

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Париновой Елены Владимировны «**Электронно-энергетическое строение и фазовый состав аморфных нанокompозитных пленок $a\text{-SiO}_x\text{-}a\text{-Si:H}$** », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - «Физика полупроводников».

Диссертационная работа Париновой Елены Владимировны «Электронно-энергетическое строение и фазовый состав аморфных нанокompозитных пленок $a\text{-SiO}_x\text{-}a\text{-Si:H}$ » посвящена изучению атомного и электронного строения, фазового состава полупроводниковых тонкопленочных композитных структур аморфный кремний – аморфные субоксиды кремния методами рентгеновской спектроскопии, дополненными анализом оптических свойств и субструктуры.

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что наноструктуры на основе кремния являются одними из наиболее перспективных полупроводниковых материалов для использования в современных микро-, нано- и оптоэлектронных устройствах. Доступность кремния как материала, разнообразные направления развития технологии и пути применения кремниевых наноструктур ставят многочисленные задачи, решение которых формирует динамичное развитие современной физики полупроводников. Применение композитных пленочных структур на основе аморфного кремния и аморфных субоксидов кремния обусловлено рядом преимуществ, среди которых стоит выделить более простые и менее затратные технологии их создания, по сравнению, например, с эпитаксиальными кремниевыми наноструктурами. Эффективное использование таких композитных пленочных структур, реализация их уникальных свойств, в том числе и оптических, для производства современных полупроводниковых приборов, например, светодиодов или солнечных элементов, связано с пониманием специфических особенностей перестройки электронно-энергетического спектра и возможных изменений в фазовом составе. Поэтому современными и актуальными являются

исследования аморфных нанокompозитных пленок $a\text{-SiO}_x\text{-}a\text{-Si:H}$ методами, чувствительными к локальному атомному и электронному строению, а также изучение взаимосвязей особенностей электронно-энергетического спектра с изменениями в фазовом составе и оптическими свойствами, чему и посвящена данная диссертация.

Диссертация состоит из пяти глав, изложена на 162 страницах, содержит 65 рисунков, 14 таблиц и список литературы из 164 наименований. Работа изложена ясно, а структура отличается последовательностью и логикой изложения.

Новизна полученных результатов обеспечивается проведением комплекса современных рентгеноспектральных экспериментов, в том числе с применением компьютерного моделирования и использованием синхротронных источников генерации высокоинтенсивного рентгеновского излучения для исследования специфики изменений в электронно-энергетическом спектре, атомном строении и составе изученных полупроводниковых тонкопленочных композитных структур аморфный кремний – аморфные субоксиды кремния. Основные результаты работы, посвященные определению взаимосвязей оптических свойств, особенностей атомного и электронного строения и фазового состава в зависимости от способов формирования аморфных нанокompозитных пленок $a\text{-SiO}_x\text{-}a\text{-Si:H}$, получены автором впервые.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии Париновой Е.В. в проводимых высокоточных рентгеноспектральных экспериментах по исследованиям электронно-энергетического спектра, включая работы, проводимые в составе научной группы на синхротронных центрах, самостоятельном проведении моделирования данных электронного строения композитных структур аморфный кремний – аморфные субоксиды кремния, непосредственном участии в исследованиях оптических, структурных характеристик и в проведении комплексного анализа полученных экспериментальных и теоретических данных.

В ходе работы автором получен ряд **новых** важных результатов, среди которых можно особо выделить следующие. Показано, что с использованием модуляции плазмы на постоянном токе с вариацией времен включения и выключения магнитного поля возможно получение композитных пленок аморфного субоксида кремния с разной степенью окисления и концентрацией кластеров кремния, обладающих фотолюминесценцией в видимом диапазоне спектра. Впервые показано аномальное поведение спектров поглощения синхротронного излучения мягкого рентгеновского диапазона, вызванное формированием большого количества нанокластеров кремния в аморфной матрице субоксида кремния. Анализ электронного строения и фазового состава тонких пленок оксидов кремния, сформированных методом газоструйного химического осаждения с активацией электронно-пучковой плазмой, позволил выявить композитную природу этих структур, которые состоят из аморфного кремния и оксидов различной степени окисления. Увеличение температуры подложки приводит к росту содержания оксидов кремния в пленках $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ уже на этапе их формирования. Проведены исследования электронно-энергетического спектра, фазового состава и субструктуры пленок полуизолирующего поликристаллического кремния, формируемых химическим осаждением при низких давлениях, которые показали влияние состава реакторной смеси на аморфизацию и окисление получаемой плёнки с возможным образованием малых нанокристаллов кремния.

Результаты и выводы, изложенные в диссертации, имеют **научную и практическую** ценность, так как являются основой для понимания уникальных свойств, например, оптических, перспективных полупроводниковых структур – аморфных нанокомпозитных пленок $a\text{-SiO}_x\text{-}a\text{-Si:H}$, их связи с особенностями перестройки электронно-энергетического спектра и изменениями фазового состава, в том числе при реализации реальных технологических решений. Более того, полученные данные могут быть применены при изучении других функциональных аморфных материалов, разрабатываемых или уже внедренных в производство на основе кремниевых технологий.

