РАН, г. Москва*

**Аннотация:** В связи с бурным развитием информационных технологий, включая системы искусственного интеллекта, в последнее время усилился интерес к элементам энергонезависимой памяти. В работе представленпрототип программного обеспечения САПР для компьютерного моделирования энергонезависимой памяти на основе технологии ReRAM (шифр «СоВА»). В основе разработки лежит многомасштабная схема моделирования. Система построена по принципу специализированного многоуровневого ПО. В работе представлена архитектура системы и описана среда проектирования.

**Ключевые слова:** энергонезависимая память, система автоматизированного проектирования ( САПР), многомасштабное моделирование.

Введение

В связи с бурным развитием информационных технологий, включая системы искусственного интеллекта (ИИ), с активной разработкой элементной базы для нейроморфных систем и других областей, в последнее время усилился интерес к элементам энергонезависимой памяти. Данные элементы и их матрицы могут использоваться для постоянного или долговременного хранения информации, в том числе при отсутствии электрического питания, работать как искусственные синапсы, в то время как логические схемы структур металл-оксид-полупроводник (КМОП) могут функционировать как нейроны. К наиболее перспективным можно отнести такие технологии для создания ячеек энергонезависимой памяти как ReRAM (Resistive random-access memory, резистивная память с произвольным доступом), FeRAM (Ferroelectric RAM - сегнетоэлектрическая оперативная память**)**, MRAM (magnetoresistive RAM *-* магниторезистивная оперативная память**)**. Многоуровневые элементы памяти позволяют увеличить плотность интеграции, однако требуют более точного моделирования и выбора режимов переключения.

Разработка новых элементов памяти неразрывно связана с созданием средств автоматизированного проектирования электронных устройств. На большую четверку производителей автоматизированного программного обеспечения, в которую входят Cadence Design System[1], Synopsys[2], Ansys[3] и Siemens EDA[4], в настоящее время приходится более 90% доходов отрасли EDA (автоматизация проектирования электроники). Одним из наиболее востребованных в данной области программных продуктов является Quantum ATK – программное обеспечение для атомистического моделирования, входящий в состав Synopsys. Данный пакет используется в ходе компьютерного моделирования сложных структур, состоящих из новых кристаллических и аморфных материалов, сплавов, интерфейсов и многослойных стеков, позволяет исследовать различные тепловые и механические свойства, а также рассматривать диффузионные и поверхностные процессы.

Разработка отечественных программных средств системы автоматизированного проектирования ЭКБ – непременное условие развития микроэлектроники в РФ, особенно с учетом специфики текущей ситуации в мире. В настоящее время в России ряд компаний, разработчиков системного программного обеспечения, объединились в Консорциум «Базис», среди учредителей которого разработчики [системного ПО](https://www.cnews.ru/book/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BE%D0%B1%D0%B5%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_-_System_software) «[Аскон](https://www.cnews.ru/book/%D0%90%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BD_-_Ascon_-_%D0%90%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D1%8B_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F_-_%D0%90%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F)», «Скан», Eremex, Omega, [Институт инженерной физики](https://www.cnews.ru/book/%D0%98%D0%BD%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%82%D1%83%D1%82_%D0%B8%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B8_%D0%90%D0%9D%D0%9E) и Ассоциация электронного машиностроения. Консорциум отечественных разработчиков направил в 2022 году предложение Минпромторгу выработать стратегию развития российских систем автоматизированного проектирования для электроники. Актуальность такого предложения связана с необходимостью замещения зарубежных САПР, разработчики которых ([Synopsys](https://www.cnews.ru/book/Synopsys), [Cadence](https://www.cnews.ru/book/Cadence_Design_Systems_-_c_dence), другие) прекратили продажу лицензий в Россию и отказались от обновлений уже приобретенного ПО (программного обеспечения).

*Описание прототипа программного обеспечения САПР для компьютерного моделирования энергонезависимой   
памяти на основе технологии ReRAM (шифр «СоВА»)*

В ФИЦ ИУ РАН в настоящее время проводятся работы по созданию программной среды для моделирования элементов энергонезависимой памяти в рамках проекта РНФ №23-91-01012 «Разработка программных средств системы автоматизированного проектирования ЭКБ для создания ячеек энергонезависимой памяти на основе технологии ReRAM, FeRAM, MRAM», ШИФР «СоВа» по заказу АО НИИМЭ. На первом этапе выполнения проекта создана и программно-реализована общая архитектура системы и прототип Программного обеспечения для создания ячеек энергонезависимой памяти на основе технологии ReRAM.

