

**СОЗДАНИЕ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ
С МНОГОУРОВНЕВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ**

**О. Ю. НАЛИВАЙКО, А. А. ЦИВАКО, Н. С. КОВАЛЬЧУК,
В. Л. ТРУСОВ, В. Н. ЧУЙКО, А. М. КИСЕЛЬ
(ОАО «ИНТЕГРАЛ», Минск)**

Рассмотрены основные технологические процессы, используемые для производства интегральных микросхем с проектными нормами 0,35 мкм. Предложен маршрут формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными диэлектриком. Описаны особенности процессов осаждения пленок поликристаллического кремния, легированного фосфором в процессе роста, осаждения и химико-механической полировки слоев вольфрама, осаждения межуровневого диэлектрика и формирования многоуровневой металлизированной разводки с «контактными столбиками» из вольфрама.

С возрастанием степени интеграции уменьшаются топологические размеры элементов и зазоры между ними и возрастают требования к планарности топологического рельефа. При создании затворных электродов субмикронных структур требуется использовать поликристаллический кремний (ПК), 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 надежности 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. В настоящей работе рассматриваются технологические процессы, используемые для производства интегральных микросхем с проектными нормами 0,35 мкм на пластинах диаметром 200 мм.

С целью исключения «закороток» между проводящими слоями на топологическом рельефе интегральных микросхем (ИМС) с проектными нормами 0,35 мкм проведено исследование режимов формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными диэлектриком (STI-изоляции). Установлено, что для заполнения канавок целесообразно использовать пленки SiO₂, осажденные при субатмосферном давлении (СА ХОГФ), так как они заполняют канавки

без образования щели и «растратов» при последующих химических обработках. 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, что позволяет проводить удаление слоев оксида кремния с поверхности без увеличения высоты топологического рельефа. 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 (рисунок 1), что позволяет повысить плотность упаковки и может использоваться для ИМС с проектными нормами 0,25 – 0,35 мкм [1].

Исследована кинетика осаждения пленок поликристаллического кремния, легированных фосфором в процессе роста, с использованием фосфина (PH_3) и концентрированного моносилана (SiH_4) [2, 3]. Установлено, что повышение скорости осаждения плёнок ПКЛФ может быть достигнуто за счет повышения степени заполнения адсорбционных центров молекулами моносилана при снижении соотношения потоков PH_3/SiH_4 (γ) до $\leq 0,002$, так как при более низких γ еще не происходит полное блокирование адсорбции моносилана молекулами фосфина. При осаждении легированных плёнок кремния в аморфном состоянии (при температуре 540–560 °С) на подслое нелегированного аморфного кремния обеспечивается снижение шероховатости плёнок ПКЛФ до 2,1 нм (после активирующего отжига при 950 °С для плёнки толщиной 0,25 мкм), что в 5 раз ниже, чем у плёнок ПК [3]. Также достигается более высокий уровень легирования пленок ПКЛФ (600–1000 мкОм·см) и равномерное распределение легирующей примеси, улучшается конформность воспроизведения топологического рельефа (равномерность толщины на сложном рельефе). Использование защитного слоя оксида кремния позволяет исключить обеднение приповерхностного слоя легированного фосфором кремния во время проведения термической обработки.

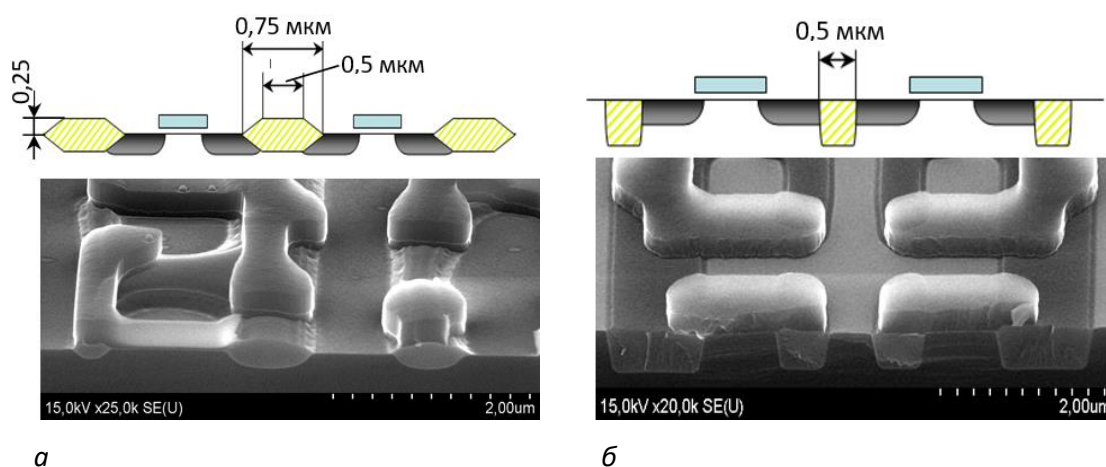


Рисунок 1. – РЭМ-фотографии структуры после формирования затвора с изоляцией *LOCOS* с промежуточным поликремниевым слоем (а) и с *STI*-изоляцией (б)

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.

