

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Баркова Константина Александровича «Атомное и электронное строение, электрические и оптические свойства композитных пленок Si-SiO_x», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников

В диссертации Баркова К.А. представлены результаты исследований атомного и электронного строения, структуры, фазового состава нанокомпозитных пленок на основе кремния и субоксидов кремния.

Актуальность темы диссертации Баркова К.А. не вызывает сомнений по нескольким причинам. Во-первых, даже в таком хорошо и давно известном материале, как композитные пленки Si-SiO_x, при исследованиях с использованием современных высокоточных методов диагностики могут проявляться не наблюдавшие ранее эффекты. Кроме того, до сих пор существуют трудности в диагностике фазового состава композитных пленок на основе нестехиометрических оксидов кремния, которые вызваны наличием большого количества аморфных фаз и субоксидов кремния. Поэтому несомненный интерес представляет применение методов ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС), а также спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), позволяющих устанавливать наличие и соотношение аморфных и нанокристаллических фаз кремния и субоксидов кремния, а результаты этих исследований дополняют фундаментальные знания о таких структурах.

Во-вторых, рассматриваемые в диссертации объекты исследования получены по стандартным промышленным методикам, что позволяет использовать результаты исследований для оптимизации технологических процессов при формировании таких структур в полупроводниковой электронике.

Диссертация Баркова К.А. состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 190 страницах, содержит 95 рисунков, 25 таблиц и список литературы из 287 наименований. Диссертация содержит подробный обзор литературы с большим количеством данных, на основе которого сформулированы цели работы, методическую главу, где подробно описаны детали эксперимента, а также две главы с результатами исследований атомного и электронного строения, электрических и оптических свойств композитных пленок Si-SiO_x.

Среди наиболее важных **научных результатов** следует выделить следующие:

- Впервые получены однозначные экспериментальные данные о локальной атомной и электронной структуре композитных кремниевых слоев типа SIPOS, представляющих собой сложные многофазные системы, включающие в разных соотношениях аморфные и нанокристаллические кремниевые и субоксидные фазы, в зависимости от содержания кислорода.
- Под воздействием импульсного фотонного отжига (ИФО) субоксидная матрица композитных пленок a-SiO_x+ncl-Si изменяет стехиометрию до значений, близких к SiO₂, что соответствует характеру распределения кремниевых и кремний-кислородных тетраэдров в таких пленках в рамках модели случайной смеси.
- В результате воздействия ИФО интенсивность фотолюминесценции композитных пленок уменьшается по сравнению с исходными аморфными пленками вследствие возможного разрыва пассивирующих связей кремния с водородом и кислородом. Одновременное формирование нанокристаллов кремния сопровождается смещением края оптического поглощения и уменьшением ширины запрещенной зоны на 0.1÷0.4 эВ.

Научная и практическая ценность полученных в диссертации результатов обусловлена тем, что предложенные подходы к диагностике композитных кремниевых пленок, содержащих в разных соотношениях аморфные и нанокристаллические кремниевые и субоксидные фазы,

позволили получить однозначные экспериментальные данные об атомном и электронном строении, фазовом составе пленок полуизолирующего кремния, легированного кислородом, а также установить закономерности изменений фазового состава и электрических свойств пленок SIPOS от технологических параметров. Комплекс данных, представленных в работе, может быть использован для оптимизации технологических режимов получения полупроводниковых материалов микроэлектроники, а также более эффективного управления электрическими и оптическими свойствами.

Достоверность представленных в диссертации результатов и выводов обеспечивается использованием современного диагностического оборудования, в числе которых ультрамягкая рентгеновская эмиссионная спектроскопия и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, грамотным методическим подходом к проводимым исследованиям, а также многократной воспроизводимостью результатов.

Личный вклад соискателя заключается в непосредственном участии в получении и обработке всех экспериментальных данных, в формулировании выводов, представлении полученных результатов на научных конференциях.

Вместе с тем, работа не лишена некоторых недостатков, по которым можно сделать следующие **замечания**:

1. Для установления природы полос фотолюминесценции при $h\nu \approx 2,1$ эВ было бы правильным провести исследования кинетики фотолюминесценции пленок a-SiO_x с нанокристаллами кремния.
2. В главе 3 упоминается о наличии в глубоких слоях пленок SIPOS адсорбированного кислорода, который не связан с кремнием, однако в качестве экспериментального доказательства данного утверждения приводится только результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, при этом глубина анализа является сильно ограниченной поверхностными слоями.
3. В тексте диссертации отсутствует информация о том, обладают ли фотолюминесценцией в видимом диапазоне пленки SIPOS поскольку в

них содержится довольно много нанокристаллов кремния размером менее 5 нм.

4. В диссертации не приводятся данные послойного анализа фазового состава методом УМРЭС, несмотря на то, что в описании данной методики такая возможность демонстрируется. Послойный анализ фазового состава позволил бы проконтролировать однородность содержания нанокристаллов кремния в объеме пленок а-SiO_x после импульсного фотонного отжига.
5. К недостаткам работы можно отнести отсутствие метода просвечивающей электронной микроскопии для исследования структуры композитных пленок Si-SiO_x. Данный метод позволил бы существенно дополнить и верифицировать результаты оценок средних размеров нанокристаллов кремния в пленках по данным спектроскопии комбинационного рассеяния света и рентгеновской дифракции.

Изложенные замечания не уменьшают достоинства диссертации Баркова К.А. и не ставят под сомнение результаты и выводы.

Работа была апробирована на различных международных и всероссийских конференциях, школах и семинарах. Результаты диссертации изложены в 25 научных работах, из которых 3 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ и индексируемых в базах Scopus и Web of Science. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация Баркова К.А. «Атомное и электронное строение, электрические и оптические свойства композитных пленок Si-SiO_x» выполнена на высоком научном уровне, обладает новизной, научной и практической значимостью, и полностью удовлетворяет всем требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Барков Константин Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

19.09.2022

Согласен на обработку моих персональных данных

Официальный оппонент

Валеев Ришат Галеевич

кандидат физико-математических наук

(специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния),

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

академии наук»

отдел физики и химии поверхности

лаборатория атомной структуры и анализа поверхности

ведущий научный сотрудник

Подпись Валеева Р.Г. заверяю

Директор УдмФИЦ УрО РАН

д.ф.-м.н., профессор

Альес М Ю



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

Почтовый адрес: 426000, г. Ижевск, ул. Кирова, 132

Телефон: +7(3412) 43-01-63

E-mail: rishatvaleev@udman.ru