

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

Диссертация Баркова К.А. посвящена определению закономерностей влияния атомного и электронного строения, структуры и фазового состава композитных пленок Si-SiO_x на их электрические и оптические свойства. При этом в процессах формирования пленок на основе нестехиометрических оксидов кремния SiO_x кислород играет определяющую роль. Поэтому в диссертации рассматривается два типа композитных пленок: с низким содержанием кислорода ≤15 ат.% (пленки полуизолирующего кремния, легированного кислородом, SIPOS) и высоким содержанием кислорода ~50 ат.% (диэлектрические композитные пленки a-SiO_x+ncl-Si с нанокластерами кремния). Выбранные в работе в качестве объектов исследования пленки полуизолирующего кремния, легированного кислородом, представляют значительный интерес в технологии высоковольтной микроэлектроники, а диэлектрические аморфные пленки a-SiO_x с нанокластерами или нанокристаллами кремния активно применяются для создания светоизлучающих структур в различных лабораториях.

Однако несмотря на большой объем литературных данных, даже на сегодняшний день существуют трудности в диагностике фазового состава аморфных пленок на основе кремния и субоксидов кремния. В случае пленок SIPOS имеющаяся в литературе неоднозначность данных о влиянии кислорода на фазовый состав и электрофизические свойства затрудняют получение образцов с заданными свойствами и использование данного

материала в полупроводниковой промышленности, несмотря на его привлекательные свойства.

В случае аморфных диэлектрических пленок $a\text{-SiO}_x$, содержащих нанокластеры аморфного кремния, существует технологическая проблема, связанная с тем, что высокотемпературный отжиг таких пленок приводит к увеличению нанокластеров и сильной дисперсии по размерам формирующихся нанокристаллов кремния, что приводит к снижению интенсивности и уширению спектров люминесценции. Особенно сильно эта проблема проявляется в случае пленок SiO_x , в которых изначально присутствует большое количество нанокластеров аморфного кремния. Поэтому предложенный в диссертации подход к формированию массивов нанокристаллов кремния малых размеров (<5 нм) в аморфных пленках $a\text{-SiO}_x$ с помощью кратковременного импульсно-фотонного отжига представляет научный и практический интерес.

Таким образом, представленные в диссертации исследования взаимосвязи атомного и электронного строения, структуры и фазового состава композитных пленок Si-SiO_x с их функциональными свойствами, а также результаты по кристаллизации нанокластеров с помощью импульсно-фотонного отжига пленок $a\text{-SiO}_x$ являются **актуальными**.

Диссертация объемом 190 страниц состоит из введения, четырех глав, содержащих обзор литературных данных, экспериментальных методик и результаты исследований, а также выводов из работы. Она включает в себя 95 рисунков, 25 таблиц и список литературы, содержащий 287 наименований, включая публикации по теме диссертации.

Работа изложена ясно, а структура отличается последовательностью и логикой изложения.

В ходе работы автором получен ряд **новых** важных результатов, среди которых можно особо выделить следующие:

– Пленки SIPOS, полученные по стандартной промышленной технологии осаждения кремния из газовой фазы, состоят из нанокристаллов

кремния, размеры которых определяются количеством связанного с кремнием кислорода, погруженных в аморфную матрицу из кремниевых и кремний-кислородных кластеров.

– В процессе осаждения пленок SIPOS формируется четыре массива нанокристаллов кремния, существенно отличающихся по размерам: ~75 нм, ~25 нм, ~5 нм и ~1 нм. С увеличением концентрации кислорода от 8 до 16 ат.% в пленках SIPOS содержание более крупных нанокристаллов кремния заметно снижается с одновременным увеличением содержания мелких нанокристаллов.

– В композитных пленках с исходным содержанием нанокластеров кремния $ncl\text{-Si} \leq 50$ % при отжиге ИФО часть нанокластеров кремния сублимируется в нанокристаллы, а часть окисляется, тогда как в пленках с исходной концентрацией нанокластеров кремния ≥ 53 %, при отжиге происходит антибатный переход кремния из оксидной фазы в нанокристаллы Si

Результаты, полученные автором, обладают высокой научной и практической значимостью и будут востребованы при дальнейших фундаментальных исследованиях и прикладных разработках.