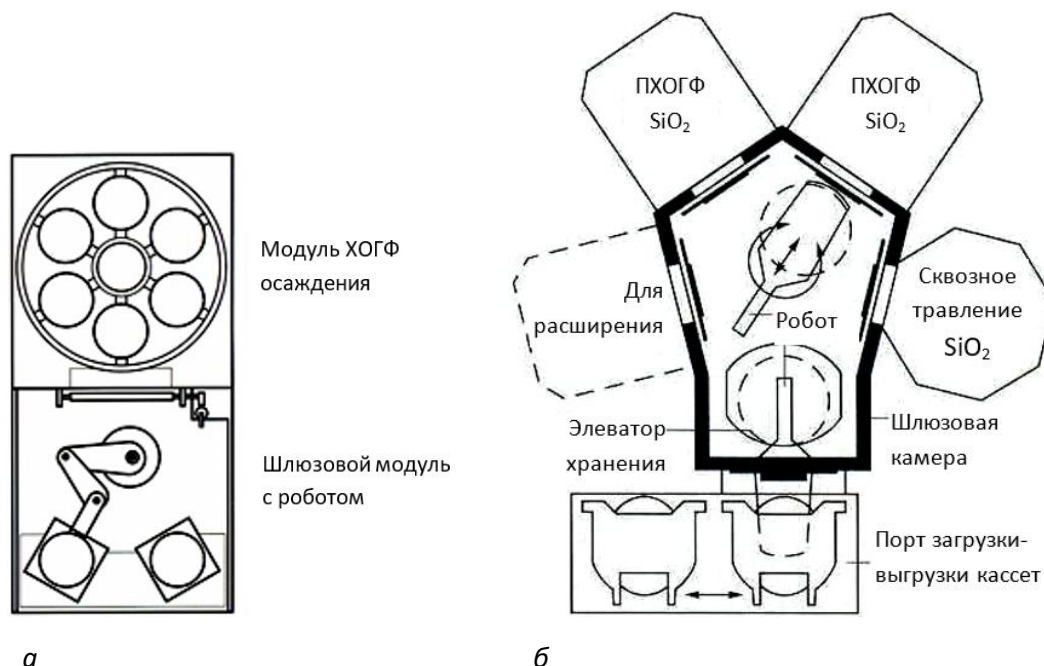
Для формирования межуровневого диэлектрика используются процессы осаждения с плазменной активацией (ПХ ХОГФ), которые позволяют проводить осаждение при более низких температурах по сравнению с процессами осаждения при пониженном и атмосферном давлении за счет использования энергии плазменного высокочастотного (ВЧ) разряда, при котором создаются более реакционноспособные радикалы [4]. Кроме того, использование плазменного разряда позволяет повысить скорость осаждения пленок по сравнению с термическими процессами. В качестве реагентов используются моносилан и закись азота (N₂O) или тетраэтоксисилан (ТЭОС) и кислород.

Основные характеристики процессов осаждения и получаемых пленок оксида кремния на установках Concept-1 и Precision-5000CVD приведены в таблице 1 [4]. На установках Concept-1 (рисунок 2, а) [5] реакционная камера имеет шесть позиций с резистивным нагревом подложек, на каждой из которых осаждается одна шестая часть конечной толщины пленки. На установках Concept-1 на одном реакторе может использоваться и моносилан и ТЭОС, однако как показывает практика, при переходе с одного реагента на другой может происходить увеличение привносимой дефектности.

