

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.315.592, 621.38.049.77

**НАЛИВАЙКО**  
Олег Юрьевич

**ФОРМИРОВАНИЕ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
СЛОЁВ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР ИНТЕГРАЛЬНЫХ  
МИКРОСХЕМ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Минск 2022

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и открытом акционерном обществе «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Научный руководитель

**Турцевич Аркадий Степанович**, доктор технических наук, доцент, начальник управления электроники и приборостроения, электротехнической и оптико-механической промышленности Министерства промышленности Республики Беларусь

Официальные оппоненты:

**Мухуров Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорики Государственного научно-производственного объединения «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

**Федосенко Николай Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оптики учреждения образования «Гомельский государственный университет»

Оппонирующая организация

Государственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Защита состоится 06 октября 2022 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 02 » 09 2022 г.

Учёный секретарь совета по защите диссертаций Д 02.15.03  
кандидат технических наук, доцент

Г. А. Пискун

## ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением прогресса в области технологии микроэлектроники является повышение степени интеграции и, как следствие, использование многослойных трёхмерных структур. С повышением степени интеграции уменьшаются топологические размеры элементов интегральных микросхем (ИМС) и зазоры между ними, что приводит к уменьшению глубины резкости при проведении фотолитографии и, следовательно, к возрастанию требований к планарности топологического рельефа структур ИМС. Для снижения токов утечек требуется снижать шероховатость поверхности функциональных слоёв. В связи с изложенным возникает необходимость разработки новых технологических процессов, обеспечивающих требуемую шероховатость поверхности и планарность топологического рельефа.

При создании затворных электродов субмикронных структур требуется использовать поликристаллический кремний, легированный фосфором в процессе роста (ПКЛФ) с низкой шероховатостью поверхности, который обеспечивает формирование слоя в сложных областях топологического рельефа. На смену *LOCOS*-технологии, при которой происходит локальное окисление кремния, пришла технология изоляции «мелкими» канавками, заполненными диэлектриком, позволяющая исключить «птичий клюв», повысить планарность кремниевых структур.

Для повышения надёжности многоуровневой металлизированной разводки требуется глобальная планаризация диэлектрика химико-механической полировкой (ХМП), а также формирование вольфрамовых «столбиков» в контактах. Это позволяет исключить обрывы металлизации, формировать три и более уровней металлизации и обеспечить высокую надёжность.

Возрастает интерес к плёнкам поликристаллического  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , которые являются альтернативой плёнкам поликристаллического кремния (ПК) при изготовлении быстродействующих ИМС из-за более низких температур получения и более высокой подвижности носителей. Кроме того, в настоящее время интенсивно исследуются и разрабатываются новые приборы электронной памяти, использующие в качестве элементов хранения заряда нанокристаллы Si или Ge, встроенные в затвор МОП-транзисторов и расположенные на туннельном диэлектрике (толщиной 3 – 7 нм).

Таким образом, сфера применения функциональных слоёв на основе кремния постоянно расширяется, что обуславливает необходимость установления закономерностей формирования слоёв кремния,  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и их влияния на свойства твердотельных структур на их основе, что является актуальной задачей, имеет важное научное и прикладное значение для развития новых технологий в микроэлектронике.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертации утверждена приказом ректора УО БГУИР № 536-О от 06.12.2013 г. и уточнена по результатам предварительной экспертизы диссертации (заключение утверждено ректором УО БГУИР 15.04.2022). Работы, проведенные в рамках диссертации, соответствуют п. 3. «Промышленные и строительные технологии и производство» («Технологии электронного приборостроения, микроэлектроника, радиоэлектроника, СВЧ-электроника, электротехника») приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг., утверждённым Указом Президента Республики Беларусь № 166 от 22 апреля 2015 г., а также п. 4. «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы» («Микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика») приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг., утверждённым Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 7 мая 2020 г.

Основные этапы исследования выполнялись в УО БГУИР и ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» в рамках следующих научных программ и исследовательских проектов: НИР «Разработка и исследование структур Si/SiO<sub>2</sub>/Si с двумерными массивами нанокристаллов Ge для энергонезависимых элементов памяти» ГКПНИ «Электроника» «Разработка и исследование техпроцесса создания структур Si/SiO<sub>2</sub>/Si с двумерными массивами нанокристаллов Ge» (30.04.2006 – 30.12.2006, № г.р. 20065350); НИР «Создание МОП-структур с гистерезисными свойствами на основе инкорпорированных в SiO<sub>2</sub> нанокристаллов Ge» (29.05.2009 – 30.12.2009, № г.р. 20093094); НИР «Создание МОП-структур для энергонезависимых элементов памяти с использованием поли-SiGe-затвора» (01.04.2010 – 30.12.2010, № г.р. 20093094); НИР «Исследование и разработка технологических процессов для формирования фотодиодов на основе SiGe» (01.04.2012 – 30.12.2013, № г.р. 20123357); НИР «Разработка технологического процесса изготовления высокоскоростных фотодетекторов на основе кремний-германиевых гетероструктур» задания 1.2.09 «Исследование оптоэлектронных методов генерации СВЧ-сигналов и разработка высокоскоростных волоконно-оптических модулей и устройств для систем радиолокации, радиосвязи и измерительной техники» (01.04.2014 – 30.12.2015, № г.р. 20141953); НИР БРФФИ-РФФИ № Т16Р-167 «Исследование процессов формирования и электрофизических свойств гетероструктур PtSi/poly-Si для разработки на их основе микроболометров» (2016 – 2018, № г.р. 20163109); НИР БРФФИ-РФФИ № Т18Р-190 «Плазмонные приёмники инфракрасного излучения на основе структур диэлектрик/поли-Si(Ge)/металл» (2018 – 2020, № г.р. 20181511).

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является разработка и исследование комплекса новых технологических процессов и конструктивно-технологических способов получения слоёв Si, Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, W для субмикронных структур интегральных микросхем на основе кремния.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- исследовать кинетику процесса осаждения из газовой фазы плёнок поликристаллического кремния, легированных фосфором в процессе роста в реакторе пониженного давления (давление ниже атмосферного);
- разработать способ формирования нанокристаллов Ge, инкорпорированных в оксид кремния;
- исследовать режимы и разработать способ формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными диэлектриком для ИМС с проектными нормами 0,25 – 0,35 мкм;
- разработать технологические процессы осаждения и химико-механической полировки плёнок вольфрама, а также способ формирования многоуровневой разводки субмикронных ИМС с использованием контактных «столбиков» из вольфрама.

*Объект исследования* – твердотельные структуры субмикронных интегральных микросхем на основе функциональных слоёв Si, Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, W, полученных из газовой фазы, и процессы формирования функциональных слоёв.

*Предмет исследования* – закономерности процессов, протекающих при формировании функциональных слоев Si, Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, W.

### **Научная новизна**

1. Экспериментально установлено, что энергия активации процесса осаждения плёнок поликристаллического кремния, легированных фосфором в процессе роста, уменьшается с 1,50 до 1,32 эВ при увеличении соотношения объёмных потоков PH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub> ( $\gamma$ ) от 0 до 0,001, что обусловлено конкурирующей адсорбцией моносилана и фосфина на одних и тех же адсорбционных центрах. При осаждении легированных плёнок кремния в аморфном состоянии на подслое нелегированного аморфного кремния обеспечивается снижение шероховатости плёнок ПКЛФ до 2,1 нм (за счёт плоского габитуса зёрен после проведения активирующего отжига). Установлено, что использование двухслойной структуры, состоящей из высоколегированного слоя ПК и слоя нелегированного ПК, позволяет получить резисторы полицида (ПК-силицид) титана шириной 0,35 мкм с удельным сопротивлением не более 23 мкОм×см.

2. 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 с толщиной 20 – 25 нм и содержанием Ge 5 – 20 ат.%. Установлено, что для снижения плотности токов утечки МОП-структуры необходимо капсулировать матрицу нанокристаллов Ge защитным слоем нитрида кремния толщиной 1,5 – 3,0 нм, а в качестве управляющего электрода использовать слой  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с содержанием Ge 20 – 30 ат.%, что позволяет уменьшить плотность токов утечки до  $1,5 \times 10^{-16}$  –  $2,2 \times 10^{-16}$  А/мкм<sup>2</sup> и обеспечить гистерезис вольтфарадных характеристик (разность хода между прямой и обратной ветвями (ВФХ) МОП-структуры 1,7 – 1,8 В.

3. Экспериментально установлено, что увеличение температуры отжига оксида кремния, осаждённого при субатмосферном давлении (~60 000 Па), 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. 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 за счёт исключения термического окисления монокристаллического кремния.

