

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Париновой Елены Владимировны "Электронно-энергетическое строение и фазовый состав аморфных нанокомпозитных 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".

Диссертация Париновой Е.В. посвящена исследованию электронного строения, фазового состава и свойств аморфных нанокомпозитных пленок на основе кремния. Объекты, исследованные в работе, находят широкое применение в современной кремниевой наноэлектронике. Предпринятое исследование, несомненно, является **актуальным**.

Работа имеет ярко выраженный комплексный характер. Автор применяет целый набор хорошо апробированных экспериментальных методов, дающих взаимно дополняющую и взаимно подтверждающую информацию. Полученные результаты являются **новыми и достоверными**, сделанные выводы вполне **обоснованы**.

Особо следует отметить результаты, полученные с использованием метода ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии. Высокая чувствительность L_{23} -спектров кремния к характеру химической связи, природе атомов окружения, геометрии окружения и координационному числу позволила автору применить метод подгонки экспериментального спектра суперпозицией базисных спектров для определения фазового состава образцов. Этот подход уже в течение многих лет применяется в научной группе, к которой принадлежит автор, и доказал свою эффективность.

Важным достоинством работы является то, что в ней исследованы свойства пленок, полученных разными методами и в разных режимах. Автору удалось обнаружить зависимость состава и свойств образцов от методов и режимов их получения. Эти данные представляют несомненную **научную и практическую ценность**, так как позволяют совершенствовать методы получения материалов, практически важных в кремниевых технологиях.

Оппоненту импонирует тот факт, что работа выполнена, так сказать, в классическом стиле. Прежде всего, впечатляет объем проделанной работы: количество исследованных объектов и их исследование разнообразными методами. Диссертация содержит подробный литературный обзор с большим количеством

проанализированных литературных источников. На основе обзора ясно сформулированы цели работы. Хорошо и подробно описаны детали эксперимента: устройство спектрометра, выбор режимов съемки, оценка разрешающей способности и абсолютной погрешности в определении энергий. Такое в наше время, к сожалению, увидишь уже не часто.

Диссертация состоит из введения и пяти глав. В заключении работы дана краткая сводка полученных результатов и выводов.

Первая глава содержит подробный обзор данных имеющихся литературных источников по получению и свойствам кремниевых наноструктур, в том числе содержащих нанокластеры и нанокристаллы. Приведены основы экспериментальных методов исследования кремниевых структур, изучаемых в диссертации. На основании материалов первой главы сформулированы цели и задачи работы.

Вторая глава содержит информацию о способах и режимах получения аморфных тонкопленочных композитных структур $a\text{-SiO}_x\text{-}a\text{-Si:H}$. Приведены детальные методические данные о проведении экспериментов.

Третья глава диссертации содержит результаты комплексного изучения электронно-энергетического спектра, фазового состава и оптических свойств пленок композитов $a\text{-SiO}_x\text{-}a\text{-Si:H}$ с различным содержанием кластеров кремния и оксидов кремния, полученных с использованием плазмы на постоянном токе в условиях вариации длительности включения и выключения разряда. Показано, что изменения в составе формируемых композитных пленок (содержание аморфной фазы) приводят к изменению в распределении плотности состояний в валентной зоне и в зоне проводимости. Показан эффект аномального взаимодействия синхротронного излучения с нанокластерами кремния в оксидной матрице, размеры которых сопоставимы с длиной волны в области данного края и который сказывается на поведении края рентгеновского поглощения Si. Изучено изменение оптических свойств, и продемонстрирована фотолюминесценция в видимом диапазоне за счет образования кластеров кремния с размерами в 3-5 нм в зависимости от состава композитной пленки.

В четвертой главе исследованы особенности перестройки электронно-энергетического спектра и изменений фазового состава пленок $a\text{-SiO}_x\text{:H}$, полученных при помощи газоструйного химического осаждения с активацией электронно-пучковой. Показано, что при выбранном способе формирования в самых поверхностных слоях (5 нм) и до объемных (свыше 100 нм), пленки являются

композитными на основе аморфного кремния и его оксидов. Уже на стадии формирования пленок показан рост содержания оксидов с увеличением температуры подложки. Показан сдвиг дна зоны проводимости оксида кремния на достаточно значительную величину, 1-2 эВ.

