

Применение методов химического осаждения тонких слоёв из газовой фазы для микросхем с технологическими нормами 0,35-0,18 мкм.

Часть 1. Основные тенденции развития методов

Васильев В. Ю.

Проанализирована совокупность различных аспектов применения методов химического осаждения тонкослойных неорганических кремнийсодержащих материалов (поликристаллический кремний, нитрид кремния, диоксид кремния и силикатные стёкла) из газовой фазы (ХОГФ) для изготовления интегральных микросхем (ИМС) с алюминиевой системой коммутации и технологическими нормами 0,35-0,18 мкм. Работа состоит из 5 частей. Рассмотрены основные тенденции развития и проблематика методов ХОГФ применительно к технологии ИМС. Проанализированы местоположение тонкослойных материалов в ИМС с многоуровневой системой коммутации и требования к методам их получения, основные тенденции развития промышленных методов ХОГФ. К основным проблемам ХОГФ отнесены: поиск оптимальных реагентов и конструкции аппаратуры, снижение дефектности осаждённых материалов, рост на рельефных поверхностях и заполнение узких зазоров в ИМС, контроль качества и оптимизация процессов ХОГФ и свойств слоёв.

Введение

В интегральных микросхемах (ИМС) с технологическими нормами менее 3,0 мкм используются такие неорганические кремнийсодержащие материалы как поликристаллический кремний, нитрид кремния, диоксид кремния и силикатные стёкла на его основе. Эти материалы непосредственно получают в производстве ИМС в виде слоёв толщиной 0,01-1,5 мкм. Среди известных методов создания неорганических покрытий на поверхности твердых тел ведущее место занимают методы химического осаждения из газовой фазы [1-3] (в отечественной литературе обобщённо обозначаемые аббревиатурой ХОГФ, а в зарубежной - термином Chemical Vapor Deposition, CVD). Широкое распространение метода ХОГФ в промышленном производстве обусловлено его относительной аппаратурной простотой и безопасностью, технологичностью и высоким качеством покрытий, получаемых в оптимальных условиях.

Интенсивное развитие исследований в области ХОГФ тонкослойных покрытий на основе кремния датируется началом 1970-х годов. В значительной мере это было обусловлено созданием и быстрым развитием технологии твердотельных ИМС на подложках из монокристаллического кремния. В работе рассматриваются местоположение тонкослойных материалов в ИМС с многоуровневой системой коммутации, требования к методам ХОГФ, основные тенденции развития промышленных методов ХОГФ, а также проблемы методов осаждения применительно к технологии твердотельных ИМС с технологическими нормами 0,35-0,18 мкм и с алюминиевой системой коммутации. За основу взяты литературные источники за последние 30 лет, а также собственный опыт и публикации автора.

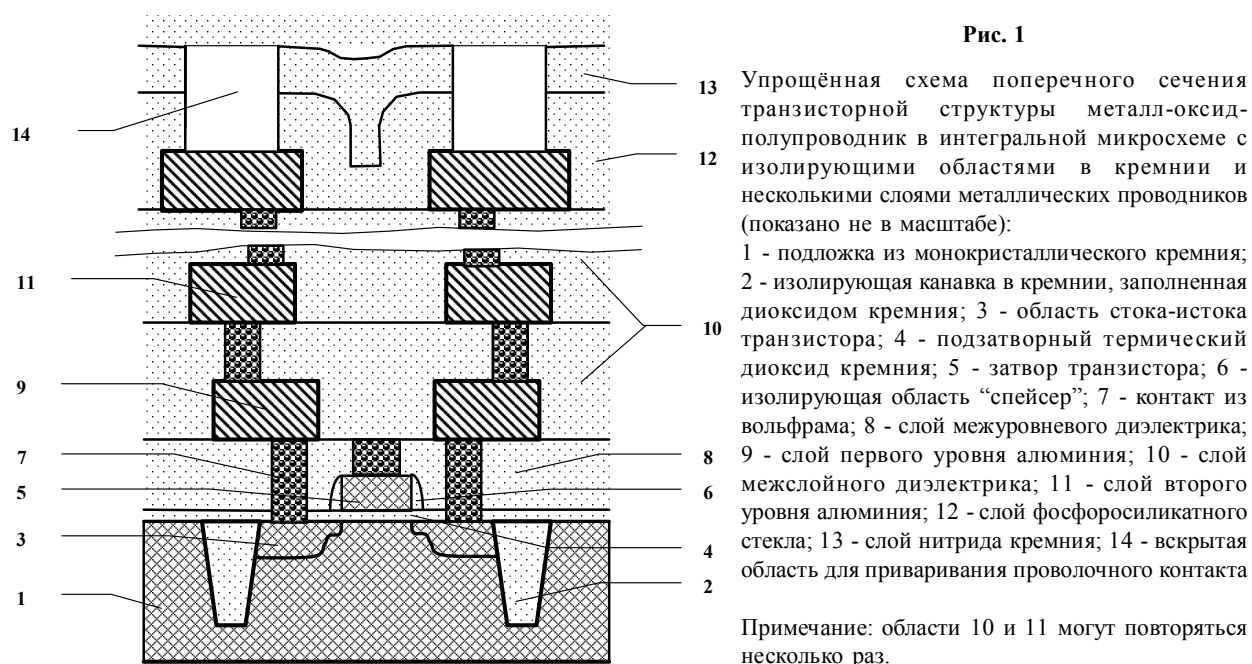
1. Материалы в виде тонких слоёв в ИМС

Исторически первыми для финишной пассивации ИМС стали применяться ХОГФ слои фосфоросиликатного стекла (ФСС), затем слои диоксида кремния, нитрида кремния,

поликристаллического кремния, борофосфоросиликатного стекла (БФСС). По мере усложнения конструкции и технологии ИМС и возрастания количества транзисторных структур на единицу площади возникла необходимость увеличивать количество уровней проводников и изоляторов в системе металлической коммутации микросхем [4]. В этой связи в общем технологическом процессе создания твердотельных ИМС непрерывно возрастает удельная доля группы процессов ВЕОЛ (Back End Of Line), объединяющей технологические процессы, начиная с нанесения предметаллического диэлектрика (Pre-Metal Dielectric, PMD) перед первым уровнем алюминиевой коммутации, процессы создания системы многослойной металлизации с металлами и диэлектриками (Inter-Metal Dielectric, IMD) и финишной пассивации микросхем.

