



**Акционерное общество**  
**«Научно-исследовательский институт точного машиностроения»**  
**(АО НИИТМ)**

Панфиловский проспект д. 10, г. Зеленоград, г. Москва, 124460.

Тел.: +7(495) 229-75-00, Факс: +7(495) 229-75-22

www.niitm.ru, E-mail: info@niitm.ru

ОКПО 07577292, ОГРН 1027700037749, ИНН 7735043966, КПП 773501001

Исх. № 360 от 14 09 2022г.

**О Т З Ы В**

на автореферат диссертации Наливайко О.Ю. на тему:

«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»

Все значительные научно-технические достижения человечества за последние более чем полвека после изобретения транзистора так или иначе связаны с успехами в развитии мировой полупроводниковой промышленности, базирующейся на достижениях в области физики твердого тела, новых технологий материалов, схемотехники и системотехники. Электронная промышленность является на сегодня одной из наиболее наукоемких отраслей промышленности.

Непрерывное повышение степени интеграции микросхем приводит к необходимости использования 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 для развития новых технологий в микроэлектронике. Для повышения надежности многоуровневых межкомпонентных соединений субмикронных ИМС требуется глобальная планаризация диэлектрика химико-механической полировкой, а также формирование вольфрамовых «столбиков» в контактах. Именно этим вопросам посвящена диссертация Наливайко О.Ю., что и определяет ее актуальность.

В работе проведен анализ процессов осаждения поликристаллического кремния, легированного в процессе роста химическим осаждением из газовой

фазы. Показано, что в настоящее время при производстве ИМС с субмикронными проектными нормами требуется использование более низких температур для термических обработок, в том числе и для активации легирующей примеси. Также предъявляются более высокие требования к шероховатости поверхности осаждаемых плёнок.

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 мелкими канавками, заполненными диэлектриком. Определены основные требования к межкомпонентной изоляции.

Рассмотрено современное состояние, основные проблемы формирования субмикронных структур с многоуровневыми межкомпонентными соединениями. Определены основные требования к многоуровневой металлизации субмикронных ИМС.

Проведен анализ процессов осаждения слоёв сплавов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и Ge и создания структур на их основе, в том числе структур для энергонезависимой памяти с инкорпорированными массивами самоорганизованных нанокристаллов Ge. Показано, что известные методы формирования матрицы самоорганизованных нанокристаллов Ge (ионной имплантации и осаждения сверхстехиометрических слоев оксида кремния) не обеспечивают получение массивов с однородным размером нанокристаллов и их равномерным распределением в матрице. Формирование нанокристаллов при помощи молекулярно-лучевой эпитаксии имеет низкую производительность, существенно удорожает и усложняет технологический процесс. Поэтому требуется разработка новых процессов формирования матрицы нанокристаллов Ge.

В диссертации исследована кинетика осаждения плёнок ПКЛФ в зависимости от температуры осаждения, давления и соотношения потоков  $\text{PH}_3/\text{SiH}_4$  ( $\gamma$ ). Показано, что увеличение скорости осаждения плёнок ПКЛФ может быть достигнуто за счет повышения степени заполнения адсорбционных центров молекулами моносилана при снижении  $\gamma$ .

Величина эффективной энергии активации процесса осаждения нелегированного кремния при давлении 80 Па составляет 1,5 эВ. При введении в реактор фосфина величина эффективной энергии активации процесса осаждения плёнок ПКЛФ снижается до 1,32 эВ при  $\gamma$  равном 0,001. Разработан процесс двухстадийного осаждения плёнок ПКЛФ, обеспечивающий получение плёнок со средней шероховатостью поверхности не более 2,1 нм (после термообработки при 950 °С для пленки толщиной 0,25 мкм), удельным сопротивлением 600 – 1000 мкОм·см, при скорости осаждения 2,2 – 2,5 нм/мин.

Также исследована кинетика осаждения слоёв сплавов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

Разработан и запатентован способ осаждения тонких слоёв  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , включающий осаждение зародышевого кремниевого слоя, осаждение основного слоя  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на зародышевом слое при температуре 550 – 560 °С и давлении от 0,05 до 0,15 мм рт.ст., при этом зародышевый слой осаждают

толщиной от 1 до 5 нм, а основной – от 5 до 20 нм, а содержание германия в слое составляет от 4 до 20 ат. %.

Разработан и внедрен на изделии СОЗУ 1Мбит, 3,3В по 0,35 мкм КМОП процессу способ формирования межкомпонентной изоляции с использованием канавок (STI), заполненных диэлектриком, обеспечивающий по сравнению с изоляцией LOCOS с промежуточным поликремниевым слоем уменьшение высоты рельефа структуры с 0,25 мкм до менее 0,02 – 0,05 мкм, уменьшение ширины изоляции с 0,75 мкм до 0,5 мкм, что позволяет повысить плотность упаковки и, соответственно, степень интеграции ИМС.

К числу заслуг соискателя следует отнести разработку способа формирования многоуровневой разводки для субмикронных ИМС с использованием процесса осаждения пленок вольфрама, обеспечивающего формирование однородного зародышевого слоя и исключение образования пустот в контактных окнах за счёт выдержки поверхности адгезионного слоя Ti/TiN в среде моносилана перед первой стадией осаждения при потоке моносилана 40 – 100 см<sup>3</sup>/мин и длительности обработки 25 – 40 с, что позволяет создавать двух и трехуровневые межкомпонентные 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 на пластинах диаметром 200 мм ИМС проектными нормами 0,6 – 0,35 мкм.

Также разработан и внедрен в производстве усовершенствованный способ формирования пассивирующих покрытий для ИМС с субмикронными проектными нормами, позволивший решить задачу обеспечения сплошности пассивирующего покрытия для изделий с проектными нормами 0,35 мкм.

Новизной отличаются положения исследования, относящиеся к технологии формирования нанокристаллов германия, инкорпорированных в диоксид кремния, которые могут использоваться для разработки новых приборов электронной памяти, использующих в качестве элементов хранения заряда (информации) нанокристаллы Ge, встроенные в затвор МОП-транзисторов. Разработан способ формирования МОП-структуры с матрицей нанокристаллов Ge, инкорпорированных в диоксид кремния, 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 методом химического осаждения из газовой фазы и капсулированного нитридом кремния, при этом гистерезис вольтфарадных характеристик МОП-структуры составляет 1,7 – 1,8 В, а плотность токов утечки –  $1,5 \times 10^{-16}$  –  $2,2 \times 10^{-16}$  А/мкм<sup>2</sup>.

Вместе с тем, из текста автореферата не ясно:

- при каких газовакуумных условиях проводилось осаждение плёнок вольфрама и какой тип реактора использовался;
  - не указано при какой температуре осаждался слой Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> с содержанием германия 20 – 30 ат.% и какова его толщина;
- Указанные недостатки не снижают общего уровня научной работы.

Достоверность и обоснованность результатов не вызывает сомнений. Они подтверждаются многочисленными методами исследования и внедрением результатов в производство.

В целом диссертационное исследование выполнено на достаточно высоком научном уровне, соответствует требованиям ВАК. Автор диссертации, Наливайко О.Ю., достоин присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01.

Зам. генерального директора  
по науке д.т.н. профессор

В.В. Одинокоев



Совет по защите  
диссертаций при БГУИР  
< 19 > 09 20 22 г.  
Вх. № 05.02-11/131