МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)

Гагарина пр., 23, г. Нижний Новгород, Россия, ГСП-20, 603022

Тел. (831)462-30-90 Факс (831)462-30-85

e-mail: unn@unn.ru

13.09.2022 № 13-4/273-1

на № 0809-254 от 27.06.2022

УТВЕРЖДАЮ

проректор ННГУ

им. Н. И. Лобачевского

по научной работе, д.ф.-м.н.

_____ М.В. Иванченко

«13» сентября 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

БАРКОВА КОНСТАНТИНА АЛЕКСАНДРОВИЧА

«АТОМНОЕ И ЭЛЕКТРОННОЕ СТРОЕНИЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК Si-SiO_x»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.11 – физика полупроводников

Актуальность темы диссертации

Актуальность темы диссертационной работы К.А. Баркова определяется возможностью широкого применения композитных пленок Si-SiO_x в разных областях физики и технологии, особенно в микроэлектронике. В частности, в диссертации рассматриваются пленки полуизолирующего кремния, легированного кислородом (SIPOS), которые используются в качестве пассивирующих покрытий в дискретных высоковольтных полупроводниковых приборах и интегральных схемах, поскольку позволяют существенно повысить величину пробивных напряжений. Кроме того, для оптоэлектроники интерес могут представлять изучаемые в данной работе диэлектрические пленки SiO_x с нанокристаллами и нанокластерами кремния, поскольку благодаря размерному квантованию такие пленки могут обладать фото- и электролюминесценцией. При этом размеры нанокластеров/ нанокристаллов кремния будут определять область фотолюминесценции.

Важно отметить, что в системе кремний–кислород в зависимости от атомного состава, а также технологии получения и постобработки образца одновременно присутствует множество фаз нестехиометрических оксидов SiO_x (где $x<2$),

нанокристаллов или нанокластеров кремния, всевозможных цепочек элементарного кремния и диоксида кремния SiO_2. При этом размер, химическое состояние, а также соотношение этих структурных элементов определяется атомным составом системы Si-O и технологией получения (постобработки) образца, которые выбираются с учетом требуемых функциональных характеристик, например, электрофизических или оптических, таких структур. Однако высокое содержание в таких системах аморфных фаз a-Si и a-SiO_x с различной степенью окисления, нанокристаллов кремния с размером ≤5 нм, большого числа оборванных связей значительно сужает круг информативных методов диагностики структуры и фазового состава. Это приводит к противоречиям в литературных данных о влиянии атомного состава и условий получения пленок SiO_x на их фазовый состав и функциональные свойства. Поэтому рассматриваемые в диссертации вопросы получения достоверной информации о структуре, фазовом составе, атомном и электронном строении пленок, содержащих нестехиометрические оксиды кремния SiO_x в зависимости от содержания кислорода в пленках и технологии их получения являются актуальными.

Основные результаты, их научная и практическая значимость

Представленные в диссертации результаты, сделанные выводы и выдвинутые на защиту положения соответствуют специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

В диссертации К.А. Барков получил ряд новых результатов, представляющих научный и практический интерес, среди которых следует отметить 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.

– Кислород в структурной сетке матрицы аморфного кремния пленок SIPOS содержится в связанном виде кремний-кислородных тетраэдров преимущественно типа $Si\text{-}Si_3O$ и в незначительном количестве в виде тетраэдров типа $Si\text{-}Si_2O_2$ без образования диоксида SiO_2. Корреляция экспериментальных данных с моделью случайной связи свидетельствует о случайном характере распределения кремний-кислородных тетраэдров в пленках SIPOS.

– Нелинейные качественные и количественные изменения атомного строения слоев SIPOS при возрастании концентрации связанного кислорода от 8 до 16 ат.% увеличивают на два порядка удельное сопротивление пленок (от $5.5\cdot10^8$ до $1.9\cdot10^{10}$ Ом·см) и энергию активации проводимости (от 0.56 до 0.63 эВ).

– Импульсный фотонный отжиг аморфных диэлектрических композитных пленок (*a*-SiO_x+*ncl*-Si) с большим содержанием кислорода (~50 ат.%) и кластеров элементарного кремния приводит к образованию в оксидной матрице нескольких массивов нанокристаллов со средними размерами: ~ 1 нм, ~ 5 нм, ~ 10 нм и более крупных кристаллитов кремния ≥100 нм.

– Под воздействием ИФО субоксидная матрица композитных пленок *a*-SiO_x+*ncl*-Si изменяет стехиометрию до значений, близких к SiO_2, что соответствует характеру распределения кремниевых и кремний-кислородных тетраэдров в таких пленках модели случайной смеси.

Автором диссертации выявлены основные закономерности и особенности влияния кислорода на атомное и электронно-энергетическое строение, фазовый состав, а также электрические и оптические свойства композитных пленок на основе кремния и его субоксидов. Полученные данные важны для оптимизации методов и условий формирования полупроводниковых материалов с заданными свойствами. В первую очередь, полученная в ходе исследований информация и выработанные на их основе рекомендации будут использованы при создании новых технологических маршрутов изготовления высоковольтных интегральных схем и разработке надежных методов диагностики и контроля параметров функциональных материалов, используемых в производстве полупроводниковых приборов на предприятии АО «ВЗПП-Микрон». Кроме того, результаты диссертации Баркова К.А. могут быть полезными для организаций, занимающихся как созданием, так и исследованием подобных структур. Среди таковых можно отметить ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), СПбГУ (г. Санкт-Петербург), МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва), ННГУ им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород), ЛЭТИ (г. Санкт-Петербург), ЮФУ (г. Ростов-на-Дону), НГУ (г. Новосибирск), ФТИ УдмФИЦ Уро РАН (г. Ижевск), ИФП СО РАН (г. Новосибирск), Институт катализа СО РАН (г. Новосибирск), ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар), ИОНХ РАН (г. Москва), ИХТТ УрО РАН (г. Екатеринбург), ВГТУ (г. Воронеж), ВГУ (г. Воронеж) и другие организации.

