

ОТЗЫВ

научного консультанта на диссертационную работу Чибисова Андрея Николаевича **«Теоретические исследования влияния дефектов на электронные и структурные свойства кислородсодержащих наноразмерных материалов»** представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

В современной полупроводниковой наноэлектронике уменьшение размеров наноустройств должно приводить к увеличению скорости их работы и к снижению потребляемой ими мощности. С другой стороны, уменьшение размеров транзисторов вызывает пропорциональное уменьшение размеров изолирующего слоя затвора, что может приводить к возникновению нежелательных эффектов, таких как уменьшение ширины запрещенной зоны, снижение надежности транзистора и т.п. Для повышения надежности изолирующего слоя затвора вместо традиционного оксида кремния могут быть использованы кислородсодержащие материалы с большой диэлектрической постоянной (high-k материалы). Таким образом, создание кислородсодержащих материалов с большой диэлектрической постоянной, используемых в качестве затворов, обладающих заданными размерными, структурными, электронными и механическими характеристиками является важной научной проблемой современной наноэлектроники. На современном этапе проектирования наноэлектронных устройств методы квантово-механического моделирования атомной и электронной структуры, а также физических свойств материалов приобретают все большее значение, поскольку позволяют непосредственно теоретически смоделировать необходимые материалы с наперед заданными свойствами и существенно снизить расходы, связанные с экспериментальным исследованием соответствующих материалов.

В данной диссертационной работе Чибисовым А.Н. рассматриваются такие технологически важные и широко используемые в наноэлектронике кислородсодержащие high-k наноматериалы как: нанослой SiO_2 , легированные оксидами переходных металлов Zr, Ti и Fe; наночастицы ZrO_2 , TiO_2 и BaTiO_3 ; слои нанопористого гидросиликата магния $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Все эти материалы применяются в качестве диэлектрических слоев затворов в полевых транзисторах, а также как конденсаторы. При образовании дефектов в данных материалах может наблюдаться увеличение паразитных токов утечки, смещение энергетических зон, что может сильно влиять практически на все параметры работы полевых транзисторов.

Таким образом, для высокоэффективного использования кислородсодержащих материалов в нанoeлектронике, автору необходимо было детально исследовать и теоретически обосновать закономерности поведения электронных и структурных свойств high-k материалов в зависимости от размерности, дефектности структуры и наличия примесных атомов. Считаю, что Чибисов А.Н. справился с поставленной задачей. Диссертационная работа обладает научной новизной, поскольку в ней впервые проведено широкое комплексное теоретическое исследование атомной, электронной структуры, энергетических и механических характеристик кислородсодержащих наноструктурных материалов при образовании в них структурных дефектов. Результаты и защищаемые положения достоверны и обоснованы. Полученные в работе выводы существенно дополняют и объясняют имеющиеся данные теоретических и экспериментальных работ по изучению физических свойств кислородсодержащих наноструктурных материалов. Большая часть из представленных атомных моделей для наноструктурных материалов, с описанием их характеристик, построены автором впервые.

Наиболее важными и значительными результатами работы Чибисова А.Н. считаю:

1. Найдены закономерности формирования электронной структуры кислородсодержащих наноразмерных high-k материалов.
2. Выявлены особенности распределения зарядовой плотности в кислородсодержащих наноразмерных high-k материалах.
3. Установлены особенности поведения электронной и атомной структуры малых наночастиц на основе оксидов переходных металлов.
4. Определены общие закономерности в смещении энергетических зон и значений ширины запрещенной зоны при внедрении примесных атомов для диэлектрических слоев на основе оксида кремния и титаната бария.

За время работы Чибисов Андрей Николаевич показал себя высококвалифицированным специалистом. Лично автором самостоятельно спланированы все основные этапы работы, построены все основные атомные модели, проведены расчеты, проанализированы все основные результаты и сформулированы защищаемые положения. Диссертационная работа Чибисова А.Н. является законченным научным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Соискателем по теме диссертации опубликовано порядка 54 статей в рецензируемых российских и международных научных изданиях, из них 20 статей опубликованы в научных журналах ВАК, 14 из которых индексируется в базах данных Web of Science и Scopus. В 9 статьях соискатель является единственным автором. За достигнутые научные результаты

(выполненные лично соискателем) Чибисов А.Н. в 2015 году был удостоен премии губернатора Хабаровского края «за результаты научных исследований, внесших значительный вклад в развитие естественных наук».

Считаю, что диссертационная работа Чибисова Андрея Николаевича «Теоретические исследования влияния дефектов на электронные и структурные свойства кислородсодержащих наноразмерных материалов» полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям, а ее автор - Чибисов Андрей Николаевич заслуживает присуждение ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Научный консультант, ведущий научный сотрудник Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

Доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния), профессор СФУ

Фёдоров Александр Семенович

11 декабря 2020 г.

т. +7 (391) 249-49-65, г. Красноярск, Академгородок 50, стр. 38, email: alex99@iph.krasn.ru

Подпись <u>Федоров А.С.</u> заверяю
Ученый секретарь <u>К.Ф. - М.Н.</u>
Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН)
« 11 » декабря 2020 г.



А.С. Чибисов