4. Установлено, что для формирования однородного зародышевого слоя вольфрама, исключения образования пустот при заполнении контактных окон вольфрамом необходимо исключить образование в зародышевом слое вольфрама зёрен размером более 0,1 мкм, что достигается за счёт обработки поверхности адгезионного слоя Ti/TiN в среде моносилана перед первой стадией осаждения при потоке моносилана, равном 40 – 100 см<sup>3</sup>/мин, и длительности обработки, равной 25 – 40 с, и при использовании силицида и полицида титана обеспечивает формирование двух- и трёхуровневых соединений субмикронных ИМС с контактными сопротивлениями между уровнями не более 24 Ом/мкм<sup>2</sup>, а к активным областям и поликремнию – не более 120 Ом/мкм<sup>2</sup>.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Экспериментально установленная зависимость энергии активации ( $E_a$ ) процесса осаждения плёнок ПКЛФ от отношения объёмных потоков  $\text{PH}_3/\text{SiH}_4$  ( $\gamma$ ), состоящая в уменьшении  $E_a$  с 1,50 до 1,32 эВ при увеличении  $\gamma$  от 0 до 0,001, а также увеличении степени заполнения адсорбционных центров молекулами моносилана при снижении температуры и  $\gamma$ , что при осаждении легированных плёнок кремния в аморфном состоянии при температуре 540 – 560 °С и давлении 53 – 106 Па на подслой 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. Способ формирования матрицы нанокристаллов Ge, 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/мкм<sup>2</sup>, методом сегрегационного оттеснения атомов Ge фронтом окисления SiO<sub>2</sub>/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, и по границам зёрен при термическом окислении слоя Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, 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 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> с содержанием Ge 20 – 30 ат.%, легированного ионной имплантацией фосфора при энергии 30 и 60 кэВ с дозой  $2 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup> с активирующим отжигом при  $(600 \pm 10)$  °С.

3. Способ формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными оксидом кремния, для ИМС с проектными нормами 0,25 – 0,35 мкм, в котором для заполнения канавок используются плёнки оксида кремния, осаждённого при субатмосферном давлении, с последующей химико-механической полировкой и уплотнением при температуре 950 – 1050 °С, обеспечивающим выравнивание скоростей травления «субатмосферного» и термически выращенного оксида кремния и равномерное удаление слоёв оксида кремния с поверхности подложки, что позволяет уменьшить ширину межкомпонентной изоляции с 0,75 до 0,5 мкм и снизить высоту топологического рельефа с 0,25 до 0,02 – 0,05 мкм.

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 см<sup>3</sup>/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/мкм<sup>2</sup>, а к активным областям и поликремнию – не более 120 Ом/мкм<sup>2</sup>.

#### **Личный вклад соискателя учёной степени**

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Представленные в работе теоретические и практические результаты, а также положения, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно. Эксперимен-

тальные исследования, описанные в работе, выполнялись автором лично или при его непосредственном участии. Постановка задач и обсуждение основных результатов работы проводились совместно с научным руководителем, д.т.н., доцентом А. С. Турцевичем. Содействие оказывали д.ф.-м.н., профессор П. И. Гайдук в части проведения электронно-микроскопических исследований, анализа образцов методом резерфордского обратного рассеяния и обсуждения полученных результатов, к.т.н. Г. Г. Чигирь в части исследования вольт-амперных и вольтфарадных характеристик образцов и к.ф.-м.н. В. В. Колос в части формирования  $TiSi_2$  и обсуждения результатов.

Вклад остальных соавторов – академика НАН Беларуси, д.ф.-м.н. С. В. Гапоненко, академика НАН Беларуси, д.ф.-м.н. Ф. Ф. Комарова, член-корреспондента НАН Беларуси, д.т.н. В. А. Емельянова, д.т.н. В. А. Солодухи, к.т.н. В. И. Плебановича, к.т.н. С. М. Завадского, к.ф.-м.н. А. С. Мацукович, В. В. Глухманчука, Н. Г. Циркуновой, В. И. Каленик, А. Г. Новикова, К. В. Чижа, В. И. Рогового, А. Б. Медведевой, В. А. Зайкова, В. М. Борисевича, С. Н. Гринько, Е. Н. Пшеничного, С. Л. Прокопьева, С. Ю. Кивени А. М. Киселя, Г. В. Лепешкевича, Д. В. Жигулина, В. Л. Трусова, Г. М. Панько, В. С. Малышева, А. М. Ярмолика, В. С. Цымбала, А. В. Булыгина, В. Е. Шиколо связан с обсуждением промежуточных результатов, изготовлением тестовых структур и экспериментальных образцов.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: V Белорусско-Российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации», Минск, 2007; 5th International Conference «New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation», Zakopane, 2007; International Conference «Micro- and Nanoelectronics 2007», Moscow, Zvenigorod, 2007; V Международная научно-техническая конференция «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств», Новополоцк, 2008; III, VI, VII, VIII Международные научные конференции «Материалы и структуры современной электроники», Минск, (2008, 2014, 2016, 2018); Научно-технический семинар «Вакуумная техника и технология–2009», Санкт-Петербург, 2009; 8-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск, 2009; IX, X, XII Международные научно-технические конференции «Квантовая электроника», Минск, (2013, 2015, 2019); IV Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», Минск, 2017; 61 International Conference for Students of Physics and Natural Sciences «Open readings 2018», Вильнюс, 2018; 21-й Международный научно-



практический симпозиум «Технологии. Оборудование. Качество», Минск, 2018; I Международная научно-техническая конференция «ОПТО-, МИКРО- И СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА – 2018», Минск, 2018.

Результаты диссертационной работы внедрены в производство субмикронных ИМС на Филиале «Завод полупроводниковых приборов» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 47 научных работах, из которых 2 монографии, 3 главы в книгах, 8 статей в рецензируемых научных журналах, 2 депонированные статьи, 12 статей в сборниках материалов научных конференций и симпозиумов, 8 тезисов докладов на научных конференциях, 12 патентов Республики Беларусь.

Общий объём публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь, составляет 6,5 авторского листа.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырёх глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объём диссертации составляет 199 страниц, из них 99 страниц основного текста, 81 рисунок на 50 страницах, 20 таблиц на 12 страницах, библиографический список из 117 наименований на 8 страницах, список собственных публикаций автора – 47 наименований на 6 страницах, 8 приложений на 24 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

В **первой главе** проведен анализ научно-технической литературы по теме диссертационной работы. Проведен анализ процессов осаждения ПКЛФ химическим осаждением из газовой фазы (ХОГФ). Показано, что в настоящее время при производстве ИМС с субмикронными проектными нормами требуется уменьшение температур для термических обработок.

Рассмотрены методы формирования межкомпонентной изоляции МОП-транзисторов. Показано, что при производстве изделий с проектными нормами 0,35 мкм и ниже на смену технологии локального окисления пришла технология изоляции канавками, заполненными диэлектриком. Определены основные требования к межкомпонентной изоляции ИМС с проектными нормами 0,25 – 0,35 мкм: снижение зазора между компонентами до  $\leq 0,5$  мкм, снижение высоты топологического рельефа до  $< 0,1$  мкм.

Рассмотрено современное состояние и основные проблемы формирования субмикронных структур с многоуровневыми межкомпонентными соединениями. Определены основные требования к многоуровневой металлизации: количество уровней многоуровневой разводки – до трех уровней;

использование силицидов и полицидов для формирования контактов к мелкозалегающим  $p$ - $n$ -переходам и поликремниевым шинам; планаризация топологического рельефа при помощи химико-механической полировки; использование «вольфрамовых столбиков» для соединения соседних уровней металлизации; контактные сопротивления между уровнями металлизации не более 32 Ом/мкм<sup>2</sup>; контактные сопротивления к активным областям и поликремнию не более 160 Ом/мкм<sup>2</sup>; надёжность.

Проведен анализ процессов осаждения плёнок  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и Ge и создания структур на их основе, в том числе структур для энергонезависимой памяти с инкорпорированными массивами самоорганизованных нанокристаллов Ge.

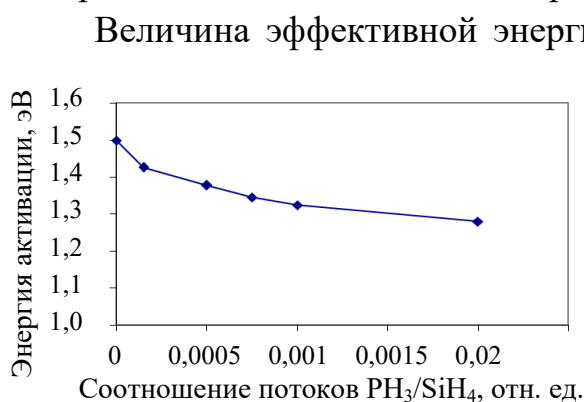
На основании проведённого анализа научно-технической литературы сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** изложены методики формирования функциональных слоёв, описано оборудование, использованное для формирования функциональных слоёв и изготовления экспериментальных образцов: горизонтальные и вертикальные реакторы для осаждения диэлектрических и проводящих плёнок при пониженном давлении (Изотрон-4, НИИТМ, Россия; *A400, ASM*, Нидерланды), реакторы поштучной обработки пластин для осаждения плёнок вольфрама и плазмохимического осаждения диэлектриков (*Precision-5000, Applied Materials*, США), оборудование, используемое для термической обработки плёнок ПК, ПКЛФ,  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , а также методы испытаний ИМС.