Научная и практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты дополняют существующие представления о закономерностях кристаллизации нанокластеров аморфного кремния в диэлектрических пленках с большим исходным содержанием нанокластеров аморфного кремния под воздействием импульсного фотонного отжига. Полученные экспериментальные данные о локальной атомной и электронной структуре композитных кремниевых слоев типа SIPOS будут использованы при создании новых технологических маршрутов изготовления высоковольтных интегральных схем на предприятии АО «ВЗПП-Микрон».

Достоверность и обоснованность результатов и выводов, изложенных в диссертации, определяется использованием современных и информативных методов анализа как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия,

спектроскопия комбинационного рассеяния света, а также использованием уникальной методики ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии, позволяющей проводить послойный анализ наличия и соотношения как аморфных, так и кристаллических фаз на основе кремния, без разрушения образца. Представленные в работе результаты исследований хорошо согласуются между собой.

Работа прошла хорошую апробацию на различных международных и всероссийских конференциях, а основные результаты диссертации опубликованы 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.

Тем не менее, следует обратить внимание автора на ряд представленных ниже замечаний:

1. В спектрах оптического поглощения нанокомпозитных пленок а- $\text{SiO}_x+\text{ncl-Si}$ явно наблюдается несколько краев поглощения, которые, к сожалению, не получили должной физической интерпретации.
2. Наличие фазы гидрооксида кремния в нанокомпозитных пленок а- $\text{SiO}_x+\text{ncl-Si}$ утверждается только на основании двух наблюдавших рефлексов на дифрактограммах и не использованы данные, полученные методом КРС. При анализе дифрактограмм широко практикуется метод свертки, что, как правило, способствует устранению неоднозначностей в из описании.
3. В диссертации (Глава 3, п. 3,5) при исследовании электрических свойств пленок SIPOS автор акцентирует внимание на эффекте уменьшения величины тока со временем при постоянно приложенном напряжении, однако никаких физических обоснований данного явления не приводится.
4. Исходя из данных УМРЭС добавка закиси азота в процессе осаждения пленок SIPOS приводит к резкому увеличению содержания фазы аморфного кремния, однако на температурных зависимостях проводимости участок с малым значением энергии активации начинает проявляться только в случае максимального содержания кислорода, несмотря на то что образцы не сильно

отличаются по содержанию фазы аморфного кремния. К сожалению отсутствие экспериментальных зависимостей в области низких температур не позволяет дать однозначную интерпретацию данного эффекта.

5. В результате кристаллизации нанокластеров кремния в пленках $\text{SiO}_x + \text{ncl-Si}$ путем импульсного фотонного отжига формируются достаточно крупные нанокристаллы кремния размером около 10 и даже более 100 нм. Не ясно, почему автором не был проведен ИФО с меньшей дозой излучения.

6. В диссертации постоянно используется несколько обозначение одного и того же метода («Рамановская спектроскопия», «КРС», «комбинационное рассеяние». Следовало бы остановиться на одном из них.

7. Имеются некоторые неточности в формулировках и написаниях, к примеру, формула закона Ламберта-Бугера-Бера – (31).

Следует отметить, что диссертация производит хорошее впечатление несмотря на сделанные замечания, которые не ставят под сомнение новизну и значимость выносимых на защиту положений и выводов, сделанных в работе.

Тематика и содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 1.3.11 – Физика полупроводников. Суть опубликованных работ в полной мере отражена в диссертации Баркова К.А., а автoreферат достаточно полно передаёт её содержание.

Диссертация Баркова К.А. «Атомное и электронное строение, электрические и оптические свойства композитных пленок $\text{Si}-\text{SiO}_x$ » по своей актуальности и новизне, достоверности и совокупности полученных результатов, а также уровню их апробации в полной мере соответствует 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.

15.09.2022

Согласен на обработку моих персональных данных

Официальный оппонент

Кузьменко Александр Павлович

доктор физико-математических наук

(специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния),

профессор,

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,

Региональный центр нанотехнологий,

главный научный сотрудник

Подпись Кузьменко А.П.
удостоверяю
Специалист по кадрам

15.09.2022 А.В. Кузьменко



ФГБОУ ВО «Юго-западный государственный университет»

Почтовый адрес: 305040, г. Курск ул. 50 лет Октября, 94

Телефон: +7(471) 222-26-05

E-mail: apk3527@mail.ru