ПО «СоВа» построено по принципу специализированного многоуровневого ПО.

В основе лежит многомасштабная схема моделирования [5,6]. Уровни ПО дифференцированы по временному и пространственному масштабу задач, начиная с атомарного и молекулярного уровня с переходом на уровень веществ, тел, структур с границами раздела, электрических и электрофизических характеристик приборных структур. Для решений на каждом уровне в систему «СоВа» подгружаются соответствующие вычислительные модули ПО.

Архитектура ПО «СоВа» предусматривает использование ряда оригинальных отечественных модулей, выполненных в рамках данного проекта, а также модулей в составе зарубежных специализированных ПО. Все они объединены под управлением единой среды проектирования. В состав специализированных ПО в качестве составляющих ПО «СоВа» входят:

*1.Отечественные модули (собственные разработки):*

-вычислительные модули для проведения расчетов на атомно-кристаллическом уровне, на наноуровне, модуль редуцирования физико-математических моделей в компактные модели;

- набор расчетных модулей, реализующих численные методы с возможностью симуляции процессов;

-модуль описания элементов энергонезависимой памяти и ячеек на их основе.

*2.Модуль для квантово-механического моделирования* электронной структуры и энергетических характеристик структур на основе теории функционала электронной плотности (DFT) [7]. Могут быть задействованы пакеты: Quantum ESPRESSO (URL https://www.quantum-espresso.org/), SIESTA(URL https://siesta-project.org/siesta/index.html), ABINIT (<https://abinit.github.io/abinit_web/>) и другие специализированные программные продукты, которые позволяют моделировать электронную и атомную структуру молекул и кристаллов.

*Архитектура системы*

На рисунке 1 представлена архитектура системы, описанная с помощью Диаграммы компонентов ПО «СоВа».

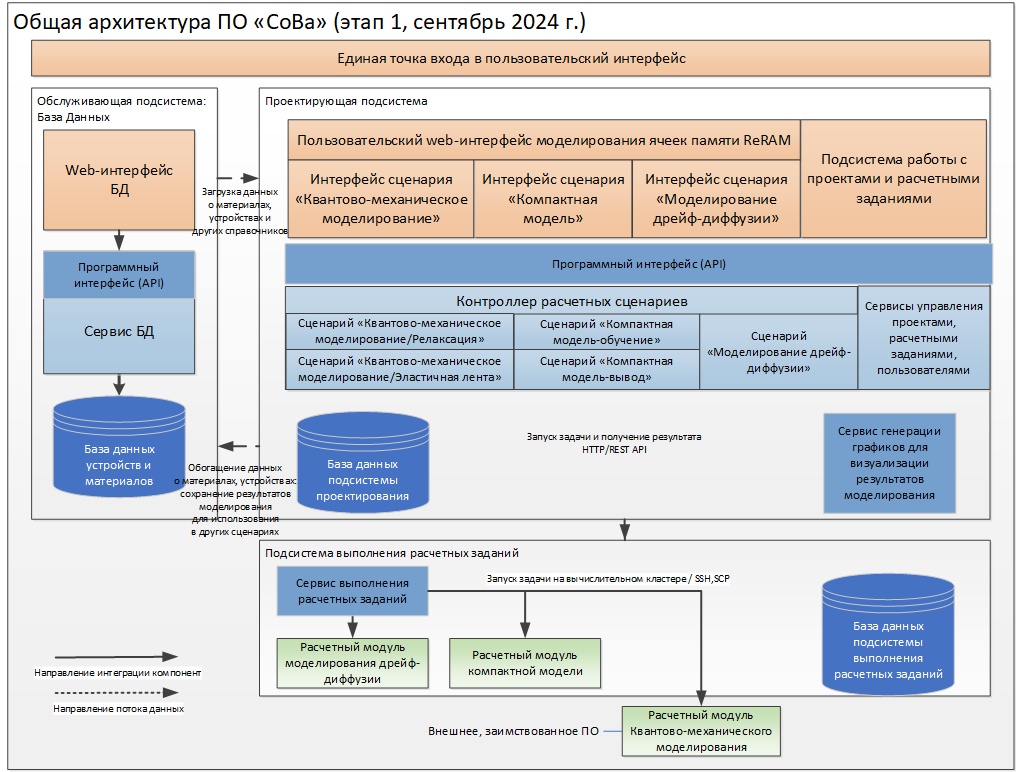


Рисунок 1 – Диаграмма компонентов ПО «СоВа».