Контроль толщины и показателя преломления плёнок ПКК,  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , Ge проводился методом спектрофотометрии, а для тонких плёнок – методом эллипсометрии. Контроль топологических размеров элементов проводился при помощи растровой электронной микроскопии. Контроль поверхностного сопротивления плёнок ПК,  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , W,  $\text{TiSi}_2$  проводили четырёхзондовым методом на установках ЦИУС-1, НПО «Электроника», Россия; *RS-30* и *RS-75, KLA-Tencor*, США. Контроль ВАХ и ВХФ МОП-структур проводили на автоматизированном измерительном комплексе *HP4061B, Hewlett-Packard*, США. Для анализа начальных стадий роста плёнок использовался растровый электронный микроскоп *S4800, Hitachi*, Япония, а также зондовая нанолaborатория *ItegraPrima, NT MDT*, Россия. Для анализа структуры плёнок  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и плотности нанокристаллов Ge использовался просвечивающий электронный микроскоп (образцы на просвет и электронограммы). Контроль содержания Ge в плёнках  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  проводили методом резерфордского обратного рассеяния с использованием ионов  $\text{He}^+$  с энергией 1 – 1,5 МэВ и с применением наклонной геометрии на ускорительном комплексе *AN2500, High Voltage Engineering Europe B.V.*, Нидерланды.

В **третьей главе** представлены результаты исследования процессов осаждения при пониженном давлении плёнок ПКЛФ,  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

Исследована кинетика осаждения плёнок ПКЛФ на пластинах диаметром 200 мм в зависимости от температуры осаждения, давления и соотношения потоков  $\text{PH}_3/\text{SiH}_4$  ( $\gamma$ ). По результатам теоретических и экспериментальных исследований установлено, что повышение скорости осаждения плёнок ПКЛФ может быть достигнуто за счёт повышения степени заполнения адсорбционных центров молекулами моносилана при снижении  $\gamma$  до  $\leq 0,002$ , так как при более низких  $\gamma$  еще не происходит полное блокирование адсорбции моносилана молекулами фосфина. При осаждении ПКЛФ при температуре 540 – 560 °С и  $\gamma \leq 0,002$  достигается более высокий уровень легирования плёнок ПКЛФ и равномерное распределение легирующей примеси, а также улучшается конформность воспроизведения топологического рельефа (равномерность толщины на сложном рельефе).



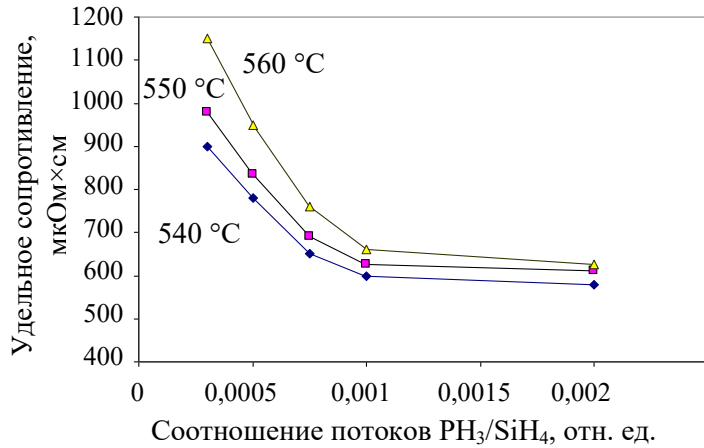
**Рисунок 1. – Зависимость энергии активации процесса осаждения ПК от соотношения потоков  $\text{PH}_3/\text{SiH}_4$**

Величина эффективной энергии активации процесса осаждения нелегированного кремния при давлении 80 Па составляет 1,50 эВ. При введении в реактор фосфина величина эффективной энергии активации процесса осаждения плёнок ПКЛФ снижается до 1,32 эВ при  $\gamma$ , равном 0,001 (рисунок 1). С целью снижения шероховатости поверхности осаждаемой плёнки было опробовано осаждение на кремниевую подложку подслоя нелегированного аморфного кремния

при температуре 540 – 560 °С и давлении 35 – 50 Па и осаждение аморфного легированного слоя кремния при той же температуре и давлении 53 – 106 Па. Плёнки, осаждённые при вышеуказанных условиях при скорости осаждения 2,2 – 2,5 нм/мин, после осаждения имеют аморфную структуру со средней шероховатостью не более 2,1 нм за счёт плоского габитуса зёрен (после активирующего отжига при 950 °С для плёнки толщиной 0,25 мкм), что в 5 раз ниже, чем у плёнок ПК.

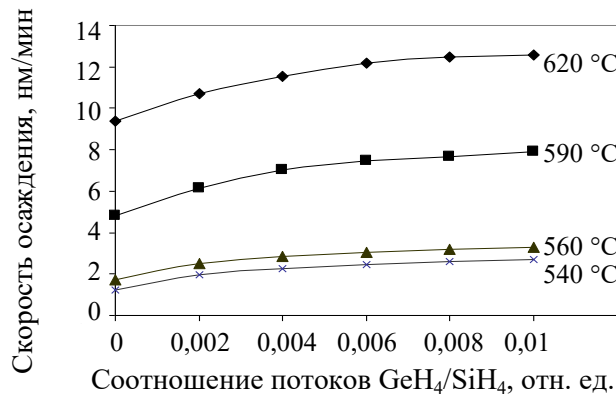
Зависимости удельного электросопротивления плёнок ПКЛФ от  $\gamma$  при различных температурах осаждения представлены на рисунке 2. При температуре 550 °С с увеличением  $\gamma$  от 0,0003 до 0,001 происходит монотонное уменьшение удельного электросопротивления плёнок ПКЛФ с 980 до 620 мкОм×см, а при дальнейшем увеличении  $\gamma$  удельное электросопротивление выходит на насыщение и практически не изменяется.

Установлено, что использование защитного слоя оксида кремния позволяет исключить обеднение приповерхностного слоя легированного фосфором кремния во время проведения термической обработки.

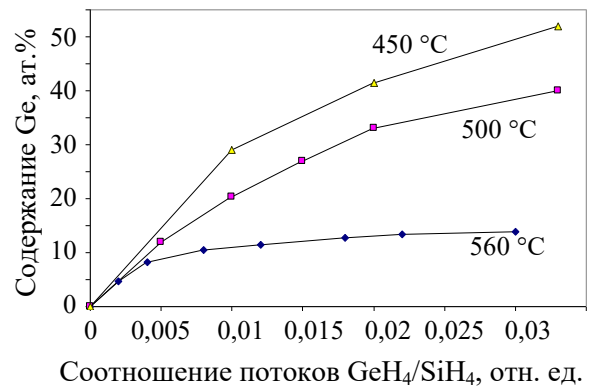


**Рисунок 2.** – Зависимости удельного сопротивления ПКЛФ от соотношения потоков  $\text{PH}_3/\text{SiH}_4$  при различных температурах осаждения

Проведено исследование кинетики процесса осаждения слоёв  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . Установлено, что при введении  $\text{GeH}_4$  в газовую смесь скорость осаждения  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  возрастает (рисунок 3), а граница образования аморфных слоёв смещается в сторону более низких температур ( $<520$  °C). С увеличением  $\gamma$  с 0,004 до 0,03 содержание Ge в слоях  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  монотонно возрастает с 8,3 до 13,7 ат.% при 560 °C и с 12,0 до 52,0 ат.% при 450 °C (рисунок 4). Предложен и разработан оригинальный способ осаждения тонкого слоя  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на зародышевом слое кремния, отличающийся тем, что осаждение зародышевого и основного слоёв проводят при температуре 550 – 560 °C и давлении от 0,05 до 0,15 мм рт. ст., зародышевый слой осаждают толщиной от 1 до 5 нм, а слой  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  – от 5 до 20 нм с содержанием германия от 4 до 20 ат. %.