Пример использования тонкослойных ХОГФ материалов применительно к субчетвертьмикронной ИМС показан на упрощённой схеме поперечного сечения условной транзисторной структуры с элементами коммутации в виде металлических проводников (рис. 1). Расшифровка обозначений материалов дана в таблице, где также кратко приведено назначение тонких слоёв, обобщённые условия осаждения и реакторы ХОГФ. Указанные слои могут использоваться как в активных элементах ИМС, в совокупности составляющих собственно саму интегральную схему, так и как вспомогательные, то есть временно для формирования рисунков или локальных узлов ИМС (например, локальных областей окисленного кремния или изолирующих областей в кремнии, заполненных диоксидом кремния). Кроме вышеперечисленных материалов в последние годы XX столетия в технологии ИМС стали использоваться слои антиотражающих покрытий для улучшения качества фотолитографии и слои диэлектрических материалов с низкой диэлектрической постоянной, разделяющие металлические проводники в системе многоуровневой коммутации.

Данные таблицы 1 показывают, что получение тонкослойных материалов может осуществляться при температуре 300-900°C в широком диапазоне условий ХОГФ. При низких температурах дополнительно может использоваться активация газовой фазы, например, высокочастотным разрядом. Наиболее принципиальным фактором, определяющим качество получаемого при ХОГФ материала, является температура



синтеза. Её допустимые величины диктуются конструкцией и технологией изготовления приборов: как правило, после окончательного формирования транзисторных структур температура ХОГФ или термообработок тонких слоёв не должна превышать ~ 900°C, а после формирования первого уровня коммутирующего алюминиевого слоя температура должна быть менее ~ 450°C.

Таблица

Основные данные о получении материалов для ИМС методами ХОГФ

№	Материал тонкого слоя, температурный диапазон синтеза		Метод ХОГФ*	Исходные вещества, температура синтеза	Назначение и обозначение см. рис.1
1	Кремний	Поликристаллический	РНД	SiH ₄ , 620°C	Затвор транзисторов (5)
		Аморфный	РНД	SiH ₄ , 550°C	
2	Нитрид кремния	Высокотемпературный	РНД	SiH ₂ Cl ₂ – NH ₃ , 800°C	Вспомогательный слой – формирование изолирующих областей в кремнии
		Низкотемпературный	ПХО	SiH ₄ –NH ₃ , < 400°C	Защитное покрытие ИМС (13)
3	Оксинитрид	Низкотемпературный	ПХО	SiH ₄ -N ₂ O-N ₂ , < 400°C	Вспомогательный слой - антиотражающее покрытие
4	Диоксид кремния	Высокотемпературный	РНД	Si(OC ₂ H ₅) ₄ -O ₂ , 650-700°C	Изолирующие области в кремнии (2) и спейсер (6)
		Среднетемпературный	РПД	Si(OC ₂ H ₅) ₄ -O ₃ /O ₂ , 550°C	
			ПВП	SiH ₄ -O ₂ , 650°C	
		Низкотемпературный	РАД/РПД	Si(OC ₂ H ₅) ₄ -O ₃ /O ₂ , 400-440°C	Изолирующие области в кремнии (2) и межслойная изоляция (10) между слоями металлизационных проводников
			ПХО	Si(OC ₂ H ₅) ₄ -O ₂ , < 400°C	
				SiH ₄ -N ₂ O, < 400°C	
ПВП	SiH ₄ -O ₂ , < 400°C				
5	Легированные оксиды	Высокотемпературный (БФСС)	РПД	Si(OC ₂ H ₅) ₄ -O ₂ -B(OC ₂ H ₅) ₃ -PH ₃ , 800°C	Межуровневая изоляция (8) между затвором и первым слоем металлических проводников
		Среднетемпературный (ФСС, БФСС)	РПД	Si(OC ₂ H ₅) ₄ -O ₃ /O ₂ -B(OC ₂ H ₅) ₃ -PO(OC ₂ H ₅) ₃ , 400-550°C	
			ПВП	SiH ₄ -O ₂ -PH ₃ , 650°C	
		Низкотемпературный (ФСС)	ПХО	SiH ₄ -N ₂ O-PH ₃ , < 400°C	Защитное покрытие ИМС (12)
Si(OC ₂ H ₅) ₄ -O ₂ -PO(OC ₂ H ₅) ₃ , 360°C					
6	Фторированный оксид	Низкотемпературный	ПХО	Si(OC ₂ H ₅) ₄ -C ₂ F ₆ -O ₂ , < 400°C	Межслойная изоляция (10) с пониженной диэлектрической постоянной
				Si(OC ₂ H ₅) ₄ -SiF(OC ₂ H ₅) ₃ -O ₂ , 300-400°C	
			ПВП	SiH ₄ -SiF ₄ -O ₂ , < 400°C	

* Примечание: РНД – реактор низкого давления; РПД – реактор пониженного давления; РАД – реактор атмосферного давления; ПХО – плазмо-химическое осаждение; ПВП – плазма высокой плотности

2. Основные тенденции развития промышленных методов ХОГФ

Пик исследований в области ХОГФ тонких слоёв для микроэлектроники можно датировать 1980-1990 годами, когда были определены главные тонкослойные материалы для больших ИМС, изучены их базовые свойства, прошли апробацию различные аппаратурные подходы, были намечены направления исследований и разработок для технологии перспективных сверхбольших многоуровневых ИМС.

