


УТВЕРЖДАЮ
Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Института
физики полупроводников
им. А.В. Ржанова Сибирского
отделения Российской академии
наук, академик РАН

 А.В. Латышев
"27" декабря 2018 г

МП

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ямалетдинова Руслана Дамировича

«Теоретическое моделирование элементов с памятью: графеновый мемконденсатор и оптомемристор на основе нитрозокомплексов рутения», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 02.00.04 – физическая химия.

Мемристор (являющийся искусственным аналогом синапса) – основа построения нейросетей на чипе интегральной схемы. Для современной технологии мемристор – простой функциональный элемент, интегрируемый с традиционными технологическими процессами кремниевой микроэлектроники. Другое применение мемристора связано с использованием его в качестве быстродействующих, энергоэкономных, радиационно-стойких матриц флэш памяти нового поколения, сохраняющих информацию при отключённом питании. По аналогии с мемристором были предложены другие перспективные приборы с памятью: мемконденсатор (ёмкость с памятью) и меминдуктор (индуктивность с памятью). Это, в свою очередь, вызвало экспоненциальный рост количества работ по исследованию природы мемристорного переключения к новым приборам. Повышенный интерес и актуальность данной тематики отражается в растущем количестве докладов на профильных конференциях и научных симпозиумах международного уровня (как правило, посвящённых Material Science), в которых тематика о приборах с памятью выделена в отдельные секции и даже направления.

Теоретические исследования, представленные в диссертационной работе Р.Д. Ямалетдинова актуальны как с точки зрения выявления закономерностей рассматриваемых систем, так и поиска физических систем, обладающих удовлетворительными характеристиками для разработки перспективных приборов с памятью, включая мемконденсатор на основе графена и оптомемристор на основе сложных химических комплексов рутения. Исследования актуальны и с точки зрения поиска новых областей применения перспективных структур.

Диссертационная работа состоит из введения, в котором сформулированы актуальность, новизна, научная и практическая значимость проведённых исследований, и сформулированы положения, выносимые на защиту, 3 глав и заключения. В первой главе сделан обзор литературы по современному состоянию исследований элементов с памятью (т.н. мемэлементам): мемристор, мемконденсатору и оптическому мемэлементу с изменяемым коэффициентом отражения – мемфлектору. Рассмотрены различные варианты реализации мемристора и мемконденсатора и возможные перспективные области применения рассмотренных элементов. Представлен обзор физико-химических свойств материалов, используемых в изучаемых мемэлементах: механические свойства и электронное строение графена, фотоиндуцированная изомеризация нитрозорутениевых комплексов.

Следует отметить, что на сегодняшний день некоторые приборы с памятью производятся в промышленных масштабах. Так, например, оптические приборы памяти представлены на рынке в виде CD, DVD, магнитооптических и BlueRay дисков (с соответствующими приводами). В серии микроконтроллеров MN101LR производства фирмы Panasonic блок EEPROM заменён на мемристоры (на основе Ta_2O_5) с крайне неоптимальными характеристиками. Максимально достигнутый объём мемристорной памяти составляет 64 кбайт. Это ограничение обусловлено необходимостью формовки (первого переключения из исходного высокоомного состояния в низкоомное при повышенных напряжениях, сопровождаемого интенсивным выделением джоулева тепла) всей матрицы мемристорных элементов. Оптомемристоры и мемконденсаторы пока вообще отсутствуют в виде конечных приборов, хотя их полезность в вычислительной технике очевидна.

К наиболее **значимым результатам** диссертационной работы следует отнести:

1. Установлено, что термическая стабильность Ru-ON изомера связана с электродонорными свойствами лиганда, находящегося в трансположении к NO: более высокие донорные свойства лиганда способствуют понижению энергии барьера изомеризации Ru-ON \rightarrow Ru-NO (GS \rightarrow MS1). При этом механизм координированного изомера (MS1) включает стадию прямого перехода из возбужденного состояния GS*, минуя минимум η_2 координированного изомера.
2. Детально описан метод генерации графеновых наноструктур, заключающийся в их последовательном растяжении и освобождении, приведший к обнаружению ряда ранее неизвестных структур и изменения основной конформации графена по мере увеличения длины от плоского листа к сложенному листу и свитку.
3. Показано, что при переключении достаточно длинного сжатого графенового листа с двумя заделанными краями возникают стабильные состояния типа кинк.
4. Предложена концепция и математическая модель оптического аналога мемристора – оптомемристор, где в роли входного напряжения выступает спектральная плотность светового потока, а в роли сопротивления – коэффициент пропускания;
5. Выявлен механизм переключения мемконденсатора, заключающийся в переключении сверху-вниз через несимметричный профиль графеновой мембраны, а при переключении снизу-вверх – через симметричный профиль.

Достоверность полученных результатов и выводов достигается тем, что полученные результаты не противоречат имеющимся в литературе экспериментальным данным. Материалы диссертации доложены на многочисленных российских и международных научных конференциях, основные результаты диссертации опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных журналах.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые предложен механизм обратимой изомеризации нитрозокомплексов рутения и выделении структурных особенностей, влияющих на данный процесс. Теоретически (в рамках теории функционала плотности) и экспериментально (с привлечением дифференциальной сканирующей калориметрии и инфракрасной спектроскопии) получены кинетические характеристики процесса термоиндуцированной обратимой изомеризации для ряда нитрозокомплексов. Предложена концепция оптомемристора на базе нитрозорутения, и продемонстрирована возможность использования данного мемэлемента в качестве оптического аналога мемристора. Численно и аналитически описаны процессы, происходящие с напряжённой графеновой мембраной, найдено основное состояние сжатого графенового листа. Разработана аналитическая модель мемконденсатора на основе графена.