Программное обеспечение для создания ячеек энергонезависимой памяти на основе технологии ReRAM предоставляет возможность:

-Проведения многоуровневых и распараллеленных расчетов в автоматизированном режиме на высокопроизводительных программных комплексах;

-Проведения компьютерной симуляции процессов в структурах энергонезависимой памяти на нано и микроуровнях;

-Изучать поведение элементов энергонезависимой памяти в при различных режимах работы;

-Использовать средства визуализации результатов вычислительных экспериментов и интеллектуального анализа данных, для анализа результатов и принятия решения на основе полученной информации;

-Использовать протокол REST и формат данных JSON для информационного обмена между компонентами;

-Круглосуточного режима функционирования для системы, без особых требований к доступности.

*Особенности реализации среды исполнения ПО «СоВа»*

Разработана среда исполнения сценариев дает возможность в автоматическом режиме запускать сценарии с заданными входными параметрами, отслеживать их выполнение в целом, и по составным задачам, просматривать входные и выходные данные (результаты расчетов).

 Интеграционная роль среды исполнения заключается в формировании входных данных для вычислительных модулей в соответствующем формате и единицах измерения, отслеживании работы вычислительных модулей, получении конечного результата расчета и преобразовании его в формат и единицы измерения, доступные для других модулей сценария.

*Среда проектирования ПО «СОВА»*

Среда проектирования, под управлением которой объединяются и работают модули ПО «СоВа» включает:

- пользовательский интерфейс (рисунки 2, 3);