**Рисунок 3.** – Зависимости скорости осаждения слоёв  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  от соотношения потоков  $\text{GeH}_4/\text{SiH}_4$  при разных температурах осаждения

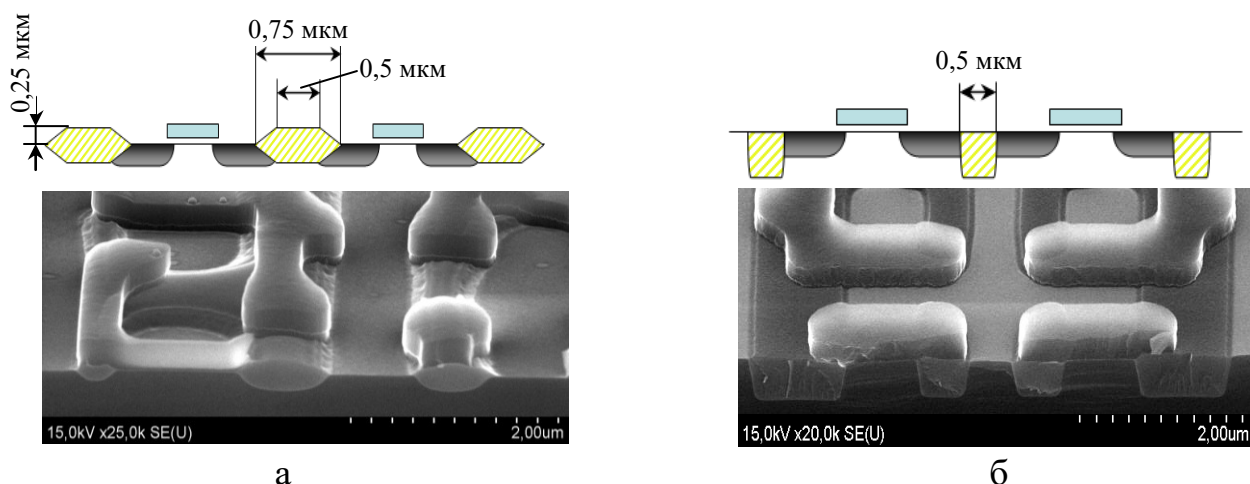


**Рисунок 4.** – Зависимости содержания Ge в слоях  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  от соотношения потоков  $\text{GeH}_4/\text{SiH}_4$  при разных температурах осаждения

В четвертой главе представлены данные о практической реализации результатов исследований. С целью исключения «закоротоков» между проводящими слоями на топологическом рельефе ИМС с проектными нормами 0,35 мкм и ниже разработан способ формирования межкомпонентной изоляции элементов ИМС канавками, заполненными диэлектриком (*STI*-изоляция).

Показано, что для заполнения канавок целесообразно использовать плёнки  $\text{SiO}_2$ , осаждённые при субатмосферном давлении (СА ХОГФ), так как

они заполняют канавки без образования щели и растратов при последующих химических обработках. Установлено, что с увеличением температуры отжига скорость травления субатмосферного оксида кремния уменьшается и при 1050 °С составляет 32 – 35 нм/мин, что в 1,28 – 1,40 раза выше, чем скорость травления термически выращенного оксида кремния, и позволяет проводить удаление слоёв оксида кремния с поверхности без увеличения высоты топологического рельефа. Разработан способ формирования *STI*-изоляции для ИМС с проектными нормами 0,25 – 0,35 мкм, который внедрен при изготовлении изделия СОЗУ 1 Мбит (статическое оперативное запоминающее устройство) по 0,35 мкм КМОП-процессу. При формировании *STI*-изоляции обеспечивается получение структуры с планарным рельефом (рисунок 5). По сравнению с изоляцией локальным окислением (*LOCOS*) с промежуточным поликремниевым слоем высота рельефа структуры уменьшается с 0,25 до 0,02 – 0,05 мкм, а ширина изоляции – с 0,75 до 0,50 мкм, что позволяет повысить плотность упаковки и степень интеграции.

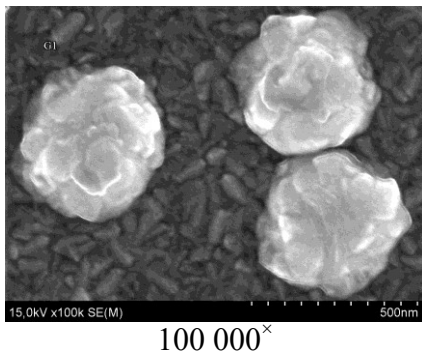


**Рисунок 5. – РЭМ-фотографии структуры после ПХТ затвора с изоляцией *LOCOS* с промежуточным поликремниевым слоем (а) и с *STI*-изоляцией (б)**

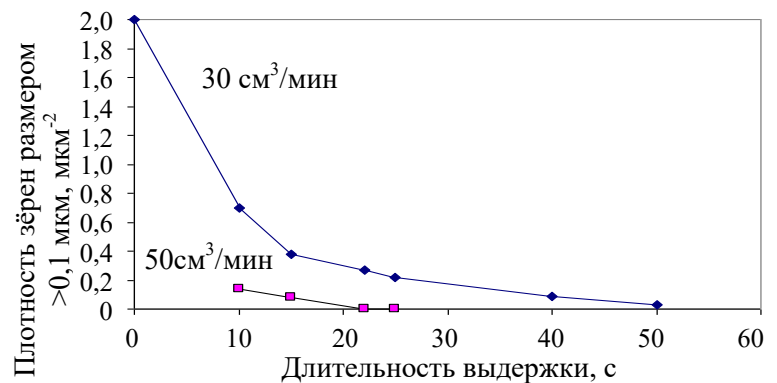
Разработан и внедрен в производство изделий с проектными нормами 0,35 – 0,60 мкм комплекс технологических процессов для формирования твердых структур субмикронных интегральных микросхем на пластинах Ø 200 мм. Показано, что использование плёнок ПКЛФ позволяет исключить трудоёмкую операцию ионного легирования плёнок поликристаллического кремния, снизить высоту топологического рельефа, уменьшить контактные электросопротивления, повысить выход годных. Установлено, что использование двухслойной структуры, состоящей из высоколегированного слоя ПК и слоя нелегированного ПК, позволяет получить резисторы полицида титана шириной 0,35 мкм с удельным сопротивлением не более 23 мкОм×см.

Проведено исследование влияния длительности обработки пластин в среде SiH<sub>4</sub> и потока SiH<sub>4</sub> на однородность зародышеобразования вольфрама

на установке *Precision-5000WCVD* (рисунок 6). Атомарный слой кремния, образовавшийся во время выдержки в среде  $\text{SiH}_4$ , способствует уменьшению времени, необходимого для инициации зародышеобразования, так как при подаче в реакционную камеру  $\text{SiH}_4$  и  $\text{WF}_6$  гексафторид вольфрама вначале взаимодействует с монослоем кремния, потому что эта реакция имеет наименьшую энергию активации. Затем преобладает реакция восстановления  $\text{WF}_6$  моносиланом, которая имеет меньшую энергию активации по сравнению с реакцией восстановления  $\text{WF}_6$  водородом. Экспериментально установлено, что плотность зёрен вольфрама размером более 0,1 мкм с увеличением длительности обработки поверхности адгезионного слоя Ti/TiN в среде моносилана уменьшается и при потоке моносилана, равном 40 – 100  $\text{см}^3/\text{мин}$ , и длительности обработки, равной 25 – 40 с, образование таких зёрен вольфрама исключается (рисунок 7), обеспечивается формирование равномерного тонкого зародышевого слоя W, исключается образование пустот и улучшается заполнение контактных окон плёнками вольфрама.



**Рисунок 6.** – Поверхность пластины после проведения зародышеобразования вольфрама без выдержки в среде  $\text{SiH}_4$

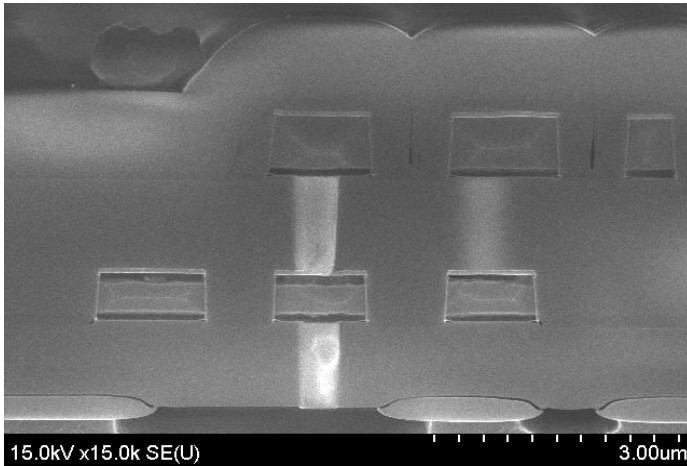


**Рисунок 7.** – Зависимость плотности зёрен вольфрама размером более 0,1 мкм от длительности обработки в среде моносилана при разных потоках

Разработан и запатентован оригинальный способ осаждения плёнок вольфрама, обеспечивающий заполнение контактных окон без образования полостей, который используется в производстве ИМС с проектными нормами 0,35 – 0,60 мкм на пластинах  $\varnothing$  200 мм и 0,8 – 1,2 мкм на пластинах  $\varnothing$  150 мм.

Установлено что для заполнения контактных окон диаметром от 0,35 до 0,70 мкм предпочтительнее использовать плёнки вольфрама толщиной 0,4 мкм. При этом средний уход толщины межслойного диэлектрика снижается в 1,5 – 1,8 раза, повышается выход годных кристаллов. Определены условия процесса ХМП вольфрама на установке *Auriga EC*, обеспечивающие скорость полировки >330 нм/мин, селективность полировки вольфрама по отношению к  $\text{SiO}_2$  >100 и отсутствие вибрации:

- скорость вращения полировального стола – 8 – 10 об./мин;
- усилие прижима носителя пластины – 2,83 – 3,19 Н/см<sup>2</sup>.