Достоверность и обоснованность основных результатов и выводов не вызывают сомнений, что определяется степенью их проработанности, комплексным применением в проведенных исследованиях уникальных современных экспериментальных установок в оптимальных режимах, в том числе оборудования мирового уровня синхротронного Гельмгольц центра (Берлин, Германия), использованием самых современных методик регистрации прямых экспериментальных данных высокого энергетического разрешения, их воспроизводимостью и многократной проверкой.

По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. Приведенные в главе 3 данные по оптическому поглощению пленок композитов $a\text{-SiO}_x\text{-}a\text{-Si:H}$ с различным содержанием аморфного кремния и результаты экстраполяции краев поглощения позволяют автору оценить оптическую ширину запрещенной зоны как 3,25-3,3 эВ. Однако на рис. 40 наблюдается несколько достаточно пологих участков, аппроксимация которых делается. Не ясно, была ли проведена экстраполяция по другим степенным законам с целью более точного определения типа зонной структуры? Также не понятно, учитывалась ли при проведенном анализе спектральная зависимость показателя преломления пленок?

2. При обсуждении спектров фотолюминесценции для композитов $a\text{-SiO}_x\text{-}a\text{-Si:H}$ (рис. 41) и в заключении работы делается вывод о нанокластерах кремния с размерами 3-5 нм. Не понятно, имеются ли ввиду аморфные нанокластеры или нанокристаллы, в соответствии с цитируемой работой [95]? К сожалению, в диссертации не приводятся данные исследования структуры исследуемых пленок или времен жизни фотолюминесценции, позволяющие судить о наличии в них нанокристаллов.

3. В главе 5 приведены результаты исследований методами рентгеновской дифракции и электронной микроскопии структурных свойств пленок полуизолирующего поликристаллического кремния, сформированных химическим осаждением из газовой фазы, которые позволили определить размер нанокристаллов кремния. Не ясно, почему автором не были проведены аналогичные исследования для образцов, рассмотренных в других главах?

4. На основе анализа спектров квантового выхода для образцов композита $a\text{-SiO}_x\text{-}a\text{-Si:H}$ делается предположение о роли наночастиц кремния с размерами, сопоставимыми с длиной волны синхротронного излучения. Хотелось бы получить более детальные объяснения природы наблюдаемого эффекта.

5. В работе имеются отдельные опечатки и неточности, в частности, на стр.4 для расшифровки «УМРЭС» правильнее использовать термин «Ультрамягкая рентгеновская эмиссионная спектроскопия»; на стр.65 для величин R более точным, по-видимому, является выражение «радиус кривизны зеркала»; на стр.100 вместо «по спектрам пропускания-поглощения» следует, вероятно, указать, что измерялись спектры «отражения-поглощения».

Однако сделанные замечания не влияют на хорошее впечатление от диссертации и не ставят под сомнение новизну и значимость положений, выносимых на защиту и выводов, сделанных в работе. Новые результаты, полученные Париновой Е.В., отличаются высокой научной и практической значимостью и, без сомнения, будут востребованы при дальнейших фундаментальных исследованиях и в прикладных разработках. В целом, диссертация Париновой Е.В. представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне.

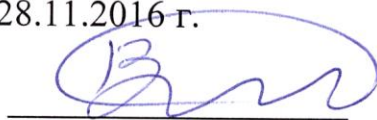
Работа прошла хорошую апробацию, о чём свидетельствует представление результатов на многочисленных международных и национальных конференциях, их публикация в 4 статьях в ведущих журналах из перечня ВАК, индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

Тематика и содержание диссертации в полной мере соответствует формуле специальности 01.04.10 – физика полупроводников. Содержание диссертации отражает суть работ, опубликованных Париновой Е.В., а автореферат правильно и в полной мере передает её содержание.

Таким образом, считаю, что диссертация «Электронно-энергетическое строение и фазовый состав аморфных нанокompозитных пленок $a\text{-SiO}_x\text{-}a\text{-Si:H}$ » по своей актуальности и новизне, достоверности и совокупности полученных результатов, уровню их апробации соответствует всем требованиям п. 9 - 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК

Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Парина Елена Владимировна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

28.11.2016 г.



официальный оппонент

Тимошенко Виктор Юрьевич,
доктор физико-математических наук (специальность
01.04.10 - физика полупроводников), профессор
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова
физический факультет,
кафедра физики низких температур и
сверхпроводимости,
профессор

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
кафедра физики низких температур и сверхпроводимости физического
факультета МГУ, 119991, Москва, Ленинские Горы, дом 1, строение 2
р.т.+7 (495) 939-48-11
м.т.+7(916) 378-98-11
E-mail: timoshen@physics.msu.ru

Декан
физического факультета МГУ им.М.В.Ломоносова
профессор



Н.Н.Сысоев