

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
Государственного объединения
«Научно-практический центр
Национальной академии наук
Беларуси по материаловедению»,
член-корреспондент НАН Беларуси,
доктор физ.-мат. наук

В.М. Федосюк

22 09 2022

ОТЗЫВ

ОППОНИРУЮЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Наливайко Олега Юрьевича «**Формирование из газовой фазы функциональных слоёв субмикронных структур интегральных микросхем на основе кремния**» представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

1. СООТВЕТСТВИЕ ДИССЕРТАЦИИ СПЕЦИАЛЬНОСТИ И ОТРАСЛИ НАУКИ

Диссертация Наливайко Олега Юрьевича, посвящена разработке и исследованию комплекса новых технологических процессов и конструктивно-технологических способов получения слоёв Si, Si_{1-x}Ge_x, W для субмикронных структур интегральных микросхем на основе кремния. Объектом исследования являются твердотельные структуры субмикронных интегральных микросхем на основе функциональных слоёв Si, Si_{1-x}Ge_x, полученных из газовой фазы и процессы формирования функциональных слоёв. Предметом исследования являются закономерности, протекающие при формировании функциональных слоев Si, Si_{1-x}Ge_x, W. Таким образом, диссертация Наливайко Олега Юрьевича посвящена актуальной теме, соответствует отрасли технических наук и специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Анализ вынесенных на защиту положений и основных научных результатов диссертации Наливайко О.Ю. показал, что они относятся к пп. 1, 2, 4 и 6 раздела III паспорта специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах (утвержден Приказом ВАК Республики Беларусь от 29 декабря 2016 г. № 342), а именно: «1. Создание (включая разработку конструкций и технологических маршрутов изготовления) и функционирование изделий твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов и систем микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах, нано- и микросенсоров», «2. Физические и технические аспекты модификации изделий и приборов по п. 1», «4, Физические и математические модели изделий, устройств и технологических процессов по п. 1, в том числе для систем автоматизированного проектирования» и

«6. Теоретические и экспериментальные аспекты интеграции твердотельных приборных микро- и наноструктур и биологических объектов для создания систем обработки информации». Согласно разделу, VII этого же паспорта, работа соответствует отрасли технических наук, так как выполненные в работе исследования связаны с техническими аспектами создания, функционирования и модификации твердотельных изделий микро- и нанoeлектроники, а также с применением их в науке и технике. Таким образом, рассматриваемая работа полностью соответствует отрасли науки, по которой она представлена к защите – технические науки, и специальности 05.27.01– Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

2. НАУЧНЫЙ ВКЛАД СОИСКАТЕЛЯ В РЕШЕНИЕ НАУЧНОЙ ЗАДАЧИ С ОЦЕНКОЙ ЕГО ЗНАЧИМОСТИ

Научный вклад Наливайко О.Ю. заключается в получении новых теоретических и экспериментальных результатов по установлению закономерностей процессов осаждения из газовой фазы функциональных слоёв (ПКЛФ, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, вольфрама), разработке усовершенствованных методов создания субмикронных структур интегральных микросхем на основе кремния.

Установлено, что энергия активации процесса осаждения плёнок поликристаллического кремния, легированных фосфором в процессе роста (ПКЛФ), уменьшается с 1,50 до 1,32 эВ при увеличении соотношения объёмных потоков PH_3/SiH_4 (γ) от 0 до 0,001, что обусловлено конкурирующей адсорбцией моносилана и фосфина на одних и тех же адсорбционных центрах.

Предложен двухстадийный способ осаждения плёнок ПКЛФ, обеспечивающий снижение шероховатости поверхности плёнки до 2,1 нм, удельное сопротивление 600 – 1000 мкОм×см при скорости осаждения 2,2 – 2,5 нм/мин. Предложено использовать двухслойную структуру ПКЛФ, состоящую из высоколегированного слоя поликремния и слоя нелегированного поликремния для получения резисторов полицида титана шириной 0,35 мкм с удельным сопротивлением не более 23 мкОм×см.

Разработан способ осаждения слоёв $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, толщиной от 20 до 25 нм с содержанием германия от 4 до 20 ат. %. Впервые получена матрица нанокристаллов германия, инкорпорированных в оксид кремния, сегрегационным оттеснением атомов Ge фронтом окисления $\text{SiO}_2/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и по границам зёрен при термическом окислении слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, полученного химическим осаждением из газовой фазы при пониженном давлении.

Предложен способ формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными оксидом кремния, осаждённым при субатмосферном давлении, обеспечивающий уменьшение ширины межкомпонентной изоляции до 0,5 мкм и снижение высоты топологического рельефа до 0,02 – 0,05 мкм.

Экспериментально обоснованы режимы формирования слоёв вольфрама, обеспечивающие формирование равномерного зародышевого слоя вольфрама, исключение образования пустот в контактных окнах, что позволяет формировать двух- и трёхуровневые соединения субмикронных ИМС с контактными сопротивлениями между уровнями не более 24 Ом/мкм², а к активным областям и поликремнию – не более 120 Ом/мкм².