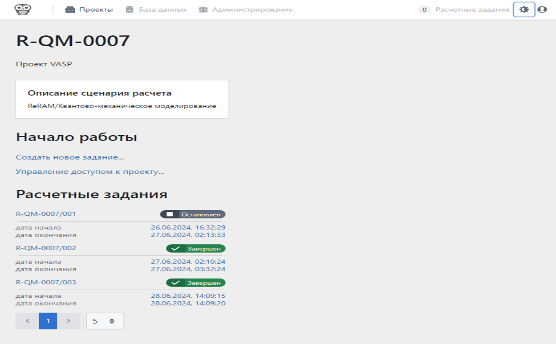
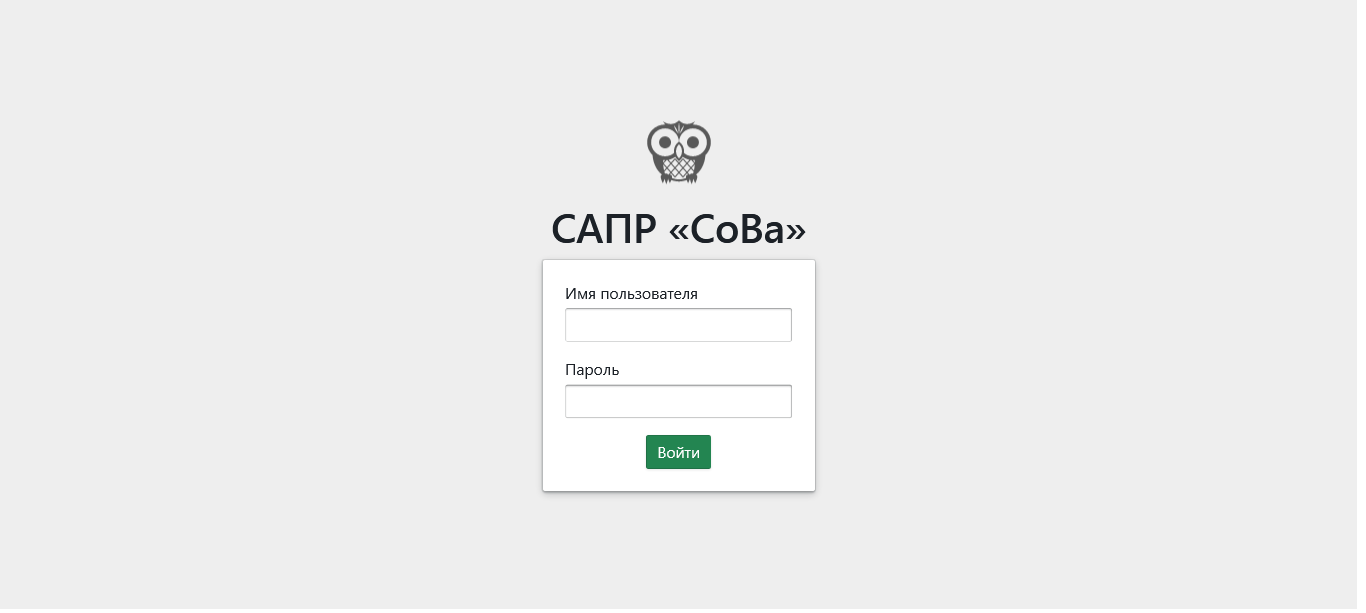
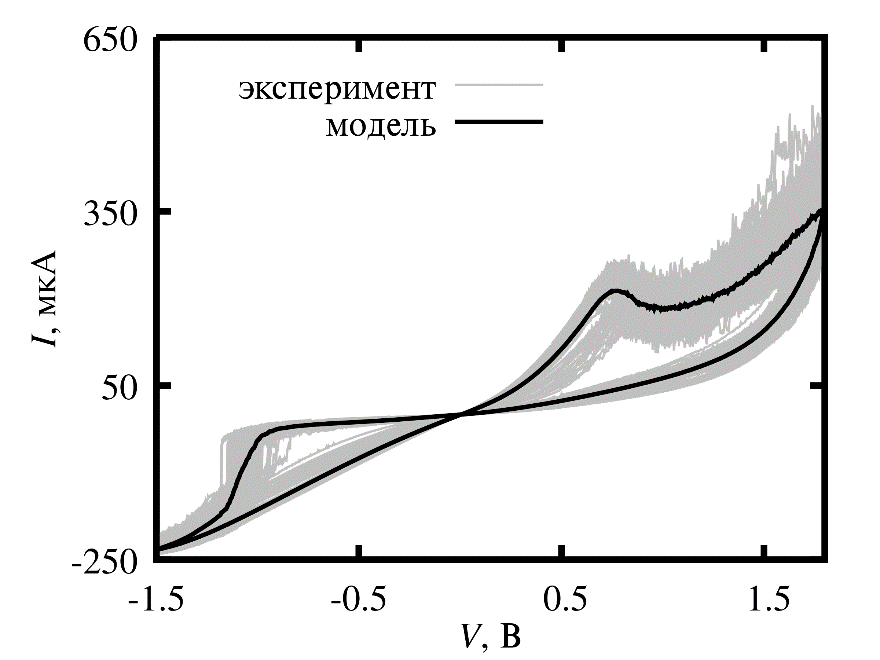
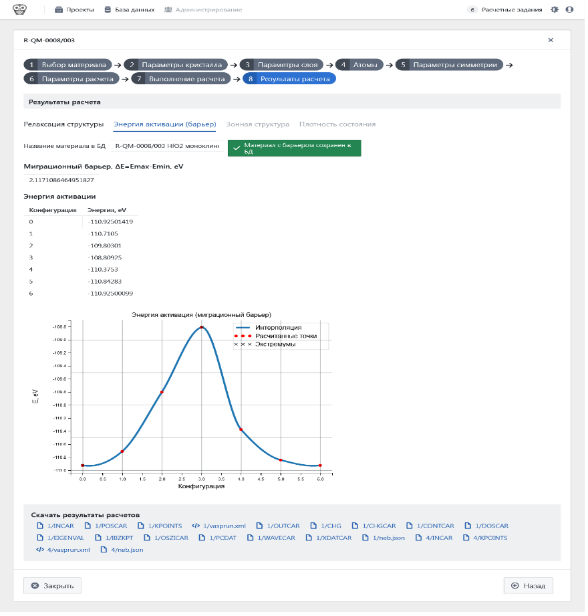