Тенденции дальнейшего развития методов осаждения из газовой фазы применительно к технологии микроэлектроники определялись интенсивным развитием массового производства кремниевых пластин с чипами с конца 1980-х годов прошлого столетия, в том числе на Foundry предприятиях стран Юго-Восточной Азии. Тогда же началось разделение рынка оборудования между несколькими ведущими производителями аппаратуры для ХОГФ. Возрастание массового производства ИМС сыграло существенную роль в конкуренции фирм-производителей оборудования, которые осуществляли вложения значительных средств в совершенствование существующих и разработку новых установок и технологических процессов для ХОГФ. В конечном итоге это привело к появлению на аппаратурном рынке ХОГФ близкого по характеристикам чрезвычайно дорогостоящего автоматического оборудования, ориентированного для массового производства изделий микроэлектроники. В силу этого исследовательские работы по технологии в области ХОГФ тонких слоёв для микроэлектроники с начала 1990-х годов в основном переместились к производителям оборудования. Как результат, продажа современного оборудования осуществляется в комплекте с базовыми процессами осаждения тонких слоёв, предварительно отработанными соответствующими исследовательскими отделами изготовителей оборудования. Такие работы проводятся в сжатые сроки под задачу своевременного захвата определённого сегмента рынка для последующих массовых поставок оборудования.

Перспективные исследовательские работы в силу дороговизны оборудования осуществляются путём совместных исследований и демонстрационных экспериментальных работ передовых предприятий-разработчиков технологии микроэлектроники и передовых производителей оборудования. При этом решаются вопросы применимости существующего оборудования для следующих поколений ИМС и определяются задачи по его модернизации, определяются новые направления машиностроения для ХОГФ применительно к нуждам микроэлектроники. Результатом исследований является патентование широкого круга технических решений и модернизация отдельных узлов оборудования. В дальнейшем такое оборудование и разработанные на нём технологические процессы становятся практически стандартизированными для массовых производителей ИМС на Foundry предприятиях.

Принципиальные изменения стратегии деятельности фирм-производителей оборудования для микроэлектроники можно сформулировать следующим образом. Если в 1970-х годах производители оборудования поставляли только установки (на которых разработчики технологии ведущих предприятий-производителей ИМС разрабатывали собственные технологические процессы), то в 1980-х оборудование поставлялось с индивидуальным технологическим процессом. С 1990-х годов поставляется многофункциональное оборудование, дающее возможность проводить, например, как ХОГФ тонкого слоя или сэндвич-структур (комбинации тонких слоёв), так и их термообработки (например, путём импульсного термического отжига). С начала нового века ведущие фирмы-производители оборудования на своих опытных участках предлагают разработчикам и производителям ИМС решение комплексных вопросов полного BEOL-

цикла, например, создание полной системы коммутации ИМС. В это же время изменились и подходы к обслуживанию оборудования для ХОГФ у потребителей. Для минимизации эксплуатационных затрат предприятий-владельцев оборудования оно может обслуживаться круглосуточно дочерними сервисными предприятиями ведущих поставщиков оборудования.

3. Основная проблематика ХОГФ применительно к технологии ИМС

Совокупность накопленных литературных и практических данных за последние 25 лет систематизирована в работах [5,6]. Анализ тенденций развития метода за рассматриваемый период времени даёт возможность структурировать основные проблемы, которым уделялось пристальное внимание в научно-технической литературе:

- поиск наиболее подходящего исходного вещества или комбинаций веществ для получения тонких слоёв; исследования кинетики осаждения слоёв в конкретных реакторах ХОГФ при определённых условиях осаждения;

- поиск наилучшей конструкции реактора и аппаратуры в целом, в том числе для достижения максимальной производительности процессов ХОГФ, максимальной однородности (равномерности толщины) осаждённого материала в пределах подложки, повышения безопасности производства;

- однородное покрытие слоями ступенек рельефа ИМС и качественное заполнение узких зазоров между элементами субполумикронных ИМС тонкослойными материалами для предотвращения образования пустот;

- снижение дефектности тонких слоёв;

- контроль качества и оптимизация процессов ХОГФ.

Выделенные проблемы кратко характеризуются ниже; более подробно их анализ и технические решения рассматриваются в последующих частях настоящей работы.

3.1. Исходные вещества для ХОГФ кремнийсодержащих слоёв

Для получения тонкослойных кремнийсодержащих материалов методами ХОГФ использовались различные газообразные и жидкие исходные соединения кремния. Опробованы различные легирующие вещества, окислители, азотсодержащие реагенты, газоносители. Отметим, что квалификация исходных материалов во всех случаях эквивалентна ОСЧ.

Исторически первым и универсальным веществом для получения всех типов кремнийсодержащих слоёв были гидриды: моносилан SiH_4 , фосфин PH_3 и диборан B_2H_6 . Их применяют до сих пор для получения нелегированного и легированного поликристаллического кремния путём термического разложения гидридов при температуре около 620°C (реакция пиролиза), а также для получения оксидных слоёв в окислительных реакциях гидридов с кислородом при температуре около 400°C . Недостатком гидридов является их высокая токсичность и пожароопасность, а также способность к реакциям в газовой фазе при ХОГФ с образованием микрочастиц (например, аэросила) с размерами, превышающими допустимые в технологии ИМС. Моносилан как источник кремниевого компонента тонких слоёв применяется для синтеза поликремниевых и аморфных кремнийсодержащих слоёв, а также нитридных и оксинитридных слоёв с использованием плазменного разряда [7]. Альтернативой кислороду для реакций окисления гидридов в ряде случаев является “мягкий окислитель” закись азота N_2O [6].

