

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

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, по которой она представлена к защите

Целью диссертационной работы Наливайко Олега Юрьевича является разработка и исследование комплекса новых технологических процессов и конструктивно-технологических способов получения функциональных слоев Si, Si_{1-x}Ge_x, W и субмикронных структур интегральных микросхем на основе кремния. В работе исследовались закономерности, протекающие при формировании из газовой фазы функциональных слоев Si, Si_{1-x}Ge_x, W.

В результате проведенных экспериментальных исследований разработаны технологические процессы осаждения пленок поликристаллического кремния, легированные фосфором в процессе роста (ПКЛФ), осаждения пленок вольфрама на пластинах диаметром 200 мм, а также осаждения тонких слоев Si_{1-x}Ge_x, которые использовались для создания матрицы нанокристаллов германия, инкорпорированных в оксид кремния. Разработаны способы создания межкомпонентной изоляции канавками, заполненными оксидом кремния, для субмикронных интегральных схем (ИМС), формирования многоуровневой металлизированной разводки субмикронных ИМС с «контактными столбиками» из вольфрама.

Полученные научные и практические результаты диссертации Наливайко О.Ю. соответствуют пунктам III.3 и III.5 паспорта специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» и отрасли науки - технические.

Таким образом, диссертационная работа Наливайко О.Ю. «Формирование из газовой фазы функциональных слоёв субмикронных структур интегральных микросхем на основе кремния» полностью соответствует специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» (технические науки).

2. Актуальность темы диссертации

Основным направлением прогресса в области технологии микроэлектроники является повышение степени интеграции, одним из которых представляется использование многослойных трехмерных структур. Для обеспечения производства надежных и конкурентоспособных изделий

микроэлектроники требуется усовершенствование методов формирования функциональных слоев, разработка новых способов создания субмикронных ИМС с использованием изоляции в виде системы канавок, общей планаризации топологического рельефа и многоуровневых соединений с контактными столбиками из вольфрама.

Таким образом, тема диссертационного исследования Наливайко О.Ю. является актуальной.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту

Основные результаты и научные положения диссертации являются новыми и полученными автором впервые. Наиболее значимые из них:

1. Экспериментально установлено, что энергия активации процесса осаждения пленок ПКЛФ уменьшается от 1,50 до 1,32 эВ при увеличении соотношения потоков моносилана и фосфина (PH_3/SiH_4) (γ) от 0 до 0,001, что обусловлено конкурирующей адсорбцией на одних и тех же адсорбционных центрах. Показано, что при осаждении легированных пленок кремния в аморфном состоянии при температуре 540 – 560 °С и давлении 53÷106 Па на подслое нелегированного аморфного кремния обеспечивается снижение шероховатости пленок ПКЛФ до 2,1 нм, а удельное сопротивление пленок составляет 600 – 1000 мкОм·см. Для формирования тонкопленочных резисторов полицида титана шириной 0,35 мкм предложено использовать двухслойную структуру, состоящую из высоколегированного и нелегированного слоев пористого кремния (ПК).

2. Разработан новый способ получения матрицы нанокристаллов германия, инкорпорированных в оксид кремния, сегрегационным оттеснением атомов Ge при термическом окислении слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, полученного химическим осаждением из газовой фазы с толщиной 20 – 25 нм и содержанием Ge 5 – 20 ат.%. Получены МОП-структуры с нанокристаллами Ge с плотностью токов утечки $1,5 \cdot 10^{-16}$ – $2,2 \cdot 10^{-16}$ А/мкм² и гистерезисом вольтфарадных характеристик МОП-структуры 1,7 – 1,8 В.

3. Определены режимы термической обработки пленок оксида кремния, осажденного при субатмосферном давлении, обеспечивающие снижение скорости химического травления «субатмосферного» оксида кремния и удаление слоев оксида кремния с поверхности без увеличения высоты топологического рельефа, что позволило разработать способ формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными оксидом кремния, для ИМС с проектными нормами 0,25 – 0,35 мкм.