**Рисунок 8. – РЭМ-фотографии двухуровневой металлизации с вольфрамовыми контактными столбиками**

Разработан способ формирования многоуровневой разводки для субмикронных ИМС (рисунок 8), включающий чередование операций осаждения и ХМП межслойного диэлектрика, формирование контактных окон, осаждения адгезионных/барьерных слоёв (Ti/TiN), осаждение сплошной плёнки вольфрама с последующим удалением плёнки вольфрама с поверхности путём ХМП и формирования межком-

понентных соединений на основе алюминия с использованием разработанных процессов осаждения и ХМП плёнок вольфрама и слоёв силицидов и полицидов металлов, что позволяет создавать двух- и трёхуровневые соединения с контактными сопротивлениями между уровнями не более 24 Ом/мкм<sup>2</sup>, а к активным областям и поликремнию – не более 120 Ом/мкм<sup>2</sup>. Это позволило освоить производство ИМС с проектными нормами 0,35 – 0,60 мкм на пластинах Ø 200 мм. С целью снижения затрат на изготовление в блок формирования многоуровневой металлизации на пластинах Ø 150 мм в 2019 году внедрены операции осаждения плёнок вольфрама и сквозного плазмохимического травления плёнок вольфрама.

С целью обеспечения возможности исследования и разработки новых приборов электронной памяти, использующих в качестве элементов хранения заряда (информации) нанокристаллы Ge, встроенные в затвор МОП-транзисторов и расположенные на туннельном диэлектрике (толщиной 5 нм), разработан оригинальный способ формирования нанокристаллов Ge, инкорпорированных в оксид кремния, сегрегационным оттеснением атомов Ge фронтом окисления SiO<sub>2</sub>/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> и по границам зёрен при термическом окислении слоя Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, полученного химическим осаждением из газовой фазы при пониженном давлении, с толщиной 20 – 25 нм и содержанием Ge 5 – 20 ат.% (рисунок 9). В пользу данного механизма свидетельствует расположение нанокристаллов Ge ближе к нижней границе раздела и пропорциональность плотности нанокристаллов Ge плотности зёрен слоя Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>.

Установлено, что для исключения окисления нанокристаллов Ge и снижения плотности токов утечки МОП-структуры необходимо использовать

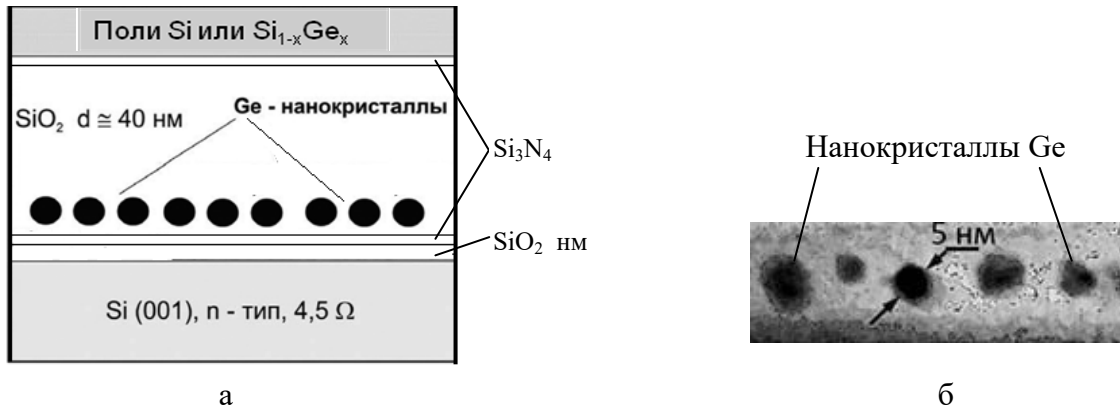


Рисунок 9. – Схема МОП-структуры с нанокристаллами Ge (а) и фрагмент нижней четверти поперечного сечения оксида кремния с нанокристаллами Ge (б)

защитный слой нитрида кремния толщиной 1,5 – 3,0 нм, а в качестве управляющего электрода – слой  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с содержанием Ge 20 – 30 ат.%, легированный фосфором, с активирующим отжигом при  $600 \pm 10$  °С, что позволяет уменьшить плотность токов утечки до  $1,5 \times 10^{-16} - 2,2 \times 10^{-16}$  А/мкм<sup>2</sup> и обеспечить гистерезис вольтфарадных характеристик МОП-структуры 1,7 – 1,8 В.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Исследована кинетика процесса осаждения плёнок ПКЛФ в диапазоне температур 540 – 650 °С с использованием фосфина и концентрированного моносилана. Установлено, что повышение скорости осаждения плёнок ПКЛФ может быть достигнуто за счёт повышения степени заполнения адсорбционных центров молекулами моносилана при снижении соотношения объёмных потоков  $\text{PH}_3/\text{SiH}_4$  ( $\gamma$ ), так как при более низких значениях  $\gamma$  ( $< 0,002$ ) еще не происходит полное блокирование адсорбции моносилана молекулами фосфина. При осаждении ПКЛФ при температуре 540 – 560 °С и  $\gamma \leq 0,002$  достигается более высокий уровень легирования плёнок ПКЛФ и равномерное распределение легирующей примеси, а также улучшается конформность воспроизведения топологического рельефа [8, 10].

2. Экспериментально установлено, что энергия активации процесса осаждения ПКЛФ уменьшается с 1,50 до 1,32 эВ при увеличении  $\gamma$  от 0 до 0,001, что обусловлено конкурирующей адсорбцией моносилана и фосфина одних и тех же адсорбционных центрах. Разработан способ осаждения плёнок ПКЛФ, включающий осаждение на кремниевую подложку подслоя аморфного нелегированного кремния толщиной 10 – 50 нм при температуре 540 – 560 °С и давлении 35 – 80 Па и осаждение аморфного легированного слоя кремния при той же температуре и давлении 53 – 106 Па с последующим осаждением защитного слоя  $\text{SiO}_2$  толщиной 20 – 200 нм и проведением



термообработки осажденной плёнки в среде азота при 850 – 1000 °С, который обеспечивает снижение шероховатости поверхности плёнки до 2,1 нм (за счёт плоского габитуса зёрен после проведения активирующего отжига), удельное сопротивление 600 – 1000 мкОм×см при скорости осаждения 2,2 – 2,5 нм/мин. Использование плёнок ПКЛФ позволило исключить трудоёмкую операцию ионного легирования плёнок ПК, снизить высоту топологического рельефа, повысить выход годных структур [1, 3, 5, 8, 26, 27, 35, 39].

3. Установлено, что использование двухслойной структуры, состоящей из высоколегированного слоя ПК и слоя низколегированного ПК, позволяет получить резисторы полицида титана шириной 0,35 мкм с удельным сопротивлением не более 23 мкОм×см [3, 8, 22, 25, 42, 44].

4. Разработан способ формирования нанокристаллов Ge, 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, с толщиной 20 – 25 нм и содержанием Ge 5 – 20 ат.% с последующим осаждением защитного слоя нитрида кремния толщиной 1,5 – 3,0 нм для капсулирования матрицы нанокристаллов и использованием в качестве верхнего электрода слоя  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с содержанием Ge 20 – 30 ат.%, который позволяет получать матрицу нанокристаллов Ge с гистерезисом вольтфарадных характеристик 1,7 – 1,8 В, плотностью токов утечки  $1,5 \times 10^{-16} - 2,2 \times 10^{-16}$  А/мкм<sup>2</sup> [2, 6, 7, 11–13, 15–20, 24, 28–34, 37, 38, 41].

5. Экспериментально установлено, что увеличение температуры отжига оксида кремния, осажденного при субатмосферном давлении, до 1050 °С позволяет уменьшить соотношение скоростей травления «субатмосферного»  $\text{SiO}_2$  и термически выращенного  $\text{SiO}_2$  до 1,28 – 1,40 и обеспечивает удаление оксида кремния с поверхности подложки без увеличения высоты топологического рельефа. Предложен способ формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными оксидом кремния, для ИМС с проектными нормами 0,25 – 0,35 мкм, обеспечивающий уменьшение ширины межкомпонентной изоляции с 0,75 до 0,50 мкм и снижение высоты топологического рельефа с 0,25 до 0,02 – 0,05 мкм за счёт исключения термического окисления монокристаллического кремния [3, 4, 5, 11, 14, 21, 40].

6. Экспериментально установлено уменьшение плотности зёрен вольфрама размером более 0,1 мкм с увеличением длительности обработки поверхности адгезионного слоя Ti/TiN в среде моносилана перед первой стадией осаждения, исключение их образования при потоке моносилана, равном 40 – 100 см<sup>3</sup>/мин, и длительности обработки, равной 25 – 40 с, что способствует формированию однородного зародышевого слоя, исключению образования пустот в контактных окнах и при использовании силицида и полицида

титана обеспечивает формирование двух- и трёхуровневых соединений с контактными сопротивлениями между уровнями не более  $24 \text{ Ом/мкм}^2$ , а к активным областям и поликремнию – не более  $120 \text{ Ом/мкм}^2$  [4, 5, 9, 23, 25, 36, 43, 45–47].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработан и внедрён в производство субмикронных ИМС с проектными нормами  $0,35 - 0,80 \text{ мкм}$  на пластинах  $\varnothing 200 \text{ мм}$  процесс осаждения плёнок ПКЛФ и процесс формирования слоя полицида титана для резисторов шириной  $0,35 \text{ мкм}$ .