В начале 1980-х годов для промышленного получения слоёв высокотемпературного нитрида кремния был окончательно выбран дихлорсилан SiH_2Cl_2 , хотя имеются промышленные технологии с использованием моносилана и тетрахлорида кремния. Для получения низкотемпературных оксидных слоёв в конце 1980-х годов окончательное предпочтение было отдано жидким органическим веществам: тетраэтоксисилану

$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ и его комбинациям с органическими эфирами борной и фосфорной кислот, например, $\text{B}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ и $\text{PO}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ [7-9]. При этом наиболее употребительными стали два направления низкотемпературного ХОГФ: комбинацией эфиров с кислородом с плазменной активацией газовой смеси и окислением эфиров смесью озона с кислородом при термической активации.

Для ИМС с проектными нормами менее 0,18 мкм используют новые типы диэлектрических материалов с пониженной диэлектрической постоянной – неорганические фторсодержащие или углеродсодержащие слои оксидов кремния [10]. Для их получения применяются: тетрафторид кремния SiF_4 , комбинация $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ - C_2F_6 , фтортриэтоксисилан $\text{SiF}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$, алкилзамещённые моносилана и более сложные кремнийорганические вещества.

Появление альтернативных уже используемым соединений для ХОГФ происходит, как правило, не из-за конкретных технических преимуществ новых веществ, а вследствие “патентной чистоты”, необходимой для продвижения новых продуктов фирм-производителей оборудования.

3.2. Аппаратура для ХОГФ кремнийсодержащих слоёв

В микроэлектронной технологии параллельно с уменьшением размеров элементов ИМС происходило увеличение диаметра подложек: от нескольких десятков миллиметров в начале 70-х годов к 100 мм в 80-х годах и далее к 200 мм в 90-х годах прошлого столетия. В настоящее время производство ИМС начато на подложках размером 300 мм, а к 2012 году прогнозируется освоение кремниевых подложек диаметром 450 мм [4]. Таким образом, задача ХОГФ тонких слоёв состоит как в определении принципиальных условий получения материалов с заданными свойствами, так и в воспроизведении свойств материала на все более и более возрастающей площади подложек. Для осаждения тонких слоёв методами ХОГФ использовались разнообразные конструкции реакторов, подробному анализу которых посвящена вторая часть настоящей статьи. Ниже кратко охарактеризовано наиболее важное оборудование.

Исторически первым промышленным реактором был конвейерный реактор атмосферного давления (РАД), разработанный фирмой Watkins-Johnson Company для осаждения низкотемпературных оксидных слоёв: диоксида кремния, ФСС и БФСС [11]. В таком реакторе газовая смесь гидридов нужного состава подаётся из узких продольных щелей газораспределительной системы, ориентированных перпендикулярно движению подложки на конвейерной ленте. Поток кислорода подаётся по другой щели газораспределительной системы и отделяется от потока гидридов мощным потоком азота (завесой). В результате смешение реагентов происходит непосредственно вблизи поверхности нагретой подложки. В начале 1990-х годов, когда гидридная технология перестала удовлетворять требованиям ИМС по макродефектности, эта же идея реактора была использована для низкотемпературного осаждения оксидных слоёв из смесей органических эфиров и озон-кислородной (O_3/O_2) смеси [12]. На сегодняшний день конвейерная конструкция является пока единственной, в которой закономерности роста слоя при выбранных условиях не зависят от размера и формы подложек, а определяются только конструкцией и параметрами щелей газораспределительной системы.

В 70-х годах использовались разнообразные конструкции РАД, наиболее существенными общими недостатками которых были плохая однородность толщины слоя по площади подложки и значительная дефектность тонких слоёв. Поэтому с конца 1970-х годов для осаждения любых типов тонкослойных материалов в производстве ИМС стали применять трубчатые реакторы низкого давления (РНД) с горячими стенками.

Такие реакторы представляют собой откачиваемую цилиндрическую (кварцевую) трубу, установленную в электропечи сопротивления. В РНД осаждение слоёв проводится одновременно на 50-150 подложек независимо от их диаметра, которые устанавливаются группой с малым зазором в направлении вертикально коаксиально газовому потоку. Недостатком РНД является значительная суммарная продолжительность процесса вследствие очень низких (несколько десятков Å/мин) скоростей осаждения.

Тенденция постоянного увеличения размеров кремниевых подложек, а также принципиальная невозможность достижения хорошей однородности низкотемпературных слоёв диоксида кремния, ФСС и БФСС в РНД привели в конце 1980-х годов к появлению новых концепций конструирования реакторов для осаждения слоёв. В отличие от применяемых ранее групповых РНД, новые реакторы преимущественно конструировались как индивидуальные, то есть для обработки одной пластины за один технологический цикл осаждения слоя. Индивидуальные реакционные камеры оснащены комплектом газоподводящих и вакуумных аксессуаров и работают в широком диапазоне давлений и температур, то есть как РНД, как реакторы пониженного давления (РПД), а также и как РАД. В качестве наиболее универсальной и ставшей подлинно массовой здесь следует назвать индивидуальную камеру для ХОГФ самого крупного в США производителя аппаратуры для производства полупроводников – фирмы Applied Materials, Inc., которая введена на рынок оборудования под названием Precision 5000 или P 5000 [13].