4. По результатам исследования влияния обработки адгезионного слоя Ti/TiN в среде моносилана на однородность зародышеобразования вольфрама определены режимы формирования однородных слоев вольфрама без образования пустот в контактных окнах. Разработан способ

формирования двух и трёхуровневых межкомпонентных соединений субмикронных ИМС с «контактными столбиками» из вольфрама.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность научных результатов и выводов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждается использованием современных экспериментальных методик исследования и оборудования, обеспечивающих высокую точность измерений экспериментальных данных. Полученные новые научные результаты не противоречат фундаментальным знаниям в области физики и химии полупроводников. Все выводы по результатам исследований логически структурированы, четко сформулированы, что подтверждает их обоснованность и достоверность.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию

Научная значимость результатов работы состоит в установлении новых эффектов в кинетике процессов осаждения ПКЛФ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и начальных стадиях роста слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и Ge. Разработаны способ осаждения пленок ПКЛФ, обладающих удельным сопротивлением 600 – 1000 мкОм·см и шероховатостью не более 2,1 нм (после проведения активирующего отжига), технологический процесс формирования слоя полицида титана для тонкопленочных резисторов TiSi_2 шириной 0,35 мкм и способ осаждения тонких слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (20 – 25 нм) с содержанием Ge от 4 до 20 ат.%. Установлено влияние длительности обработки адгезионного слоя Ti/TiN в среде моносилана на однородность зародышеобразования вольфрама, определены режимы формирования слоев вольфрама, обеспечивающие формирование однородных слоев без образования пустот в контактных окнах.

Разработаны способы формирования многоуровневой разводки для субмикронных ИМС с использованием «контактных столбиков» из вольфрама и межкомпонентной изоляции с использованием канавок, заполненных диэлектриком. Разработанный способ создания нанокристаллов германия, инкорпорированных в оксид кремния, сегрегационным оттеснением атомов Ge при термическом окислении тонких слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ может быть использован при разработке микросхем с более высокими характеристиками энергонезависимой памяти.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в том, что разработанные технологические процессы (осаждение пленок ПКЛФ, формирование полицида титана, осаждение пленок вольфрама) и способы формирования межкомпонентной изоляции канавками, формирования многоуровневой межкомпонентных соединений субмикронных

ИМС и формирования пассивирующих покрытий могут использоваться для производства ИМС с проектными нормами 0,25 – 0,35 мкм.

Экономическая значимость результатов диссертации состоит в том, что использование разработанных в диссертационном исследовании технологических процессов и способов создания субмикронных твердотельных структур позволило ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» производить конкурентоспособную продукцию. Так за период с 2014 по 2020 годы произведено и поставлено потребителям с производственной линии на пластинах диаметром 200 мм 74,745 млн. шт. ИМС на общую сумму 21 528,2 тыс. долл. США.

Социальная значимость результатов диссертации заключается в повышении технологического и производственного потенциала ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», что позволяет организовать разработку и производство высокотехнологичной и конкурентоспособной продукции. Результаты диссертации могут быть использованы для производства ИМС с проектными нормами 0,25 – 0,50 мкм предприятиями Республики Беларусь и Российской Федерации.

6. Полнота опубликования основных положений, результатов диссертации в научной печати

Результаты диссертационных исследований, изложенные в диссертации и автореферате, положения в диссертации, выносимые на защиту, достаточно полно отражены в публикациях. По результатам исследований опубликовано 47 научных работ, из которых 2 коллективные 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 на изобретения Республики Беларусь.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации, утвержденной Постановлением ВАК от 28 февраля 2014 г. № 3.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы, включает выводы и положения, которые выносятся на защиту.