В пятой главе рассмотрены атомное и электронное строение и состав пленок полуизолирующего поликристаллического кремния, сформированных методом химического осаждения из газовой фазы. Изучены ключевые особенности формирования структуры и электронного строения этих объектов, и показано, что добавление в состав реакторной смеси закиси азота приводит не к формированию нанокристаллического кремния, что наблюдалось для исходных структур, а к существенной аморфизации слоев, содержащих и оксидные фазы. Кроме того, в таких структурах продемонстрирована возможность образования включений малых нанокристаллов кремния (менее 10 нм) при малых скоростях роста и высокой температуре.

Работа содержит некоторые **недостатки**.

1. Базисные SiL_{23} спектры, использованные для разложения спектров исследуемых соединений, нормировались по максимуму наибольшей интенсивности. На взгляд оппонента более правильным было бы нормировать базисные спектры на одинаковую интегральную интенсивность (площадь спектра).

2. Вызывает удивление следующее утверждение на стр. 21:

«Кратковременный всплеск тока магнита (и напряженности магнитного поля) приводит к резкому увеличению энергии (скорости) электронов плазмы (но не тяжелых ионов и наночастиц)».

Как увеличение напряженности магнитного поля может привести к «резкому увеличению энергии (скорости) электронов плазмы», если сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы и НЕ совершает работу?

3. Формула
$$\Delta E = \frac{12398,1}{\lambda^2} \Delta \lambda$$
 на стр. 64 названа формулой для аппаратного уширения. На самом деле это просто связь между интервалом длин волн и соответствующим интервалом энергий фотонов. К аппаратному уширению она не

имеет отношения. Кроме того, неясно, почему, основываясь на этой формуле, автор утверждает, что «энергетическое разрешение растет с уменьшением длины волны».

4. В табл. 4 на стр. 91 (последний столбец) приведена некая «погрешность», выраженная в процентах, которая никак не определена. Речь, видимо, идет не о погрешности определения фазового состава, а о точности подгонки экспериментального спектра суперпозицией базисных спектров. Здесь могут применяться разные критерии, и точное определение этой величины было бы уместным.

5. Имеются некоторые погрешности в стиле изложения, например

- Подпись к Рис. 5 гласит: *Зависимость пиков* фотолюминесценции от размера кластера в дискретной модели распределения. Речь, видимо идет о зависимости *энергии* пиков.
- Рис. 6 озаглавлен «Результаты *свертки* Гауссианами фотолюминесцентных спектров». На самом деле, на рисунке показаны результаты представления полос фотолюминесценции в виде суперпозиции гауссовых компонент. Свертка – это совсем другая математическая операция.
- На Рис. 7 спектры названы «*нормализованными*». По-русски это *нормированные* спектры.
- На стр. 49 упоминается квадрат матричного элемента *вероятности* перехода электрона. Это бессмыслица. Здесь смешаны два отдельных понятия: матричный элемент перехода, и вероятность перехода.

Сделанные замечания не снижают общего весьма положительного впечатления о работе, которая представляет собой законченное научное исследование, выполненное на очень высоком уровне.

Результаты диссертации прошли апробацию на многочисленных конференциях, в том числе международных, они опубликованы в четырех статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых системами цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ и входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Таким образом, следует заключить, что по объему проделанной работы, ее актуальности и новизне, значимости полученных результатов диссертация Париновой Елены Владимировны "Электронно-энергетическое строение и фазовый

состав аморфных нанокompозитных пленок $a\text{-SiO}_x\text{-}a\text{-Si:H}$ соответствует требованиям п. 9-14 "Положения о присуждении ученых степеней", предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

02.12.2016 г.



официальный оппонент
Кочур Андрей Григорьевич,
доктор физико-математических наук
(специальность 01.04.07 - физика
конденсированного состояния), профессор
Ростовский государственный университет
путей сообщения
энергетический факультет,
кафедра физики, профессор

Адрес: 119991, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного
Ополчения, д. 2, тел. +7(863) 272-63-52;
e-mail: agk@rgups.ru

Подпись Кочур А. Г.

УДОСТОВЕРЯЮ

Зам. Начальнику управления делами
ФГБОУ ВО РГУПС

«*РА*»

12



Э.Н. Кирсанова