2. Разработан и внедрён при изготовлении изделия СОЗУ 1Мбит способ формирования межкомпонентной изоляции элементов интегральных микросхем канавками, заполненными диэлектриком, для ИМС с проектными нормами  $0,35 \text{ мкм}$  и ниже.

3. Разработаны и внедрены в производство ИМС технологические процессы для формирования многоуровневой разводки, включая:

- процесс осаждения плёнок W (на пластинах  $\varnothing 150$  и  $200 \text{ мм}$ );
- процесс химико-механической полировки плёнок вольфрама и способ формирования многоуровневой разводки с контактными «столбиками» из вольфрама (для ИМС с проектными нормами  $0,35 - 0,60 \text{ мкм}$  на пластинах  $\varnothing 200 \text{ мм}$ ). С целью снижения затрат на изготовление в блок формирования многоуровневой металлизации ИМС с проектными нормами  $0,8 - 1,2 \text{ мкм}$  на пластинах  $\varnothing 150 \text{ мм}$  в 2019 г. внедрены операции осаждения плёнок вольфрама и сквозного плазмохимического травления плёнок вольфрама.

4. Внедрён в производство ИМС с проектными нормами  $0,5 \text{ мкм}$  и ниже усовершенствованный способ формирования пассивирующего покрытия для повышения выхода годных и надёжности изделий.

5. Разработанный способ создания нанокристаллов германия, инкорпорированных в оксид кремния, может быть использован для разработки усовершенствованной энергонезависимой памяти (ЭСППЗУ).

В результате проведенных исследований и разработок расширен производственный потенциал ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». За период с 2014 по 2020 г. произведено и поставлено потребителям с субмикронной линии (на пластинах  $\varnothing 200 \text{ мм}$ )  $74,745 \text{ млн шт.}$  ИМС на общую сумму  $21\,528,2 \text{ тыс. дол. США}$ . Изделия поставлялись в страны Юго-Восточной Азии, Российскую Федерацию.

Результаты исследований рекомендуется использовать в электронной промышленности организациями, занимающимися производством ИМС с проектными нормами  $0,35 - 0,5 \text{ мкм}$ .

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ

### Монографии

1. Емельянов, В. А. Оборудование для химического осаждения из газовой фазы функциональных слоев / В. А. Емельянов, А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко. – Минск: Белорусская наука. – 2007. – 255 с.
2. Емельянов, В. А. Эпитаксиальные слои кремния и германия для интегральных микросхем / В. А. Емельянов, А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко. – Минск: Интегралполиграф. – 2008. – 286 с.

### Главы в книгах

3. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии : в 3 т. / под ред. А. С. Турцевича. – Минск: Интегралполиграф. – 2013. – Т. 1, Гл. 6 : Химическое осаждение из газовой фазы / А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко. – С. 545–568.
4. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии : в 3 т. / под ред. А. С. Турцевича // Минск: Интегралполиграф. – 2013. – Т. 3, Гл. 14 : Технология планаризации топологического рельефа при производстве УБИС. Химико-механическая полировка / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич. – С. 63–84.
5. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии : в 3 т. / под ред. А. С. Турцевича // Минск: Интегралполиграф. – 2013. – Т. 2, Гл. 13 : Подготовка, контроль и транспортировка магистральных газов, химических реагентов, деионизованной воды / О. Ю. Наливайко, А. Б. Медведева. – С. 642–729.

### Статьи в рецензируемых научных журналах

6. Начальная стадия роста слоёв поликристаллического кремния, легированного в процессе сраста кислородом / А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко, В. А. Солодуха, В. В. Глухманчук, Н. Г. Циркунова, Г. В. Лепешкевич // Микроэлектроника. – 2008. – Т. 37, № 1. – С. 1–8.
7. Турцевич, А. С. Начальная стадия роста слоёв поликристаллического кремния, легированного в процессе роста кислородом / А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко, П. И. Гайдук // Вакуумная техника и технология. – 2009. – Т. 19, № 1. – С. 25–30.
8. Наливайко, О. Ю. Адсорбционно-кинетическая модель осаждения плёнок поликристаллического кремния, легированного фосфором в процессе роста / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич. – Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – Т. 20, № 6. – С. 50–55.
9. Влияние условий зародышеобразования на процесс осаждения плёнок вольфрама при пониженном давлении / О. Ю. Наливайко,

А. С. Турцевич, В. А. Солодуха, В. И. Каленик // Вакуумная техника и технология. – 2010. – Т. 20, № 2. – С. 105–109.

10. Наливайко, О. Ю. Кинетика процессов осаждения плёнок поликремния, легированного кислородом в процессе роста / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2012. – № 2. – С. 37–41.

11. Наливайко, О. Ю. Получение тонких плёнок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при пониженном давлении на пластинах диаметром до 200 мм / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2012. – № 6. – С. 34–39.

12. Новиков, А. Г. Влияние режимов окисления на характеристики МОП конденсаторов с нанокристаллами Ge / А. Г. Новиков, О. Ю. Наливайко, П. И. Гайдук // Весці НАН Беларусі (сер. фіз.-мат. навук) – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 119–126.

13. Усиление комбинационного рассеяния света с применением Au/Si-Ge- и Au/Ge- наноструктур / А. С. Мацукович, О. Ю. Наливайко, К. В. Чиж, С. В. Гапоненко // Журнал прикладной спектроскопии. – 2019. – Т. 86, № 1. – С. 84–88.

#### Депонированные статьи

14. Формирование межкомпонентной изоляции субмикронных ИМС / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич, В. И. Плебанович, В. И. Роговой, А. М. Ярмолик // Деп. в БелИСА 04.03.2021, № Д202106. – 14 с.

15. Формирование нанокристаллов Ge, внедренных в оксид кремния, сегрегационным оттеснением Ge / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич, П. И. Гайдук, В. И. Плебанович, С. А. Соловьёв // Деп. в БелИСА 17.03.2022, № Д202202. – 11 с.

#### Статьи в сборниках материалов научных конференций

16. Наливайко, О. Ю. Влияние легирующих добавок на процесс зародышеобразования плёнок кремния / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич, Н. Г. Цыркунова // Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств», Новополоцк, 29 – 30 мая 2008 г.: в 3 т. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2008. – Т. 2. – С. 155–158.

17. Структура и фазовый состав тонких плёнок SiGe сплавов, полученных методом газофазного осаждения при пониженном давлении / В. А. Зайков, А. Г. Новиков, О. Ю. Наливайко, П. И. Гайдук, В. М. Борисевич // Сб. науч. тр. III Междунар. науч. конф. «Материалы и структуры современной электроники», Минск. – 25-26 сентября 2008 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2008. – С. 100–104.

18. Структурные и электрофизические свойства тонких  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  плёнок после имплантации  $\text{V}^+$  и последующего отжига / П. И. Гайдук,

С. Н. Гринько, В. А. Зайков, А. Г. Новиков, О. Ю. Наливайко, Е. Н. Пшеничный // Сб. науч. тр. III Междунар. науч. конф. «Материалы и структуры современной электроники», Минск, 25 – 26 сентября 2008 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2008. – С. 179–183.

19. Наливайко, О. Ю. Особенности осаждения тонких плёнок SiGe в реакторе пониженного давления / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич, П. И. Гайдук // Сб. науч. тр. науч.-техн. семина. «Вакуумная техника и технология 2009», Санкт-Петербург, 9 – 11 июня 2009. / СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2009. – С. 59–60.

20. LPCVD осаждение плёнок SiGe и их свойства после легирования ионами  $V^+$  и отжига / В. А. Зайков, П. И. Гайдук, А. Г. Новиков, С. Л. Прокопьев, С. Ю. Кивеня, О. Ю. Наливайко, Е. Н. Пшеничный // Материалы 8-й Междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твёрдым телом», Минск, 23 – 29 сентября 2009. / Минск: БГУ, 2009. – С. 171–173.

21. Формирование межкомпонентной изоляции канавками, заполненными диэлектриком / О. Ю. Наливайко, В. И. Роговой, А. С. Турцевич, А. М. Кисель // Сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф. «Материалы и структуры современной электроники», Минск, 12 – 13 октября 2016 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2016. – С. 102–105.

22. Наливайко, О. Ю. Формирование слоев полицида титана для интегральных микросхем с субмикронными проектными нормами / О. Ю. Наливайко, В. В. Колос, А. С. Турцевич // Сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф. «Материалы и структуры современной электроники», Минск, 12 – 13 октября 2016 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2016. – С. 91–94.