Теоретическая и практическая значимость проведённых исследований состоит в выявлении механизмов, происходящих в процессе изомеризации нитрозокомплексов рутения, в нахождении основного состояния графеновой полоски в зависимости от её длины, в нахождении особенностей поведения кинков сжатого графенового листа. Практическая значимость работы также заключается в разработке концепции оптомемристора и описании механизмов работы мембранного мемконденсатора, что может востребовано при создании электрических и оптических вычислительных схем нового поколения.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для анализа оптических и наномеханических приборов памяти на основе графена и нитрозокомплексов рутения. Они представляют интерес для таких организаций, как Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск), Институт лазерной физики СО РАН (г. Новосибирск), Институт автоматики и электрометрии СО РАН (г. Новосибирск), Институт физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), ОАО «Микрон», ОАО «Швабе-Фотосистемы», а также для других организаций, специализирующихся на разработке оптических приборов и приборов памяти.

По диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Диссертация носит преимущественно теоретический характер. При этом отсутствует сравнение результатов расчётов работы рассмотренных мемэлементов, полученных на основе построенных математических моделей, с экспериментом. Также нет практических рекомендаций по проведению таких экспериментальных работ с целью проверки полученных в работе результатов.
2. Автору следовало бы более мотивированно подойти к выбору в качестве мемконденсатора подвешенного графена в связи со сложностью практической реализации таких приборов.

3. Имеющиеся экспериментальные данные по ИК спектроскопии и КРС представлены несколько небрежно. Так, на рис. 15 представлено изменение ИК спектров образца со временем. В тексте указано, что «зафиксировано уменьшение полосы при 1686 см^{-1} », что, по всей видимости, нужно интерпретировать как уменьшение интенсивности полосы пропускания. Вместе с тем, на рисунке 15 стрелка указывает на увеличение интенсивности, при этом временные интервалы не указаны. На рис. 13 и 15 оси ординат развернуты в разные стороны. Некоторые особенности, наблюдаемые в спектрах (например, на рис. 15 при 1600 см^{-1}), не описаны.
4. Есть ряд замечаний по оформлению диссертации. Единственный раз встречающаяся расшифровка сокращения «КР-спектроскопия» на стр. 4 написана с ошибкой, как «спектроскопия комбинационного рассеивания» вместо «... рассеяния». Автор в тексте диссертации обращается со знаками пунктуации (запятыми) с нарушением общепринятых правил русского языка. Так, на стр. 91 допущено 5 опечаток. Силы в различных частях оказываются либо в «нН/атом», либо в «эВ/Å». Также в тексте встречаются величины силы «nN» и «нН». Не совсем ясно, что обозначает величина «нН/атом» в главе 2 – нормировка идёт на общее количество атомов в ленте, на количество пограничных атомов или же на количество пограничных незакреплённых (свободных) атомов. Результаты и выводы главы 3 не выделены в отдельный раздел, а находятся в подразделе «3.3.3 Описание работы мембранного мемконденсатора». Рисунки в главе 3 довольно мелкие, возможно, в угоду уменьшения объёма всей диссертации. В тексте диссертации автор достаточно вольно обращается с обозначением переменных величин и, особенно, индексов. В научной литературе принято, что переменная величина обозначается курсивом, переменный индекс – тоже курсивом. Однако, индекс-обозначение (процесса, явления) выделяется прямым текстом. Указанные недостатки затрудняют чтение диссертации и требуют большего внимания читателя.

Указанные замечания носят преимущественно оформительский характер и **не снижают общей положительной оценки работы**. Диссертационная работа Р. Д. Ямалетдинова является законченным научным исследованием, содержит новые результаты, имеющие научную и практическую значимость. Результаты опубликованы в 6 статьях в научных журналах из перечня ВАК. Автореферат полно и адекватно отражает содержание диссертации.

Доклад по материалам диссертации заслушан и обсуждён на институтском семинаре ИФП СО РАН на базе лаборатории физических основ материаловедения кремния 12 декабря 2018 года, протокол № 11.

Отзыв на диссертационную работу Р. Д. Ямалетдинова одобрен Учёным советом ИФП СО РАН 26 декабря 2018 года, протокол № 15.

Диссертационная работа Р. Д. Ямалетдинов на тему «Теоретическое моделирование элементов с памятью: графеновый мемконденсатор и оптомемристор на основе нитрозокомплексов рутения» удовлетворяет требованиям Положения ВАК

о порядке присуждения учёных степеней, утверждённых постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года, №842, а её автор Ямалетдинов Руслан Дамирович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 02.00.04 – физическая химия.

Отзыв составил:

Исламов Дамир Ревинирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, лаборатория физических основ материаловедения кремния, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН), пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, +7(383)333-88-91, E-mail: damir@isp.nsc.ru.

На обработку персональных данных согласен.

С.н.с. ИФП СО РАН,
к. ф.-м. н.

Д. Р. Исламов

Учёный секретарь ИФП СО РАН,
к.ф.-м.н.

С. А. Аржанникова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН), Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 13, тел.: +7 383 330 90 55, факс: +7 383 333 27 71, Web: www.isp.nsc.ru, E-mail: ifp@isp.nsc.ru.

Председатель семинара
член-корреспондент РАН, профессор

А. В. Двуреченский