

## ОТЗЫВ

научного руководителя, доктора технических наук, доцента Турцевича А.С. на диссертационную работу Наливайко О.Ю. «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»

Основным направлением развития прогресса в области технологии микроэлектроники, является повышение степени интеграции и, как следствие, использование многослойных трёхмерных структур. С возрастанием степени интеграции ИМС уменьшаются топологические размеры элементов и зазоры между ними. Это приводит к возникновению новых требований к используемым плёнкам и процессам изготовления ИМС и расширению использования функциональных слоёв, полученных химическим осаждением из газовой фазы.

### 1. Научная оценка результатов диссертации

Диссертация Наливайко О.Ю. является законченной самостоятельной научно-исследовательской работой, содержащей новые конкретные решения в области микроэлектроники в Республике Беларусь.

Достоверность результатов проведенных исследований, обоснованность выводов и рекомендаций подтверждается экспериментальными данными, которые хорошо согласуются с результатами теоретического анализа, и внедрением в производство ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Наиболее значимые результаты работы Наливайко О.Ю. заключаются в следующем:

1. Исследована кинетика процесса осаждения плёнок ПКЛФ в диапазоне температур 540 – 650 °С. Установлено, что повышение скорости осаждения плёнок ПКЛФ может быть достигнуто за счет 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  $\gamma$  еще не происходит полное блокирование адсорбции

моносилана молекулами фосфина. В то же время при более низких температурах осаждения достигается более высокий уровень легирования плёнок ПКЛФ и равномерное распределение легирующей примеси. При этом за счет использования более низких значений  $\gamma$  улучшается конформность воспроизведения топологического рельефа.

2. Экспериментально установлено, что энергия активации процесса осаждения ПКЛФ уменьшается от 1,5 до 1,32 эВ при увеличении  $\gamma$  от 0 до 0,001, что обусловлено конкурирующей адсорбцией моносилана и фосфина на одних и тех же адсорбционных центрах. Разработан способ двухстадийного 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 оксида кремния 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 счет плоского габитуса зерен после проведения активирующего отжига), удельное сопротивление (600 – 1000) мкОм·см при скорости осаждения 2,2 – 2,5 нм/мин. Использование плёнок ПКЛФ позволило исключить трудоемкую операцию ионного легирования плёнок поликристаллического кремния, улучшить контактные сопротивления, повысить выход годных структур.

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. При формировании  $\text{TiSi}_2$  использование изолирующего слоя  $\text{SiO}_2$  предпочтительнее по сравнению с изолирующим слоем  $\text{Si}_3\text{N}_3/\text{SiO}_2$ .

4. Разработан способ формирования нанокристаллов Ge, инкорпорированных в оксид кремния, 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 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 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.%, легированного ионной имплантацией фосфора при энергии 30 кэВ и 60 кэВ с дозой  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  с активирующим отжигом при  $600 \pm 10$  °С, что позволяет получать матрицу

нанокристаллов Ge с гистерезисом вольтфарадных характеристик  $1,7 - 1,8$  В, плотностью токов утечки  $1,5 \cdot 10^{-16} - 2,2 \cdot 10^{-16}$  А/мкм<sup>2</sup>.

5. Экспериментально установлено, что увеличение температуры отжига оксида кремния, осажденного при субатмосферном давлении, до  $1050$  °С позволяет уменьшить соотношение скоростей травления субатмосферного оксида кремния и термического оксида кремния до  $1,28 - 1,4$  и обеспечивает удаление оксида кремния с поверхности подложки без увеличения разновысотности 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  $0,75$  мкм до  $0,5$  мкм и снижение разновысотности топологического рельефа  $0,25$  мкм до менее  $0,05$  мкм за счет исключения термического окисления монокристаллического кремния.

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 или более  $50$  см<sup>3</sup>/мин и длительности обработки равной или более  $22$  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 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>, что позволило освоить производство ИМС с проектными нормами  $0,6 - 0,35$  мкм на пластинах диаметром  $200$  мм.

## **2. Характеристика научно-производственной деятельности соискателя**

Полученные автором результаты диссертационной работы имеют также важную практическую значимость, которая заключается в следующем:

1. Разработан и внедрён в производство субмикронных ИМС с проектными нормами  $0,35 \div 0,8$  мкм на пластинах диаметром  $200$  мм IZ1990, IL91214AN, IL91214BN, ILA2533, 1635PY1T процесс осаждения плёнок поликристаллического кремния, легированных в процессе роста фосфором и процесс формирования слоя полицида титана, для резисторов  $TiSi_2$  шириной  $0,35$  мкм.

2. Разработан и внедрён на изделии 1635PY4Y (СОЗУ 1Мбит, 3,3 В) способ формирования межкомпонентной изоляции элементов интегральных микросхем канавками, заполненными диэлектриком, для ИМС с проектными нормами 0,35 мкм и ниже.