8. Соответствие научной квалификации соискателя учёной степени, на которую он претендует

Качество изложения материала диссертации, точность и логичность сделанных в работе выводов, высокий научный уровень публикаций, в

которых содержатся основные результаты диссертационной работы, а также применение различных современных методик исследования свидетельствуют о высоком уровне научной квалификации автора Наливайко Олега Юрьевича, которая, несомненно, соответствует ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

9. Недостатки диссертационной работы

В качестве недостатков в работе необходимо отметить следующее:

1. В качестве основных результатов диссертации приводятся разработанные способы формирования матрицы нанокристаллов, межкомпонентной изоляции. С учетом научной терминологии и паспорта специальности более точными представляются «разработанные методы» и «технологические маршруты».

2. В главе 4 приведены материалы по созданию гибридных полупроводник-металл гетероструктур на основе Au/SiGe и Au/Ge, что отличается от цели и задач работы.

3. Не приведены значения концентрации легирующей примеси в сильнолегированных пленках ПКЛФ, а также толщины сильнолегированного и слаболегированного слоев поликремния (с. 121).

4. Не представлены значения размеров зерен вольфрама на стадии зародышеобразования (с. 126), величина эффективной энергии активации для процессов восстановления гексафторида вольфрама кремнием, моносиланом и водородом (с. 128).

5. В диссертации встречаются некорректные выражения, например, «...легированные пленки поликристаллического кремния... по сравнению с другими металлами», «нагрузочные резисторы», «превосходная граница» (с. 14), «...равномерность толщины на сложном рельефе» (с. 18), «...в направлении, перпендикулярном плёнке» (с. 107).

Указанные замечания не относятся к принципиальным и не снижают высокой научной и практической значимости диссертации.

10. Заключение

Диссертация Наливайко Олега Юрьевича на тему «Формирование из газовой фазы функциональных слоёв субмикронных структур интегральных микросхем на основе кремния», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук, является научной работой, самостоятельно подготовленной соискателем. Ее содержание соответствует специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах», удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в области

технических наук.

В соответствии с требованиями п. 20 Положения ВАК Беларуси «О присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий» Наливайко Олег Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук за получение новых научно-обоснованных экспериментальных результатов в области микроэлектроники, включающих:

1. Экспериментально установленную зависимость энергии активации (E_a) процесса осаждения пленок поликристаллического кремния, легированных в процессе роста фосфором (ПКЛФ) от отношения объемных потоков PH_3/SiH_4 (γ), состоящую в ее уменьшении от 1,5 эВ до 1,32 эВ при увеличении γ от 0 до 0,001 и предложенный способ двухстадийного осаждения пленок ПКЛФ, обеспечивающий снижение шероховатости поверхности пленки до 2,1 нм, удельное сопротивление 600 – 1000 мкОм×см.

2. Разработку способа формирования матрицы нанокристаллов Ge, инкорпорированных в оксид кремния, с гистерезисом вольтфарадных характеристик 1,7 – 1,8 В, плотностью токов утечки $1,5 \cdot 10^{-16} - 2,2 \cdot 10^{-16}$ А/мкм² методом сегрегационного оттеснения атомов Ge при термическом окислении слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, полученного химическим осаждением из газовой фазы, с толщиной 20 – 25 нм и содержанием Ge 5 – 20 ат.%.

3. Разработку способа формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными оксидом кремния, осажденного при субатмосферном давлении, для ИМС с проектными нормами $0,25 \div 0,35$ мкм, позволяющего уменьшить ширину межкомпонентной изоляции с 0,75 до 0,5 мкм и на порядок снизить высоту топологического рельефа с 0,25 мкм до 0,02 – 0,05 мкм.

4. Экспериментально обоснованные режимы формирования слоев вольфрама, обеспечивающие формирование равномерного зародышевого слоя вольфрама, исключение образования пустот в контактных окнах, что при использовании силицида и полицида титана позволяет формировать двух- и трехуровневые соединения субмикронных ИМС с контактными сопротивлениями между уровнями – не более 24 Ом/мкм², а к активным областям и поликремнию – не более 120 Ом/мкм².

Доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией «Микро- и
наносенсорика» ГНПО «Оптика,
оптоэлектроника и лазерная техника»

Н.И. Мухуров

Н.И. Мухуров