Рисунок 2.- Окно авторизации Рисунок 3. – Приветственная страница

- графический пользовательский интерфейс для ученого- исследователя, включая средства визуализации результатов расчетов (рисунки 4,5);



|  |  |
| --- | --- |
| Рисунок 4 – Результаты расчета энергетического барьера для HfO2 | Рисунок 5 – Модельная и экспериментальные вольтамперные характеристики для Pt-HfO2-TiN |

- базу данных с информацией о материалах, их структурах и свойствах, интегрированную со средой моделирования сценариев;

-среду моделирования сценариев, позволяющую создавать и модифицировать сценарии, используя новые программные решения (алгоритмы последовательного выполнения отдельных многомасштабных расчетов) для решения разных классов задач, учитывая особенности конкретной задачи и требуемых выходных данных.

Кроме того, среда проектирования в дальнейшем может быть использована для создания геометрического описания конструкции элементов энергонезависимой памяти в нано- и микро- масштабах, а также для разработки средств их интеграции с описанием материалов конструкции, включая интерфейсы и их параметры.

**Заключение**

В докладе рассматриваются актуальные методы и средства компьютерного моделирования САПР «СоВА», предназначенной для создания ячеек энергонезависимой памяти на основе технологии ReRAM. Представлены основные особенности и проектируемые возможности построенного программного продукта, с помощью которого создается эффективная среда для:

- реализации многомасштабных физико-математических моделей, описывающих с различной степенью детализации процессы, проходящие в ячейках энергонезависимой памяти на основе технологий ReRAM в ходе их функционирования при различных условиях:

- разработки солверов, базирующихся на численных алгоритмах решения уравнений математической физики, стохастических методов для Монте-Карло моделирования, аналитических методов и других, служащих для вычислительной реализации математических моделей.

-разработки компактных моделей элементов энергонезависимой памяти и устройств на их основе;

- построения компьютерных моделей для предсказания характеристик элементов на основе анализа теоретических и экспериментальных данных;

- создания методов верификации и валидации цифровых двойников элементов энергонезависимой памяти и ячеек памяти на их основе;

- разработки механизмов обратной связи с целью определения путей уточнения спецификаций проектируемых элементов и выполнения необходимых доработок;

-проведения комплексных исследований по изучению поведения элементов энергонезависимой памяти в критических режимах при превышении допустимых параметров;

- создания на основе цифровых двойников элементов энергонезависимой памяти экспертных систем для прогнозирования надежности и сроков бесперебойной работы при различных внешних воздействиях и условиях эксплуатации, позволяющих быстро выявить причины неисправностей в процессе тестирования и выработать рекомендации по их устранению.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №23-91-01012.*

Список использованных источников

[1] https://www.cadence.com/

[2] <https://www.synopsys.com>

[3] <http://www.ansys.com/>

[4] <https://eda.sw.siemens.com/>

[5] Абгарян К.К. Многомасштабное моделирование в задачах структурного материаловедения. - М.: МАКС Пресс. 2017. 284 С.

[6] Абгарян К.K., Гаврилов Е.С. Интеграционная платформа для многомасштабного моделирования нейроморфных систем// Информатика и её применение, 2020.Том 14, выпуск 2. С.104–110. DOI: 10.14357/19922264200215

[7] *W. Kohn, L.J. Sham.* Self - consistent equations including exchange and correlation effects. - Phys. Rev. 140:A. 1965. P. 1133-1138.1.

***COMPUTER MODELING OF NON-VOLATILE MEMORY CELL OPERATION BASED ON RERAM TECHNOLOGY***

Karine Karlenovna Abgaryan,

PhD, Chief Researcher, Head of the Department1,

kristal83@mail.ru

1Federal Research Centre "Computer Science and Control"(FRCCSC), of the Russian Academy of Sciences, (FRC CSC RAS). Vavilov st. 44, 119333 Moscow, Russia

**Abstract:** Due to the rapid development of information technologies, including artificial intelligence systems, interest in non-volatile memory elements has recently increased. This paper presents a prototype of CAD software for computer modeling of non-volatile memory based on ReRAM technology (cipher “SoVA”). The development is based on a multiscale modeling scheme. The system is built on the principle of specialized multilevel software. The paper presents the system architecture and describes the design environment.

**Keywords:** non-volatile memory, computer-aided design system (CAD), multiscale modeling.