

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Наливайко Олега Юрьевича

**«Формирование из газовой фазы функциональных слоёв
субмикронных структур интегральных микросхем на основе
кремния»**

представленной на соискание учёной 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**

Диссертация 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.

При выполнении работы были решены задачи по исследованию кинетики процесса осаждения из газовой фазы плёнок поликристаллического кремния, легированных фосфором в процессе роста (ПКЛФ); разработке способа формирования нанокристаллов Ge, инкорпорированных в оксид кремния; исследованию режимов и разработке способа формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными диэлектриком для ИМС с проектными нормами 0,25 – 0,35 мкм; разработке технологических процессов осаждения и химико-механической полировки плёнок вольфрама, а также способа формирования многоуровневой разводки субмикронных ИМС с использованием контактных «столбиков» из вольфрама.

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», а также требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

2. Актуальность темы диссертации

Актуальность представленной работы обусловлена необходимостью разработки современных технологий для изготовления субмикронных ИМС в условиях ограниченных возможностей Республики Беларусь. Основным направлением развития технологии микроэлектроники, является повышение степени интеграции и, как следствие, использование многослойных

трехмерных структур. При этом, сфера применения функциональных слоев на основе кремния постоянно расширяется, что обуславливает необходимость установления закономерностей формирования функциональных слоев на основе кремния и их влияния на свойства твердотельных структур на их основе, что имеет важное научное и прикладное значение.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования *Наливайко О.Ю.* не вызывает сомнений.

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

Анализ представленных в диссертации *Наливайко О.Ю.* результатов позволяет заключить, что работа содержит новые научно обоснованные результаты и научные положения. Основными из них являются:

1. Экспериментально установлено, что энергия активации процесса осаждения плёнок ПКЛФ, уменьшается от 1,5 до 1,32 эВ при увеличении соотношения потоков RN_3/SiH_4 (γ) от 0 до 0,001. Предложен способ двухстадийного осаждения пленок ПКЛФ, обеспечивающий снижение шероховатости плёнок ПКЛФ до 2,1 нм, удельное сопротивление 600 – 1000 мкОм×см. 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.

2. Впервые получена матрица нанокристаллов германия, инкорпорированных в оксид кремния, с гистерезисом вольтфарадных характеристик 1,7 – 1,8 В и плотностью токов утечки $1,5 \times 10^{-16} - 2,2 \times 10^{-16}$ А/мкм².

3. Предложен способ формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными оксидом кремния, осажденным при субатмосферном давлении, для ИМС с проектными нормами 0,25 – 0,35 мкм, обеспечивающий уменьшение ширины межкомпонентной изоляции до 0,5 мкм и снижение высоты топологического рельефа до 0,02 – 0,05 мкм.

4. Установлено, что обработка поверхности адгезионного слоя Ti/TiN в среде моносилана перед первой стадией осаждения пленок вольфрама при потоке моносилана, равном 40 – 100 см³/мин, и длительности обработки, равной 25 – 40 с, позволяет формировать однородный зародышевый слой вольфрама, исключить образование пустот при заполнении контактных окон вольфрамом и при использовании силицида и полицида титана обеспечивает формирование двух- и трёхуровневых соединений субмикронных ИМС с контактными сопротивлениями между уровнями не более 24 Ом/мкм², а к

активными областям и поликремнию – не более 120 Ом/мкм²..

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

Достоверность результатов проведенных исследований, выводов и рекомендаций, сформулированных диссертации, обоснованы использованием современных методов исследования структуры, элементного состава, электрофизических параметров функциональных слоев. Полученные в работе результаты объективны, являются обоснованными, выводы структурированы, вытекают из содержания проведенных исследований и отражают научные положения, представленные в диссертации. Достоверность результатов, выводов и рекомендаций подтверждается экспериментальными данными, хорошо согласующимися с результатами теоретического анализа, и внедрением в производство.

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

Достоинством диссертационной работы является непосредственная связь разработки с практической реализацией в условиях производства.