23. Наливайко, О. Ю. Оптимизация процесса химико-механической полировки вольфрама для формирования межсоединений субмикронных ИМС / О. Ю. Наливайко, В. И. Роговой, А. С. Турцевич // Сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф. «Материалы и структуры современной электроники», Минск, 12 – 13 окт. 2016 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2016. – С. 95–98.

24. Исследование начальных стадий роста плёнок  $Si_{1-x}Ge_x$  в горизонтальном реакторе пониженного давления / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич, Г. В. Лепешкевич, Д. В. Жигулин, В. О. Наливайко // Материалы четвертой Междунар. науч.-практ. конф. «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», Минск, 11 – 12 мая 2017 г. / Минск: РИВШ, 2017. – С. 276–278.

25. Наливайко, О. Ю. Создание многоуровневой металлизации вольфрамовыми столбиками на основе функциональных слоёв, полученных

из газовой фазы / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич // Сб. докладов Междунар. симп. «Технологии, оборудование, качество», Минск, 29 мая – 01 июня 2018 г. / Минск: БНТУ, 2018. – С. 155–159.

26. Осаждение пленок оксида кремния с использованием плазменной активации при производстве интегральных схем / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич, Г. В. Лепешкевич, Е. Н. Пшеничный // Материалы и структуры современной электроники: материалы VIII Междунар. науч. конф., Минск, 10-12 октября 2018 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2018. – С. 86–91.

27. Осаждение из газовой фазы при пониженном давлении тонких слоёв оксида кремния с использованием тетраэтоксисилана для субмикронных ИС / О. Ю. Наливайко, В. А. Солодуха, В. В. Колос, В. Л. Трусов // Материалы Первой междунар. науч.-техн. конф. «ОПТО-, МИКРО- И СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА – 2018», Минск, 22-26 октября 2018 / Минск: Инст. физики им. Б. И. Степанова, 2018. – С. 160–163.

#### **Тезисы в сборниках материалов научных конференций**

28. Особенности процесса осаждения слоёв SiGe в системе SiH<sub>4</sub>-GeH<sub>4</sub> / О. Ю. Наливайко, Е. Н. Пшеничный, А. С. Турцевич, В. И. Плебанович, Г. М. Панько // Материалы докладов V Белорусско-Российской науч.-техн. конф. «Технические средства защиты информации», Минск, 28 мая – 1 июня 2007 г. / Минск, 2007. – С. 83.

29. Структура плёнок SiGe, осажденных при пониженном давлении / О. Ю. Наливайко, П. И. Гайдук, А. С. Турцевич, В. И. Плебанович, В. М. Борисевич // Материалы докладов V Белорусско-Российской науч.-техн. конф. «Технические средства защиты информации», Минск, 28 мая – 1 июня 2007 г. / Минск, 2007. – С. 83–84.

30. Flash Memory with Ge Nanocrystals Produced by CVD and Thermal Processing / P. I. Gaiduk, A. G. Novikov, E. N. Pshenichnij, O. Y. Nalivaiko, V. S. Malyshev, V. I. Plebanovich // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation, 5th International Conf., Zakopane, Poland, June, 12 – 15, 2007. / Zakopane, 2007. – P. 53.

31. Deposition process kinetics and structure of SiGe films, obtained by LPCVD / O. Y. Nalivaiko, A. S. Turtsevich, V. I. Plebanovich, P. I. Gaiduk // Books of Abstracts, International Conf. “Micro- and Nanoelectronics 2007”, Moscow, Zvenigorod, Russia, October 1<sup>st</sup> – 5<sup>th</sup>, 2007. / Moscow, 2007. – P. P2–27.

32. Nanocrystal floating gate produced by CVD and thermal processing / A. G. Novikau, P. I. Gaiduk, E. N. Pshenichnij, O. Y. Nalivaiko, V. S. Malishev, V. I. Plebanovich // Books of Abstracts, International Conf. “Micro- and Nanoelectronics 2007”, Moscow, Zvenigorod, Russia, October 1<sup>st</sup> – 5<sup>th</sup>, 2007. / Moscow, 2007. – P. O3–02.

33. Исследование начальных стадий роста плёнок германия в горизонтальном реакторе пониженного давления» / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич, Г. В. Лепешкевич, Д. В. Жигулин // Материалы X Междунар. науч.-техн. конф. «Квантовая электроника», Минск, 9 – 13 ноября 2015 г. / Минск: РИВШ, 2015. – С. 115–116.

34. Au/Si-Ge and Au/Ge nanostructures for surface-enhanced Raman scattering / A. Matsukovich, O. Nalivaiko, K. Chizh, S. Gaponenko // Programme and Abstracts of 61th Scientific Conf. for Students of Physics and Natural Sciences «Open Readings 2018», Vilnius, March 20-23, 2018. / Vilnius, 2018. – P. 55.

35. Осаждение плёнок поликристаллического кремния, легированного в процессе роста фосфором, в вертикальном реакторе пониженного давления / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич, С. М. Завадский, Д. В. Жигулин // Материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. «Квантовая электроника», Минск, 18 – 22 ноября 2019 г. / Минск: РИВШ, 2019. – С. 157–158.

### Патенты

36. Способ химического осаждения из газовой фазы плёнок вольфрама : пат. 15149 Респ. Беларусь : МПК С 23С 16/14, Н 01L 21/285 / А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко, В. А. Солодуха, В. И. Каленик, А. А. Сидерко; заявитель и патентообладатель Минск. ОАО «ИНТЕГРАЛ». – № а 20100869 ; заявл. 04.06.10 ; опубл. 30.12.11.

37. Способ осаждения тонких плёнок SiGe : пат. 15299 Респ. Беларусь : МПК Н 01L 21/205, С 23С 16/30 / А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко, В. А. Солодуха, Ф. Ф. Комаров, Г. В. Лепешкевич, Е. Н. Пшеничный; заявитель и патентообладатель Минск. ОАО «ИНТЕГРАЛ». – № а 20100912 ; заявл. 11.06.10 ; опубл. 30.12.11.

38. Способ формирования нанокристаллов германия Ge для энергонезависимой памяти : пат. 17081 Респ. Беларусь : МПК Н 01L 21/44, Н 01L 21/336 / А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко, В. А. Солодуха, П. И. Гайдук, А. Г. Новиков, Е. Н. Пшеничный; заявитель и патентообладатель Минск. ОАО «ИНТЕГРАЛ». – № а 20110451 ; заявл. 08.04.11 ; опубл. 30.04.13.

39. Способ осаждения легированных фосфором плёнок кремния : пат. 18138 Респ. Беларусь: МПК Н 01L 21/20, Н 01L 21/469 / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич, В. А. Солодуха, Е. Н. Пшеничный, В. Л. Трусов; заявитель и патентообладатель Минск. ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – № а 20120461 ; заявл. 27.03.12 ; опубл. 30.04.14.

40. Способ формирования межкомпонентной изоляции элементов интегральных микросхем на кремниевой подложке : пат. 19582 Респ. Беларусь : МПК Н 01L 21/205, С23С 16/30 / МПК Н01L 21/76 / А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко, В. А. Солодуха, В. Л. Трусов, В. С. Цымбал, В. И. Роговой; заявитель и патентообладатель Минск.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – № а 20121032; заявл. 10.07.12 ; опубл. 30.10.15.

41. Способ формирования нанокристаллов германия для энергонезависимой памяти : пат. 20183 Респ. Беларусь : МПК Н 01L 21/44, Н 01L 21/336 / А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко, В. А. Солодуха, П. И. Гайдук, А. Г. Новиков, Г. В. Лепешкевич; заявитель и патентообладатель Минск. ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – № а 20131615 ; заявл. 27.12.13 ; опубл. 30.06.16.

42. Способ формирования слоя дисилицида титана  $TiSi_2$  : пат. 20217 Респ. Беларусь : МПК Н 01L 21/44 / А. С. Турцевич, В. А. Солодуха, О. Ю. Наливайко., Е. Н. Пшеничный, В. В. Колос; заявитель и патентообладатель Минск. ОАО «ИНТЕГРАЛ» – № а 20131616 ; заявл. 27.12.13 ; опубл. 30.08.16.

43. Способ химико-механической полировки кремниевых пластин со сформированными структурами интегральных микросхем : пат. 025790 Евразийской патентной организации : МПК Н 01L 21/304 / А. С. Турцевич, В. А. Солодуха, О. Ю. Наливайко, В. Л. Трусов, В. И. Роговой; заявитель и патентообладатель Минск. ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – № 201401108 ; заявл. 23.09.14 ; опубл. 30.01.17.

44. Способ формирования структур интегральных микросхем со слоями силицида : пат. 21468 Респ. Беларусь : МПК Н 01L 21/306 / А. С. Турцевич, В. В. Колос; В. Л. Трусов, О. Ю. Наливайко ; заявитель и патентообладатель Минск. ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – № а 20140141 ; заявл. 28.02.14 ; опубл. 30.12.17.