Новизна полученных результатов

– 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.

– Определены оптимальные технологические параметры формирования структур из газовой фазы на основе силана, с заданным фазовым составом и электрофизическими характеристиками полуизолирующих слоев SIPOS.

– Обнаружены и установлены неизвестные ранее закономерности кристаллизации нанокластеров аморфного кремния в диэлектрических пленках с большим содержанием кислорода (~50 ат.%) a-SiOx+ncl-Si, под воздействием ИФО, с образованием нанокристаллов кремния nc-Si различного размера в зависимости от содержания нанокластеров в исходных слоях, а также влияние этой кристаллизации на оптические свойства пленок.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов определяется целым рядом факторов, и в первую очередь тем, что экспериментальную часть работы соискатель выполнил с использованием высокоточных современных систем анализа электронно-энергетического строения нанокомпозитных пленок SiO_x, таких как уникальная научная установка «Рентгеновский спектрометр монохроматор РСМ-500», рентгеновский фотоэлектронный спектрометр SPECS, а также хорошо отработанная методика КРС спектроскопии. Для обработки экспериментальных данных были использованы надежные методы и современное программное обеспечение.

Для формирования образцов исследуемых композитных пленок Si-SiOx применялись воспроизводимые промышленные методики получения материалов с заданными свойствами.

Общие замечания

Диссертация К.А. Баркова в целом представляет законченное, целостное научное исследование, но не лишена отдельных недостатков.

1. Оценка содержания кислорода в пленках SIPOS проводилась только по данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, т.е. только в поверхностных слоях, при этом не использовались такие методы анализа концентрации кислорода как энергодисперсионный микроанализ или вторично-ионная масс-спектрометрия.

2. При исследовании содержания кремний-кислородных тетраэдров $Si\text{-}Si_3O$ и $Si\text{-}Si_2O_2$ типа в пленках SIPOS, полученных химическим осаждением из газовой фазы, обнаружена корреляция с моделью случайной смеси в довольно узком диапазоне содержания кислорода (от 8 до 16 ат.%). При этом остается неизвестным характер распределения кремний-кислородных тетраэдров при более высоком содержании кислорода в пленках SIPOS.

3. При исследовании отожженных с помощью ИФО пленок a-SiOx+ncl-Si с исходным содержанием ~15% нанокластеров аморфного кремния по данным рентгеновской дифракции обнаруживаются два типа массивов относительно крупных нанокристаллов кремния с размерами около 10 нм и более 100 нм, при этом по данным ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии в отожженной пленке не обнаружено неокисленного кремния. Объяснения этому факту не дается.

5. Из текста диссертации не следует однозначного представления о том, какой из параметров содержание кислорода в пленке или технология получения образца, в большей степени влияет на распределение кремний-кислородных тетраэдров в композитных пленках Si-SiO_x.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Заключение

Диссертация К.А. Баркова «Атомное и электронное строение, электрические и оптические свойства композитных пленок Si-SiO_x» является законченным исследованием современных востребованных наноструктур, используемых при создании полупроводниковых приборов. Научные результаты, впервые полученные автором, имеют значение для физики полупроводников, важны для понимания изменений в кристаллической структуре и электронно-энергетическом строении полупроводниковых наноструктур в зависимости от способов их формирования. Основные результаты диссертации прошли апробацию в форме докладов и обсуждений на международных и всероссийских конференциях по физике и технике полупроводников, нанотехнологии, физике поверхности, рентгеновской спектроскопии, материаловедению. По теме диссертации К.А. Барков имеет 25 научных работ, из которых 3 статьи в научных издания, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ и индексируемых в базах Scopus и Web of Science. Автореферат правильно и в полном объеме отражает основное содержание диссертации.

В целом, по объему выполненной работы, актуальности полученных результатов, новизне и значимости основных положений, выносимых на защиту, диссертация удовлетворяет 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.

Экспертиза представленной диссертации была проведена на расширенном заседании кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники (ФПЭН)

физического факультета ННГУ. Был заслушан и обсужден доклад соискателя, обсуждался и корректировался проект отзыва, который заранее готовился членами экспертной комиссии. Положительный отзыв ведущей организации одобрен на расширенном заседании 13.09.2022 г., протокол № 4. На заседании присутствовало 17 сотрудников (12 к.ф.-м.н. + 5 д.ф.-м.н.).

Отзыв составили:

Заведующий кафедрой физики полупроводников, электроники и наноэлектроники, ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского", доктор физико-математических наук (1.3.8 - физика конденсированного состояния),

профессор _____ ПАВЛОВ Дмитрий Алексеевич
13 сентября 2022 г. (pavlov@unn.ru, +7 905 667 2218)

Доцент кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского", кандидат физико-математических наук (1.3.11 - физика полупроводников),

доцент_____ ЕРШОВ Алексей Валентинович
13 сентября 2022 г. (ershov@phys.unn.ru, +7 831 462 33 06)

Управление кадров № 1

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Подпись удостоверяю
13 09 2022 г.
Сотрудник УК

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)

Адрес: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

Телефон: +7 (831) 462-30-03

Электронная почта: unn@unn.ru

Сайт: http://www.unn.ru/