Научная значимость результатов работы заключается в развитии фундаментальных знаний по технологическим процессам, используемым в производстве субмикронных ИМС с проектными нормами $0,35 \div 0,8$ мкм на пластинах диаметром 200 мм. Определена зависимость энергии активации процесса осаждения ПКЛФ от соотношения потоков PH_3/SiH_4 ; разработан способ осаждения плёнок ПКЛФ с удельным сопротивлением $600 \div 1000$ мкОм•см, шероховатостью – не более 2,1 нм (после активирующего отжига при 950 °С). Разработан способ формирования межкомпонентной изоляции с использованием канавок глубиной $0,35 \div 0,5$ мкм, заполненных диэлектриком. Усовершенствованы технологические процессы осаждения плёнок вольфрама и химико-механической полировки вольфрама. Разработан способ формирования многоуровневой разводки для субмикронных ИМС на пластинах диаметром 200 мм. Исследованы начальные стадии процессов осаждения плёнок $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и Ge; 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 методом ХОГФ.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в разработке и внедрении в серийное производство в ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» технологических процессов осаждения пленок ПКЛФ, осаждения и химико-механической полировки

пленок вольфрама, способов формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными оксидом кремния, способа формирования многоуровневой металлизированной разводки, что позволило производство на пластинах диаметром 200 мм ИМС проектными нормами 0,35 – 0,6 мкм.

Экономическая значимость результатов диссертации состоит в том, что с использованием разработанных технологических процессов и способов формирования субмикронных структур интегральных микросхем за период с 2014 по 2020 годы произведено и поставлено потребителям с субмикронной линии 74,745 млн. шт. ИМС на общую сумму 21 528,2 тыс. долл. США.

Социальная значимость результатов диссертации состоит в создании возможности разработки и производства высокотехнологичной и экспортоориентированной продукции.

Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию организациями, занимающимися производством ИМС с проектными нормами 0,35 – 0,5 мкм.

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

По результатам проведенных исследований опубликовано 47 научных работы, 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.

Все положения диссертации, выносимые на защиту, а также разделы диссертации и автореферата отражены в опубликованных материалах.

Из наиболее значимых публикаций следует выделить следующие:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Наливайко, О. Ю. Получение тонких плёнок Si_3N_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.

6. 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.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы, выводам и положениям, которые выносятся на защиту.

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

Анализ содержания диссертации и автореферата, включая степень новизны полученных результатов и защищаемых положений, обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, научную и практическую значимость работы, полноту опубликованности результатов в научной печати позволяют сделать вывод, что научная квалификация *Наливайко Олега Юрьевича* 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. Из литературных источников известно, что для заполнения канавок и узких зазоров используется химическое осаждение из газовой фазы с использованием плазмы высокой плотности. Однако, в диссертации этот метод не использовался.

2. На странице 118 используются сокращения кр./пл., которых нет в перечне сокращений по диссертации;

3. На рисунке 3.21, страница 89, приведены данные о снижении размера островков в процессе роста с увеличением длительности осаждения аморфного кремния. Однако, в диссертации отсутствует интерпретация этих экспериментальных результатов;

4. Выражение 3.7 на странице 63: $K = (1,48 - 1,79)^{-42} \times T^{15,07}$ требует пояснения;

5. На странице 61, в формуле 3.4: $V = \beta \times P \times S/S_0$,
 $\beta = K \gamma \tau S_0$ – константа, которая не зависит от давления моносилана. Более корректно следует написать «,, не зависит от парциального давления моносилана» ;

6. В тексте диссертации встречаются незначительные опечатки. Например, на странице 116, в предложении «В результате следующей проблемой...» имеется следующая опечатка: «к активных областям».

Высказанные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку диссертационной работы О.Ю.Наливайко.

10. Заключение

Диссертация *Наливайко Олега Юрьевича* на тему «Формирование из газовой фазы функциональных слоев субмикронных структур интегральных микросхем на основе кремния», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является завершённой научной квалификационной работой и соответствует требованиям ВАК Беларуси, предъявляемым к кандидатским диссертациям. В соответствии с требованиями пункта 20 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь» *Наливайко Олег Юрьевич* заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах за новые научные экспериментальные результаты в области электроники, включающие:

1. Экспериментально установленную зависимость энергии активации (E_a) процесса осаждения плёнок поликристаллического кремния, легированных в процессе роста фосфором (ПКЛФ) от отношения объёмных потоков PH_3/SiH_4 (γ), состоящую в ее уменьшении от 1,5 до 1,32 эВ при увеличении γ от 0 до 0,001, а также увеличение 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, 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/мкм², методом сегрегационного оттеснения 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 изгазовой фазы при пониженном давлении, и использованием в качестве верхнего электрода слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с содержанием Ge 20 – 30 ат.%.
 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 см³/мин, и длительности обработки, равной 22 – 40 с, с последующим осаждением зародышевого и основного слоёв вольфрама, что обеспечивает формирование равномерного зародышевого слоя вольфрама (с размером зерен 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.

Официальный оппонент

Кандидат технических наук, доцент,
 доцент кафедры оптики учреждения
 образования «Гомельский государственный
 университет» им. Франциска Скорины

Н.Н. Федосенко