Для повышения суммарной производительности и сокращения производственной площади индивидуальные реакционные камеры обычно объединяют на общей платформе в так называемые кластерные конструкции [14], где количество одинаковых или различных по назначению индивидуальных камер может составлять от трех до пяти. Отличительной особенностью установок на базе P 5000 является универсальность. При замене внутренних сборок в самой камере в ней могут проводиться операции термически и плазмоактивированного осаждения всех типов тонких слоёв; возможно последовательное осаждение разных типов слоёв, в том числе активированное плазменным разрядом, а также и импульсный ламповый отжиг тонкослойных структур. Индивидуальные камеры также имеют встроенные системы травления стенок реакционной камеры плазмоактивированным потоком фторсодержащих газов, что позволяет производить очистку камеры сразу после осаждения слоя, тем самым существенно продляя срок непрерывной работы оборудования. Индивидуальные реакторы и кластерные конструкции на их основе позволяют достичь прекрасных параметров ХОГФ низкотемпературных оксидных и нитридных слоёв ($< 0,1$ шт/см² для дефектов размером $> 0,2$ мкм). При этом возможны очень высокие, до 1 мкм/мин, скорости наращивания. Заметим, что, несмотря на различие конструкций камер для плазменного осаждения, в целом идеи индивидуальных конструкций реакторов ПХО принципиально почти не отличаются от давно известных диодных систем ПХО [7,8].

3.3. Покрытие ступенек рельефа и качественное заполнение узких зазоров в ИМС при ХОГФ

В технологии ИМС осаждение слоёв материалов при ХОГФ осуществляется как на кремниевые подложки с плоской поверхностью, так и на подложки с рельефом, который получается в результате процессов направленного плазменного травления слоёв. Рельеф можно упрощённо представить состоящим из ступенек и зазоров (см. рис. 2). На плоской поверхности практически любой оптимизированный метод ХОГФ даёт возможность получать слои с хорошей однородностью толщины на всей поверхности

подложки. Как правило, в этом случае целесообразно применение высокопроизводительных, то есть высокоскоростных процессов, например, плазменных методов ХОГФ. Однако при ХОГФ на рельефные подложки толщина слоёв на отдельных элементах рельефа существенно различается.

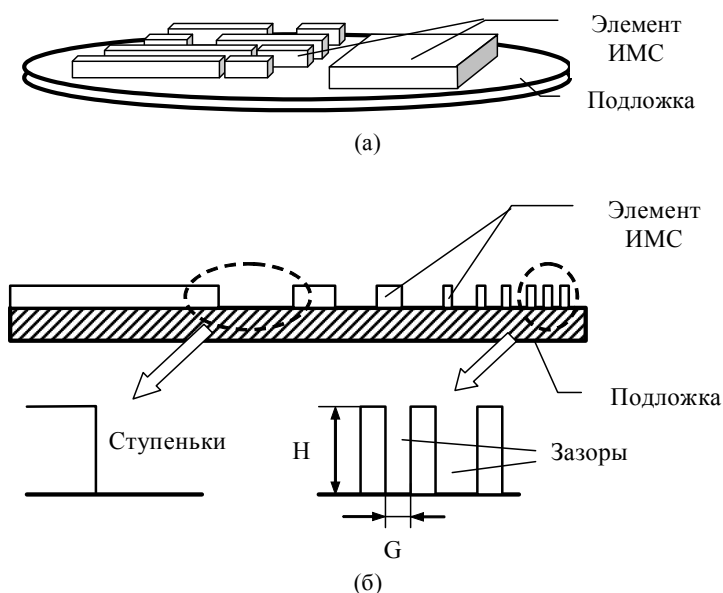


Рис. 2

Схематическое изображение полупроводниковой подложки с рельефом сбоку (а) и в сечении с расшифровкой обозначений (б)

Уменьшение размеров элементов ИМС ставит перед методами ХОГФ задачу качественного покрытия поверхности или заполнения осаждаемым материалом очень узких зазоров между элементами рельефа, что во многом определяет надёжность микросхем. Проблема реально обозначилась в ИМС с проектными нормами менее 0,35 мкм. В зарубежной литературе для характеристики заполнения зазоров применяется термин *gap-fill*. Рельеф микросхем (см. рис. 2б) принято характеризовать геометрическим отношением глубины узкого пространства между элементами (H) к величине зазора между элементами (G). Это соотношение сторон обозначается термином *aspect ratio* ($AR = H/G$). Величина AR в зависимости от конструкции конкретного прибора может варьироваться от 1:1 до 10:1 и более. Угол наклона боковой стенки элементов микросхемы к плоскости её поверхности может составлять 90° , но на практике отличается от прямого в обе стороны.

На рис. 3а показан относительно маловероятный идеальный случай ХОГФ, когда строго прямоугольный в сечении зазор между элементами ИМС заполнен полностью. На практике в подавляющем большинстве случаев осаждения слоёв на рельефных структурах возникает проблема образования неоднородностей осаждённого материала внутри зазоров. Неоднородность проявляется в виде пустот, которые отчетливо видны при анализе поперечных сколов рельефных структур ИМС методами растровой электронной микроскопии (РЭМ). В зависимости от условий ХОГФ слоёв степень незаполненности зазоров может проявляться в различной форме пустот. Наиболее типичной является *keyhole*, по форме напоминающая треугольную замочную скважину (см. рис. 3б,в). Размеры пустот коррелируют с изменением характеристики ХОГФ, именуемой либо покрытие ступеньки (*step coverage*), либо конформность (*conformality*), то есть однородность (равномерность) осаждения слоёв. Эта характеристика

количественно может быть выражена, например, в виде угла осаждённого слоя на ступеньке (A_0). Чаще всего конформность характеризуют отношением толщины осаждённого слоя на боковой грани ступеньки (d_s) к толщине слоя на верхней поверхности ступеньки (d_T) d_s/d_T (%) (см. рис. 3б).