Таблица 1. – Сравнение параметров процессов осаждения и свойств пленок оксида кремния

Параметр процесса	Concept-1		Precision 5000		
	SiH ₄	ТЭОС	SiH ₄	ТЭОС	ТЭОС
Тип обработки	поштучная, послойная		поштучная		
Тип нагрева	резистивный		ламповый		
Температура, °С	400	350	400	380	370
Давление, мм рт.ст.	2,4	2,4	2,8	8,2	450 без плазмы
Скорость осаждения, нм/мин	230–290	500–550	>800	>750	> 240
Однородность толщины по пластине, %	< ±2,3	< ±2,3	< ±1,5	< ±1,5	< ±2,5
Показатель преломления	1,45–1,48	1,45–1,48	1,45–1,48	1,45–1,48	1,42–1,46
Механические напряжения, МПа	50–150 сжимающие	50–150 сжимающие	< 50 сжимающие	50–100 сжимающие	< 350 растягивающие

В тоже время на установке Precision 5000 (рисунок 2, б) [5] могут использоваться различные реакторы для работы с SiH_4 и ТЭОС. В реакторе, работающем с ТЭОС можно проводить и процесс осаждения при субатмосферном давлении (СА ХОГФ) без плазменной активации с использованием смеси ТЭОС/озон (O_3). Для этого используется универсальный реактор для процессов с использованием ТЭОС (Universal TEOS Chamber) [5], что позволяет последовательно проводить процессы СА ХОГФ и ПХ ХОГФ (ТЭОС) и исключить воздействие атмосферной влаги на пленку СА ХОГФ SiO_2 .



а

б

а – установка Concept-1 фирмы Novellus;

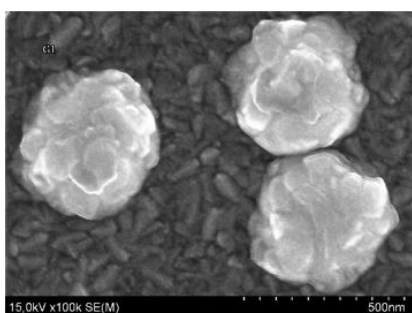
б – установка Precision-5000 CVD фирмы Applied Materials

Рисунок 2. – Конфигурации установок для осаждения пленок с плазменной активацией

При формировании межуровневой изоляции необходимо обеспечить конформное заполнение пространства (зазоров) между поликремниевыми и металлическими шинами. Для этого используется осаждение оксида кремния при субатмосферном давлении из ТЭОС. Однако пленки оксида кремния, осажденные при субатмосферном давлении имеют высокие механические напряжения (до 350 МПа, растягивающие), что может привести к растрескиванию формируемой структуры. Поэтому для снижения механических напряжений используется составная структура СА ХОГФ SiO_2 + ПХ ХОГФ SiO_2 , в которой пленки ПХ ХОГФ SiO_2 (ТЭОС), имеющие сжимающие напряжения, компенсируют механические напряжения пленок СА ХОГФ SiO_2 . Установлено, что оптимальной структурой для межуровневого диэлектрика является СА ХОГФ SiO_2 (ТЭОС) 0,6 мкм + ПХ ХОГФ SiO_2 (ТЭОС) 1,4 мкм.

Проведено исследование влияния длительности обработки пластин в среде SiH_4 и потока SiH_4 на однородность зародышеобразования вольфрама на установке

Precision-5000WCVD (рисунок 3). Атомарный слой кремния, образовавшийся во время выдержки в среде SiH_4 , способствует уменьшению времени, необходимого для инициации зародышеобразования. Экспериментально установлено, что плотность зерен вольфрама размером более $0,1 \text{ мкм}$ с увеличением длительности обработки поверхности адгезионного слоя Ti/TiN в среде моносилана уменьшается и при потоке моносилана, равном $50 \text{ см}^3/\text{мин}$, и длительности обработки, равной 22 с , образование таких зерен вольфрама исключается (рисунок 4), при этом обеспечивается формирование равномерного тонкого зародышевого слоя вольфрама, исключается образование пустот и улучшается заполнение контактных окон пленками вольфрама (рисунок 5) [6].



100 000 \times

Рисунок 3. – Поверхность пластины после проведения зародышеобразования вольфрама без выдержки в среде SiH_4

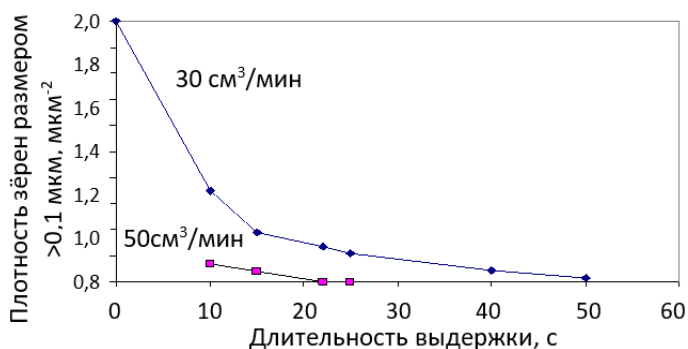


Рисунок 4. – Зависимость плотности зерен вольфрама размером более $0,1 \text{ мкм}$ от длительности обработки в среде моносилана при разных потоках