45. Способ формирования металлической разводки с контактными столбиками из вольфрама в интегральных микросхемах : пат. 21825 Респ. Беларусь : МПК Н 01L 21/00 / А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко, В. Л. Трусов, В. И. Роговой; заявитель и патентообладатель Минск. ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – № а 20140322 ; заявл. 13.06.14 ; опубл. 30.04.18.

46. Металлизация интегральной схемы : пат. 029641 Евразийской патентной организации : МПК Н 01L 21/318, Н 01L 23/48 / О. Ю. Наливайко., А. С. Турцевич, А. В. Булыгин, В. Е. Шиколо; заявитель и патентообладатель Минск. ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – № 201500244 ; заявл. 04.02.15 ; опубл. 30.04.18.

47. Способ формирования пассивирующего слоя интегральных микросхем : пат. 21828 Респ. Беларусь : МПК Н 01L 21/31 / А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко, В. Л. Трусов, Е. Н. Пшеничный; заявитель и патентообладатель Минск. ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – № а 20140157 ; заявл. 06.03.14 ; опубл. 30.04.18.



## РЭЗІЮМЭ

### Налівайко Алєг Юр'євіч

#### Фарміраванне з газавай фазы функцыянальных слаёў субмікронных структур інтэгральных мікрасхем на аснове крэмнія

**Ключавыя словы:** асаджванне з газавай фазы, энергія актывацыі, міжкампанентная ізаляцыя, шматузроўневая разводка, спосаб, вольт-амперная характарыстыка.

**Мэта даследвання:** распрацоўка і даследаванне комплексу новых тэхналагічных працэсаў і канструктыўна-тэхналагічных спосабаў атрымання слаёў на аснове Si,  $Si_{1-x}Ge_x$ , W дзеля субмікронных структур інтэгральных мікрасхем на аснове крэмнію.

**Метады даследвання:** атамна-сілавая мікраскапія, рэзерфордаўскаеа зваротнага расейвання, спектрафотометрыя і спектраскапія; метады вольтамперных і вольтфарадных характарыстык.

**Атрыманья вынікі і іх навізна:** Даследавана кінетыка асаджвання плёнак полікрышталічнага крэмнію, легіраванага ў працэсе росту фосфарам. Распрацаваны працэс асаджвання плёнак ПКЛФ, які забяспечвае атрыманне плёнак з удзельным супраціўленнем 600 – 1000 мкОм×см і шурпатасцю не больш за 2,1 нм, а таксама атрыманне плёнак поліцыду тытану з супраціўленнем не больш за 23 мкОм×см. Распрацаваны спосаб фарміравання міжкампанентнай ізаляцыі, канаўкамі, запоўненымі дыэлектрыкам, які дазваляе паменшыць шырыню вобласці ізаляцыі з 0,75 да 0,5 мкм і зменшыць вышыню тапалагічнага рэльефу з 0,25 да 0,02 – 0,05 мкм. Распрацаваны спосаб фарміравання шматузроўневай разводкі субмікронных ІМС з кантактнымі слупкамі з вальфраму з кантактнымі супрацівамі паміж узроўнямі не больш за 24 Ом/мкм<sup>2</sup>, а да актыўных абласцей і полікрэмнію – не больш за 120 Ом/мкм<sup>2</sup>. Атрымана матрыца нанакрышталяў германію, інкарпараваных у аксід крэмнію шляхам сегрэгацыйнага адціску пры акісленні тонкага слою  $Si_{1-x}Ge_x$ , атрыманага метадам хімічнага асаджвання з газавай фазы.

**Ступень выкарыстання:** вынікі даследавання працэсаў асаджвання функцыянальных слаёў з газавай фазы і фарміравання структур на іх аснове укаранены ў серыйную вытворчасць інтэгральных мікрасхем з памерамі элементаў 0,35 – 0,60 мкм на пласцінах дыяметрам 200 мм ААТ «ІНТЭГРАЛ». За перыяд з 2014 па 2020 аб'ём прадукцыі, вырабленай з выкарыстаннем распрацаваных працэсаў, склаў 21 528,2 тыс. дол. ЗША.

**Вобласць ужывання:** распрацоўка і вытворчасць інтэгральных мікрасхем.

**РЕЗЮМЕ****Наливайко Олег Юрьевич****Формирование из газовой функциональных слоев субмикронных структур интегральных микросхем на основе кремния**

**Ключевые слова:** осаждение из газовой фазы, энергия активации, межкомпонентная изоляция, многоуровневая разводка, способ, вольт-амперная характеристика.

**Цель исследования:** разработка и исследование комплекса новых технологических процессов и конструктивно-технологических способов получения слоев Si, Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, W для субмикронных структур интегральных микросхем на основе кремния.

**Методы исследования:** растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, резерфордское обратное рассеяние, спектрофотометрия и спектроскопия; вольт-амперные и вольтфарадные характеристики.

**Полученные результаты и их новизна:** Исследована кинетика осаждения плёнок поликристаллического кремния, легированного в процессе роста фосфором. Разработан процесс осаждения плёнок ПКЛФ, обеспечивающий получение плёнок с удельным сопротивлением 600 – 1000 мкОм×см и шероховатостью не более 2,1 нм, а также получение плёнок полицида титана с удельным сопротивлением не более 23 мкОм×см. Разработан способ формирования межкомпонентной изоляции, канавками, заполненными диэлектриком, позволяющий уменьшить ширину области изоляции с 0,75 до 0,5 мкм и снизить высоту топологического рельефа с 0,25 до 0,02 – 0,05 мкм. Разработан процесс формирования многоуровневой разводки субмикронных ИМС с контактными «столбиками» из вольфрама с контактными сопротивлениями между уровнями не более 24 Ом/мкм<sup>2</sup>, а к активным областям и поликремнию – не более 120 Ом/мкм<sup>2</sup>. Получена матрица нанокристаллов германия, инкорпорированных в оксид кремния путем сегрегационного отеснения атомов Ge при окислении тонкого слоя Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, полученного методом химического осаждения из газовой фазы.

**Степень использования:** результаты исследования процессов осаждения функциональных слоев из газовой фазы и формирования структур на их основе внедрены в серийное производство ИМС с размерами элементов 0,35 – 0,60 мкм на пластинах диаметром 200 мм в ОАО «ИНТЕГРАЛ». За период с 2014 по 2020 год произведено и поставлено потребителям продукции, изготовленной с использованием разработанных технологических процессов и способов, на общую сумму 21 528,2 тыс. дол. США.

**Область применения:** разработка и производство интегральных микросхем.

## SUMMARY

Nalivaiko Oleg Yurievich

### The formation of the functional layers for the submicron structure of the integrated circuits based on silicon

**Keywords:** deposition from vapor phase, activation energy, isolation between devices (isolation structures), multilevel interconnects, process flow, current-voltage characteristics.

**Aim of the research:** development and investigation of the new technological processes and design-technological methods for obtaining the layers of Si, Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> for submicron structure of integrated circuits based on silicon.

**Research methods:** scanning electronic microscopy, transmission electronic microscopy, atomic-force microscopy, spectrophotometry, spectroscopy and Reserford Back Scattering methods. The measurement of IV and CV characteristics.

**Obtained results and their novelty:** The kinetics of the in situ phosphorus doped polysilicon has been investigated. The in situ phosphorus doped polysilicon deposition process was developed, which provide the obtaining the polysilicon layer with resistivity of 600 – 1000 μOhm×cm and roughness less 2,1 nm as well as the obtaining the titanium polycide layer with resistivity no more 23 μOhm×cm. The process flows has been developed for the formation of inter-component isolation using shallow trenches filled with a dielectric, which provides the topography reduce from 0,25 to 0,02 – 0,05 μm and the decrease in the width of the inter-component isolation from 0,75 to 0.5 μm. The process flows have been developed for formation of multilevel interconnects for submicron ICs with tungsten plugs with contact resistances between levels – no more than 24 Ohm/μm<sup>2</sup>, and to active regions and polysilicon – no more than 120 Ohm/μm<sup>2</sup>. The array of Ge nanocrystal, which incorporated into silicon oxide was obtained by the segregationist pushback of Ge atoms during oxidation of thin layer of Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, produced by the chemical vapor deposition.

**Extend of application:** The investigation results regarding vapor phase deposition of functional layers and the structure formation on their basis have been introduced in the mass production of the integrated circuits with 0,35 – 0,60 μm design rules on the 8 inch wafers line of JSC “INTEGRAL”. The volume of the product manufactured using the developed processes is \$21,5282 million for period from 2014 to 2020.

**Field of application:** development and production of the integrated circuits.

*Научное издание*

**Наливайко Олег Юрьевич**

**ФОРМИРОВАНИЕ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
СЛОЁВ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ  
МИКРОСХЕМ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Подписано в печать .08.2022. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,4. Уч. изд. л. 1,3. Тираж 60 экз. Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/238 от 23.04.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014

Ул, П. Бровки, 6, 220013, г. Минск,