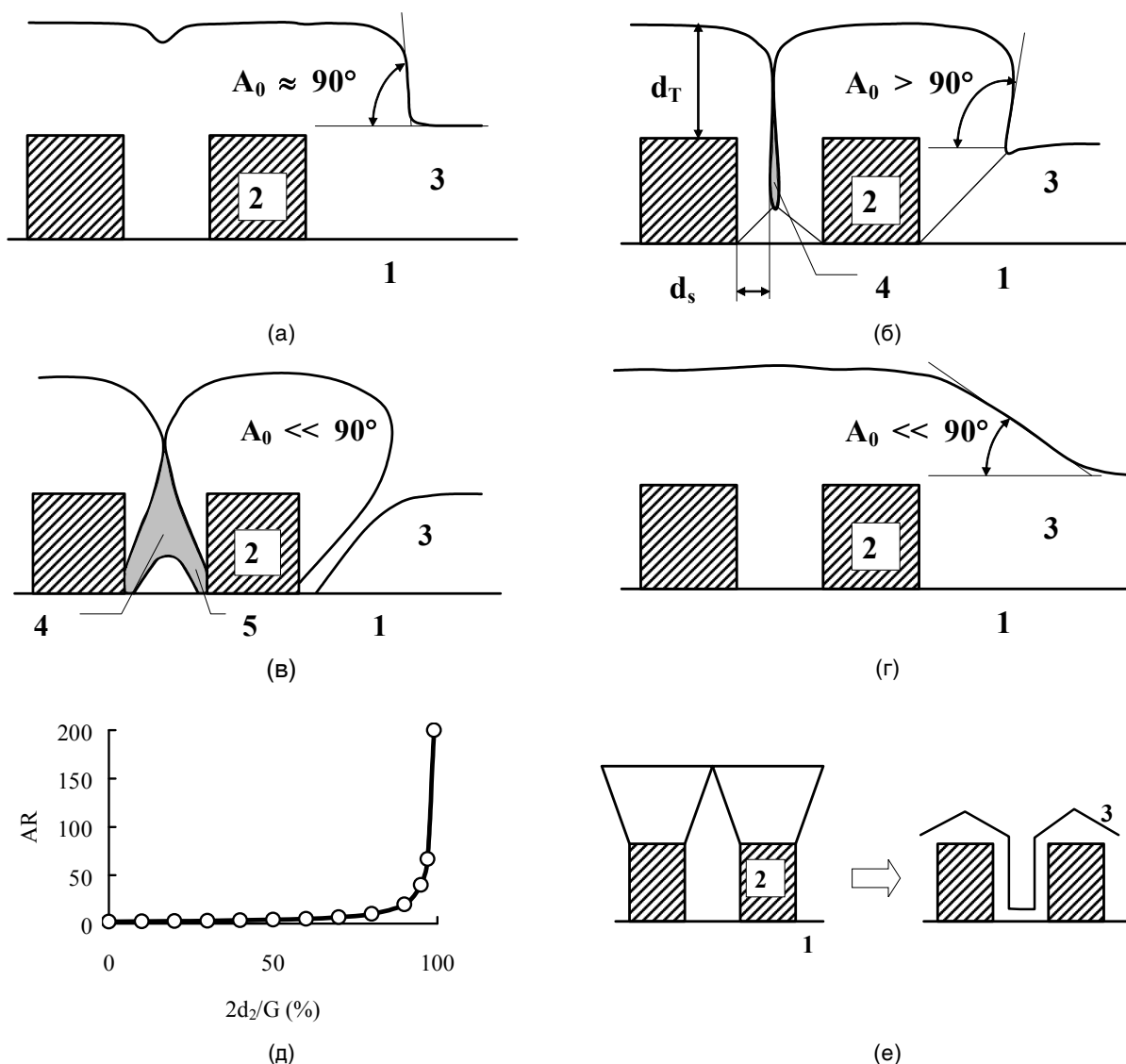


Рис. 3

Схемы поперечного сечения основных типов роста слоёв на ступеньках при ХОГФ:

(а) - конформный; (б) - в большей и меньшей степени неконформный; (в) - сильно неконформный с разрывами материала; (г) - сглаженный; (д) - расчётная зависимость изменения величины AR для случая идеально конформного осаждения слоя; (е) - при осаждении в плазме высокой плотности без (слева) и с (справа) распылением осаждаемого материала; обозначения: 1 - подложка; 2 - проводник; 3 - осаждённый слой; 4 - пустоты; 5 - разрывы материала

Основными узлами субполумикронных ИМС, где необходимо обеспечить качественное заполнение ступенчатого рельефа, являются:

- shallow trench (поверхностные канавки, далее для упрощения используется термин канавки) в монокристаллическом кремнии шириной до 0,5 мкм и глубиной до микрона (рис. 1) с углом наклона боковой стенки 75-90° и с различной формой внутренних углов канавок. Эти канавки используются в ИМС с проектными нормами менее 0,25 мкм для формирования изолирующих областей в кремнии путём заполнения вытравленного пространства слоем диоксида кремния при ХОГФ;

- предметаллический диэлектрик, наносимый на окончательно сформированные транзисторные структуры с толщиной затвора транзистора до 0,5 мкм, характеристическими размерами от 0,18 мкм, малым зазором между структурами и углами боковых стенок элементов 70-90°;

- металлические проводники коммутационных слоёв, представляющие собой полоски металла (обычно сплавов алюминия) толщиной до одного микрона и шириной от 0,3 мкм и более с таким же зазором между полосками и углом боковых стенок ~ 90°.