Определены условия процесса ХМП вольфрама на установке Auriga EC, обеспечивающие скорость полировки $>330 \text{ нм}/\text{мин}$, селективность полировки вольфрама по отношению к $\text{SiO}_2 >100$ и отсутствие вибрации [7]:

- скорость вращения полировального стола – $8\text{--}10 \text{ об.}/\text{мин}$;
- усилие прижима носителя пластины – $2,83\text{--}3,19 \text{ Н}/\text{см}^2$.

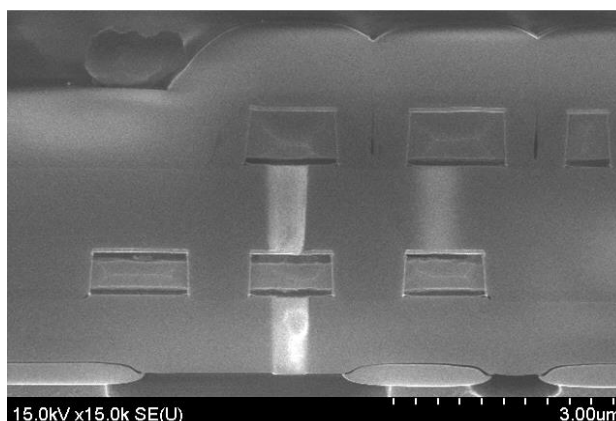
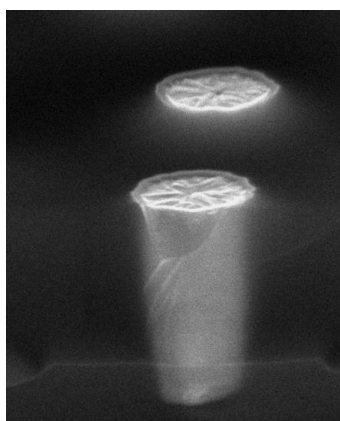


Рисунок 5. – РЭМ-фотографии двухуровневой металлизации с вольфрамовыми контактными столбиками

Формирование многоуровневой металлизированной разводки для субмикронных ИМС [8], включает чередование операций осаждения и ХМП межслойного диэлектрика, формирования контактных окон, осаждения адгезионных/барьерных слоев (Ti/TiN), осаждения сплошной пленки вольфрама с последующим удалением пленки вольфрама с поверхности путем ХМП и формирования межкомпонентных соединений на основе алюминия. При использовании слоев силицидов и полицидов металлов это позволяет создавать двух- и трехуровневые соединения с контактными сопротивлениями между уровнями не более 24 Ом/мкм², а к активным областям и поликремнию – не более 120 Ом/мкм². Это позволило освоить производство ИМС с проектными нормами 0,35 – 0,60 мкм на пластинах Ø 200 мм.

Таким образом, разработан комплекс технологических процессов, включая осаждение слоев поликристаллического кремния, легированных фосфором в процессе роста, вольфрама, формирование полицида титана, формирование междууровневой изоляции, формирование межкомпонентной изоляции и многоуровневой металлизированной разводки с «контактными столбиками из вольфрама», что позволило освоить производство ИМС с проектными нормами 0,35 – 0,60 мкм на пластинах диаметром 200 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Межкомпонентная изоляция канавками, заполненными диэлектриком, для субмикронных ИМС / О. Ю. Наливайко [и др.] // ЭЛЕКТРОНИКА НТБ. – 2022. – № 6. – С. 134–140.
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. Осаждение плёнок поликристаллического кремния, легированного в процессе роста фосфором, в вертикальном реакторе пониженного давления / О. Ю. Наливайко [и др.] // Материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. «Квантовая электроника», Минск, 18–22 ноября 2019 г. / Минск: РИВШ, 2019. – С. 157–158.
4. Осаждение пленок оксида кремния с использованием плазменной активации при производстве интегральных схем / О. Ю. Наливайко [и др.] // Материалы и структуры современной электроники: материалы VIII Междунар. науч. конфер., Минск, 10–12 октября 2018 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2018. – С. 86–91.
5. 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.
6. Влияние условий зародышеобразования на процесс осаждения плёнок вольфрама при пониженном давлении / О. Ю. Наливайко [и др.] // Вакуумная техника и технология. – 2010. – Т. 20, № 2. – С. 105–109.
7. 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.

8. 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.