Таким образом, соискатель в полной мере решил поставленную научную задачу, а полученные результаты являются значимым вкладом в разработку и практическую реализацию технологических процессов для создания субмикронных ИМС на пластинах диаметром 200 мм.

3. КОНКРЕТНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (С УКАЗАНИЕМ ИХ НОВИЗНЫ И ПРАКТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ), ЗА КОТОРЫЕ СОИСКАТЕЛЮ МОЖЕТ БЫТЬ ПРИСУЖДЕНА ИСКАМАЯ УЧЕНАЯ СТЕПЕНЬ

Диссертационная работа Наливайко О.Ю. представляет собой комплексное исследование и выполнено на высоком научном уровне. Полученные автором с применением современных методов исследования научные результаты являются обоснованными, обладают научной новизной и нашли практическое применение в действующих технологических процессах производства субмикронных ИМС на пластинах диаметром 200 мм. Автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах за результаты, включающие:

1. Экспериментально установленную зависимость энергии активации (E_a) процесса осаждения плёнок ПКЛФ от отношения объёмных потоков PH_3/SiH_4 (γ), состоящая в уменьшении E_a с 1,50 до 1,32 эВ при увеличении γ от 0 до 0,001, а также увеличении степени заполнения адсорбционных центров молекулами моносилана при снижении температуры и γ , что при осаждении легированных плёнок кремния в аморфном состоянии при температуре 540 – 560 °С и давлении 53 – 106 Па на подслое нелегированного аморфного кремния обеспечивает после проведения активирующего отжига снижение шероховатости поверхности плёнки до 2,1 нм (в 5 раз ниже, чем для плёнок ПК), удельное сопротивление 600 – 1000 мкОм×см при скорости осаждения ПКЛФ 2,2 – 2,5 нм/мин.

2. Разработку способа создания матрицы нанокристаллов германия, инкорпорированных в оксид кремния, с гистерезисом ВФХ 1,7 – 1,8 В, плотностью токов утечки $1,5 \times 10^{-16}$ – $2,2 \times 10^{-16}$ А/мкм², методом сегрегационного отеснения атомов Ge фронтом окисления $\text{SiO}_2/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, и по границам зёрен при термическом окислении слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, полученного химическим осаждением из газовой фазы при пониженном давлении, с толщиной 20 – 25 нм и содержанием Ge 5 – 20 ат.%, с последующим осаждением защитного слоя нитрида кремния толщиной 1,5 – 3,0 нм и использованием в качестве верхнего электрода слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с содержанием Ge 20 – 30 ат.%, легированного ионной имплантацией фосфора при энергии 30 и 60 кэВ с дозой 2×10^{15} см⁻² с активирующим отжигом при (600 ± 10) °С.

3. Экспериментально установлено, что увеличение температуры отжига оксида кремния, осаждённого при субатмосферном давлении, до 1050 °С позволяет уменьшить соотношение скоростей травления «субатмосферного» оксида кремния и термически выращенного оксида кремния до 1,28 – 1,40 и обеспечивает удаление слоёв оксида кремния с поверхности подложки без увеличения высоты топологического рельефа и предложенный способ формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными оксидом кремния, осаждённым при субатмосферном давлении, обеспечивающий уменьшение ширины межкомпонентной изоляции до 0,5 мкм и снижение высоты топологического

рельефа до 0,02 – 0,05 мкм за счёт исключения термического окисления монокристаллического кремния.

4. Экспериментально обоснованные режимы формирования слоёв вольфрама, включающие обработку поверхности адгезионного слоя Ti/TiN в среде моносилана перед первой стадией осаждения вольфрама при потоке моносилана, равном 40 – 100 см³/мин, и длительности обработки, равной 25 – 40 с, с последующим осаждением зародышевого и основного слоёв вольфрама, что обеспечивает формирование равномерного зародышевого слоя вольфрама (с размером зёрен менее 0,1 мкм), исключает образование пустот в контактных окнах и позволяет формировать двух- и трёхуровневые соединения субмикронных ИМС с контактными сопротивлениями между уровнями не более 24 Ом/мкм², а к активным областям и поликремнию – не более 120 Ом/мкм².

Выносимые на защиту результаты диссертационных исследований являются новыми, подтверждены публикациями, в том числе в иностранных изданиях, докладывались и обсуждались на ряде международных конференций, подтверждены 12 патентами Республики Беларусь на изобретения, а также актами внедрения в производство.

Экономический потенциал результатов работы заключается в возможности перехода к новым технологиям формирования интегральных микросхем на основе кремния, отличающихся сниженными энергозатратами и себестоимостью, так как метод не требует высоких температур и сложного технологического оборудования. Разработанные процессы получения слоев кремния, Si_{1-x}Ge_x и вольфрама отличаются высокой воспроизводимостью низким расходом материалов. Область применения полученных результатов может быть расширена и включать не только производство интегральных микросистем, радиоматериалов, но также и процессы химического синтеза и катализа, авто- и авиапромышленность.

4. СООТВЕТСТВИЕ НАУЧНОЙ КВАЛИФИКАЦИИ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ, НА КОТОРУЮ ОН ПРЕТЕНДУЕТ

Представленная диссертация соответствует пунктам 3.1, 3.2. и 3.5 паспорта специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» в области технических наук, требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и профилю совета по защите диссертаций Д 02.15.03.

Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, или при его определяющем вкладе. Достоверность полученных результатов опирается на физическую обоснованность выбранных методов исследования, используемого измерительного оборудования и сопоставления полученных результатов с данными, представленными в литературе. Автореферат в полной мере отражает содержание работы, ее актуальность, новизну и практическую значимость. Соискателем опубликовано 47 научных работ, из них 2 монографии, 3 главы в книгах, 8 статей в научных журналах по требованиям ВАК РБ, 2 депонированные статьи, 12 статей в рецензируемых сборниках и материалах конференций; 8 тезисов докладов на конференциях, 12 патентов на изобретения Республики Беларусь.

На основе результатов диссертации расширен производственный потенциал ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (акт о практическом использовании результатов исследований в промышленности от 20.03.2015 и акт внедрения

способа формирования межкомпонентной изоляции элементов интегральных микросхем от 17.12.2018). Результаты исследований рекомендуется использовать в электронной промышленности организациями, занимающимися производством ИМС с проектными нормами 0,35 – 0,5 мкм.

Все это позволяет сделать вывод, что научная квалификация Наливайко Олег Юрьевич соответствует ученой степени кандидата технических наук.

5. НЕДОСТАТКИ И ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Недостаточно внимания уделено анализу библиографических источников авторов, представляющих страны СНГ и ближнего зарубежья за последние 5 лет.

В третьей главе диссертационной работы желательно было бы привести результаты по расчету значений параметров кристаллической решетки слоев сплавов $Si_{1-x}Ge_x$ и сравнить с опубликованными данными.

Желательно было бы провести исследования о временной стабильности характеристик МОП-структур.

При интерпретации результатов исследования ГКР спектров отсутствует сопоставление с литературными данными.

В диссертационной работе и автореферате имеются отдельные опечатки и неточности. Например:

- 1) На стр. 149 напечатано ... «Рисунок 4.24. - СЗМ – изображения...». Следовало бы ... «Рисунок 4.24. – Двухмерное и трёхмерное СЗМ – изображения...»,
- 2) Стр. 37 – «... имеет плохую адгезии ...», стр.116 – «... контактных окон к активным областям ...».

Приведенные выше замечания не затрагивают основных положений и выводов, имеющих в диссертации, не снижают научной, практической и социальной значимости полученных результатов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ диссертации и автореферата Наливайко Олега Юрьевича позволяет сделать следующее заключение.

Диссертационная работа Наливайко Олега Юрьевича, выполненная под научным руководством доктора технических наук, доцента, начальника управления электроники и приборостроения, электротехнической и оптико-механической промышленности Министерства промышленности Республики Беларусь Турцевича Аркадия Степановича, представляет собой законченный научный труд, отвечает требованиям ВАК Беларуси, предъявляемым к кандидатским диссертациям в области технических наук, соответствует п.п. 19-21, 23, 24 и 26 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь» и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Наливайко Олега Юрьевича заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук за разработку новых конструктивно-технологических процессов получения пленок кремния, $Si_{1-x}Ge_x$ и вольфрама из газовой фазы для применения в субмикронных структурах интегральных микросхем на основе кремния, включающих:

установленные закономерности формирования микроструктуры и электрических свойств функциональных слоев Si, Si_{1-x}Ge_x и W, кинетику процесса осаждения пленок кремния, легированного фосфором при давлении ниже атмосферного и формирование межкомпонентной изоляции канавками, заполненными оксидом кремния, осажденным при субатмосферном давлении, формирование многоуровневой межкомпонентной разводки с использованием «контактных столбиков» из вольфрама отличающиеся учетом характера микроструктуры, элементного состава и ростовых дефектов, выявлением их роли в формировании физических свойств слоев и МОП структур на их основе от условий получения, что позволило разработать модели роста однослойных пленок, адекватно интерпретировать зависимости структуры и физических свойств от условий получения и химического состава, создать научную основу для разработки новых технологических процессов формирования функциональных слоев кремния, Si_{1-x}Ge_x и вольфрама для субмикронных ИМС на пластинах диаметром 200 мм и устройств обеспечения информационной и экологической безопасности.

Отзыв оппонировавшей организации, подготовленный экспертом д.ф.-м.н., доцентом Гременок В.Ф., назначенным приказом № 18 от 08.09.2022 г., рассмотрен и утвержден на расширенном научном семинаре ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (протокол № 6 от 22.09.2022 г), на котором соискатель Наливайко О.Ю. выступил с докладом.

На заседании присутствовали:

всего – 15 человек, из них – 2 доктора наук и 7 кандидатов наук.

Результаты открытого голосования присутствовавших на заседании, которые имеют ученые степени:

“за” – 9, “против” – нет, “воздержавшихся” – нет.

Председатель научного семинара
Заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.

Ластовский С.Б.

Секретарь научного семинара,
Заведующий лабораторией, к.ф.-м.н., доцент

Радюш Ю.В.

Эксперт,
Заведующий лабораторией, д.ф.-м.н., доцент

Гременок В.Ф.