Причину возникновения пустот при ХОГФ можно объяснить следующим образом. Простая оценка изменения геометрии зазора в ходе идеально конформного роста слоя осаждаемого материала (при этом величина H изменяется очень слабо) даёт функциональную зависимость, показанную на рис. 3д. Суть проблемы, таким образом, состоит в резком возрастании AR и соответственно ухудшении диффузии реагентов в зазор особенно незадолго перед окончательным соприкосновением движущихся навстречу друг другу фронтов растущего слоя. В результате диффузионных ограничений профиль на боковой грани ступенек не является плоским, а после соприкосновения фронтов неравномерно растущего слоя с двух сторон зазора происходит полное блокирование поступления реагентов в остающуюся пустоту. Геометрически данное явление дополнительно усугубляется при наличии обратных углов ступенек рельефа и несовершенстве поверхностей боковых стенок. Однако наиболее важным является то, что существуют различия кинетических закономерностей роста слоёв в различных процессах ХОГФ, влияющие на рост слоёв на внутренних поверхностях зазоров.

Экспериментально установлено, что близкие к конформным профили осаждения слоёв на ступеньках рельефа наблюдаются для следующих процессов осаждения в РНД: поликристаллического и аморфного кремния при пиролизе моносилана, диоксида кремния при пиролизе тетраэтоксисилана (ТЭОС) и нитрида кремния при аммонолизе дихлорсилана или тетрахлорида кремния. Заметим, что эти процессы проводят при низком давлении ~ 0,5 мм рт. ст., что само по себе способствует снижению диффузионных ограничений примерно на 3 порядка по сравнению с условиями РАД. В этом случае конформность слоёв на рельефе характеризуют как очень хорошую, даже часто близкую к 100%. Однородность роста на ступеньках рельефа в этом случае коррелирует с хорошим заполнением зазоров между элементами при зазорах от ~ 0,25 микрона и более. Таким образом, перечисленные выше высокотемпературные процессы практически полностью обеспечивают потребности ИМС с нормами 0,35-0,18 мкм на стадии изготовления транзисторных структур, то есть в условиях, когда высокие температуры осаждения приемлемы для технологии.

Наиболее остро проблема качества осаждения слоёв на ступенчатых рельефах имеет место при использовании низкотемпературных процессов получения слоёв после формирования первого уровня металлизации ИМС. Температура осаждения в этом случае не должна быть выше ~ 450°C. До недавнего времени для этой цели применялись только процессы синтеза на основе реакции окисления гидридов, а также плазмохимические процессы осаждения. Профили осаждения слоёв оксидов при термически активированном окислении моносилана обычно характеризуются как сильно неконформные (50% и менее), при которых толщины на боковых гранях ступенек существенно меньше, чем на верхних и нижних плоскостях микросхем (см. рис. 4б,в). При ХОГФ в условиях атмосферного давления, что обычно осуществляется при очень высоких скоростях роста для достижения максимально возможной производительности процессов синтеза, неконформность обычно ещё более усиливается.

В конце 1980-х годов при изучении низкотемпературного ХОГФ диоксида кремния путём окисления тетраэтоксисилана смесью озона и кислорода обнаружено явление формирования уникального сглаженного профиля осаждённого слоя на рельефе, обозначаемого в зарубежной литературе термином flow-like профиль (см. рис. 4г) [9]. При этом рост слоёв на ступеньке может быть охарактеризован как значительно лучший, чем конформный (~ 120-140%), и следствием этого является отличное заполнение пустот в зазорах ИМС шириной более 0,25 мкм. Для этого процесса ХОГФ имеют место 3 характерных эффекта: 1) нестационарный рост слоя в течение нескольких первых минут осаждения (то есть изменение скорости наращивания во времени); 2) примерно двукратное различие скоростей наращивания слоя на кремнии по отношению к нитриду или диоксиду кремния, что характеризуется термином surface sensitivity – поверхностная чувствительность процесса; 3) недостаточно высокая плотность осаждаемого слоя. Последняя особенность несколько ограничивает применение данного материала в технологии ИМС.

В середине 1990-х годов в технологии ИМС стал активно использоваться метод осаждения, именуемый в зарубежной литературе термином High Density Plasma (HDP) [7], обязанный своим рождением проблеме заполнения узких зазоров для ИМС с проектными нормами менее 0,25 мкм. В этом методе одновременно совмещены два процесса [15]. Первым из них является обычное активированное низкочастотной плазмой осаждение слоя диоксида кремния из моносилана и кислорода (при необходимости используются легирующие вещества, например, фосфин или тетрафторид кремния). В силу высоких скоростей осаждения профиль слоёв при таком осаждении на ступеньке является предельно неконформным, как показано схематично на рис. 4е слева. Вторым, проводимым одновременно с плазменным ХОГФ слоя процессом, является распыление осаждаемого слоя непосредственно в ходе его роста путём бомбардировки структур под определённым углом ионами аргона, вводимого специально для этой цели в газовую смесь. Для распыления используется высокочастотный генератор, соединённый с электростатическим подложкодержателем. В результате оптимизации соотношения скоростей осаждения и распыления удаётся обеспечить уникальный профиль роста слоя на рельефе структур, абсолютно отличный от ХОГФ при химическом или обычном плазменном осаждении (см. схему на рис. 4е справа).

Оборудование для осаждения с ПВП к настоящему моменту времени выпускается, например, фирмами Novellus Systems, Inc. [16] и Applied Materials, Inc. [17]. Заметим, что высокая плотность мощности, необходимая для распыления осаждаемого покрытия, является постоянным предметом дискуссий о возможности её влияния на параметры микроэлектронных устройств. В этой связи применение реакторов с ПВП требует тщательной проверки в каждом конкретном случае изготовления ИМС.