3. Разработаны и внедрены в производство ИМС с проектными нормами 0,35 – 0,8 мкм на пластинах диаметром 200 мм технологические процессы для формирования многоуровневой разводки, включая:

– процесс осаждения плёнок вольфрама (на пластинах диаметром 150 и 200 мм);

– процесс химико-механической полировки вольфрама и способ формирования многоуровневой разводки с контактными столбиками из вольфрама. С целью снижения затрат на изготовление в блок формирования многоуровневой металлизации на пластинах диаметром 150 мм в 2019 году внедрены операции осаждения плёнок вольфрама и сквозного плазмохимического травления плёнок вольфрама.

4. Внедрён в производство ИМС с проектными нормами 0,5 мкм и ниже на изделиях 1642PK2Y, 1635PY21Y, 1635PY2Y, 1635PY4Y, 1880BE1Y усовершенствованный способ формирования пассивирующего покрытия для повышения выхода годных структур и надежности изделий.

5. Разработанный способ создания нанокристаллов германия, инкорпорированных в  $\text{SiO}_2$  может быть использован для разработки усовершенствованной энергонезависимой памяти (ЭСПЗУ).

В результате проведенных исследований и разработок расширен производственный потенциал ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». 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. Изделия поставлялись в страны Юго-Восточной Азии, Россию.

Проведенное Наливайко О.Ю. исследование свидетельствует о том, что автор в достаточной мере владеет методами научного анализа, обладает достаточно высоким уровнем подготовленности к проведению глубоких научных изысканий, имеет широкую эрудицию в области твердотельной электроники и микроэлектроники, что подтверждается участием в НИОКР и большим количеством публикаций и патентов.

### **3. 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, служит квалификационной научной

работой, отвечающей требованиям ВАК Беларуси, предъявляемым к кандидатским диссертациям, 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 соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий».

Уровень научной подготовки, о котором свидетельствует представленная к защите диссертационная работа, позволяет считать, что Наливайко О.Ю. заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук в соответствии с п. 20 указанного положения за получение новых научно обоснованных экспериментальных результатов, включающих:

1. Установленную зависимость энергии активации ( $E_a$ ) процесса осаждения плёнок поликристаллического кремния, легированных в процессе роста фосфором (ПКЛФ) от отношения объёмных потоков  $\text{PH}_3/\text{SiH}_4$  ( $\gamma$ ), состоящую в ее уменьшении от 1,5 эВ до 1,32 эВ при увеличении  $\gamma$  от 0 до 0,001, а также увеличение степени заполнения адсорбционных центров молекулами моносилана при снижении температуры и  $\gamma$ , 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 2,2 – 2,5 нм/мин.

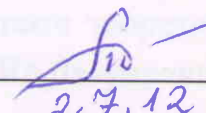
2. Разработанный способ формирования нанокристаллов Ge, инкорпорированных в оксид кремния, методом сегрегационного оттеснения атомов Ge фронтом окисления  $\text{SiO}_2/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , и по границам зёрен при термическом окислении слоя  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , полученного химическим осаждением 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 нм и использованием в качестве верхнего электрода слоя  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с содержанием Ge 20 – 30 ат.%, легированного ионной имплантацией фосфора при энергии 30 кэВ и 60 кэВ с дозой  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  с активирующим отжигом при  $600 \pm 10$  °С, позволяет получать матрицу нанокристаллов Ge с гистерезисом вольтфарадных характеристик до 1,7 – 1,8 В, плотностью токов утечки  $1,5 \cdot 10^{-16} - 2,2 \cdot 10^{-16} \text{ А/мкм}^2$ .

3. Способ формирования межкомпонентной изоляции канавками,

заполненными оксидом кремния, для ИМС с проектными нормами  $0,25 \div 0,35$  мкм, в котором с целью исключения увеличения разновысотности топографического рельефа для заполнения канавок используются пленки оксида кремния, осажденного при субатмосферном давлении, с последующей химико-механической полировкой и уплотнением при температуре  $950 \div 1050$  °С, обеспечивающее выравнивание скоростей травления субатмосферного и термического оксида кремния и равномерное удаление слоёв оксида кремния с поверхности подложки, позволяет за счёт исключения термического окисления монокристаллического кремния уменьшить ширину межкомпонентной изоляции с  $0,75$  мкм до  $0,5$  мкм и снизить разновысотность топографического рельефа с  $0,25$  мкм до менее  $0,05$  мкм.

4. 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 вольфрама, исключение их образования при потоке моносилана равном или более  $50 \text{ см}^3/\text{мин}$  и длительности обработки равной или более  $22$  с обеспечивает формирование равномерного зародышевого слоя вольфрама, исключает образование пустот в контактных окнах и позволяет формировать двух и трёхуровневые соединения субмикронных ИМС с контактными сопротивлениями между уровнями – не более  $24 \text{ Ом}/\text{мкм}^2$ , а к активным областям и поликремнию – не более  $120 \text{ Ом}/\text{мкм}^2$ .

Научный руководитель, доктор технических наук, доцент,  
начальник управления электроники и приборостроения,  
электротехнической и оптико-механической промышленности  
Министерства Промышленности Республики Беларусь

  
\_\_\_\_\_ А.С. Турцевич  
\_\_\_\_\_ 27.12 2021 года

Подпись Турцевича А.С. заверяю