Тенденция уменьшения размеров элементов ИМС сохраняет актуальность проблемы заполнения зазоров, что означает необходимость как постоянной оптимизации существующих процессов синтеза слоёв применительно к новым требованиям, так и поиска новых направлений. Здесь оказывается методологически полезным проведённый анализ корреляции закономерностей роста слоёв на рельефе ИМС и кинетических особенностей реакций осаждения, выполненный на большом экспериментальном материале. Это будет детально рассмотрено в последующих частях данной работы.

3.4. Макродефектность процессов ХОГФ тонких слоёв для микроэлектроники

Макродефектность получаемых методами ХОГФ тонких слоёв определяет процент выхода годных изделий, то есть имеет определяющее значение в технологии

микроэлектроники. Для технологии ИМС с проектными нормами выше 0,18 мкм допустимая макродефектность ХОГФ слоёв принята на уровне менее 0,1 шт/см² при минимальном размере дефектов более 0,2 мкм. Для контроля макродефектности в производстве ИМС используют приборы, сканирующие лазерным лучом всю поверхность подложки и отображающие результаты в виде карт дефектов на поверхности и гистограмм размеров дефектов. В качестве примера таких приборов можно назвать, например, Surfscan 7700 фирмы Tencor Instruments, Inc. [18] (США), активно применяемый в производстве субполумикронных ИМС.

Для воспроизводимого достижения столь малых величин макродефектности процессов ХОГФ в производстве необходимо решить комплекс вопросов, начиная с самого начала разработки технологического процесса. К таким вопросам, в частности, можно отнести следующие.

На стадии исследования процесса ХОГФ необходимо определить потенциальную макродефектность процесса и выбрать оптимальные реагенты и условия осаждения (температуру, давление, концентрации реагентов). Это достигается путём изучения кинетики осаждения слоёв и газовой фазы процессов в достаточно широком диапазоне условий, близких к таковым при осаждении тонких слоёв. Публикации по данной тематике для ориентированных на микроэлектронную технологию процессов ХОГФ являются редкостью. Общепринятым считается, что наибольшую потенциальную макродефектность проявляют процессы осаждения оксидных слоёв на основе реакций окисления гидридов кислородом, протекающие по механизму разветвлённо-цепного процесса и при определённых условиях вызывающие образование порошка аэросила [6]. Для этих процессов были опубликованы подробные исследования дефектности в промышленных реакторах [19-21]. Однако образование микрочастиц в газовой фазе хотя и существенно меньшего размера было обнаружено и при осаждении слоёв силикатных стёкол с использованием тетраэтоксисилана в высокотемпературном промышленном реакторе [22]. Это свидетельствует в пользу того, что любой процесс ХОГФ должен быть исследован на предмет понимания возможных причин и условий возникновения макродефектности осаждённых слоёв.

Определив оптимальные реагенты и условия ХОГФ, выбирается и оптимизируется конструкция реакционной камеры. В ходе отработки технологического процесса в выбранном типе реактора определяют (и исключают) условия, могущие вызвать образование макродефектов в ходе осаждения слоёв. Важными являются также вопросы, связанные с надлежащим выбором конструкционных материалов для реакционных камер, нагревателей и т. д., а также минимизация образования микрочастиц при механических манипуляциях в камере, например, в ходе загрузки и выгрузки подложек. В заключение необходимо отметить важность правильности эксплуатации реакторов, то есть периодичности, и качество их обработки.

К специфической дефектности материала, полученного осаждением из газовой фазы, можно отнести дефектность тонких слоёв борофосфоросиликатного стекла, природа которой заключается в нестабильности фазового состава материала, а её проявлением становятся поверхностные дефекты различных форм с размерами более 1 мкм. Эти вопросы детально проанализированы в работах [23,24].

3.5. Оптимизация и контроль процессов ХОГФ

Аппаратурные и кинетические исследования процессов ХОГФ дают возможность определить условия осаждения материалов с необходимой совокупностью скорости наращивания, структуры и свойств. Предполагая, что получение материала с

необходимыми свойствами принципиально возможно, рассмотрим вопросы его использования в технологии и массовом производстве ИМС, которые можно объединить под общим названием оптимизация. Суть оптимизации для технологии микроэлектроники состоит в необходимости обеспечения чрезвычайно высокой воспроизводимости свойств материалов, размеров элементов ИМС, а в конечном итоге – параметров приборов как в пределах одной полупроводниковой подложки, так и между всеми подложками одной группы (партии).

Взаимосвязь основных вопросов оптимизации получаемого осаждением из газовой фазы материала для его использования в ИМС представлена схемой на рис. 4. Вопросы оптимизации разделены на две группы: оптимизация на этапе ХОГФ материала (главными составляющими являются: реагенты, реактор, процесс осаждения) и оптимизация на этапе использования материала. К последним отнесены вопросы интеграции, то есть объединения нового материала с уже имеющимися материалами и технологическими процессами в конкретном технологическом узле прибора или в целом технологическом маршруте изготовления ИМС. Интеграция подразумевает также исследование влияния на свойства материала различных технологических обработок (например, операций фотолитографии, жидкостного или газового травления, очистки и т. д.), а также соответствие электрофизических свойств материала конкретным электрическим параметрам ИМС (устанавливается в ходе измерений и проверки функционирования приборов). Пунктирными линиями на рис. 4 выделены направления обратной связи, отражающие необходимость дополнительной доработки материала исходя из результатов его использования в приборах. Безусловно важной является также стабильность свойств материала при долговременной работе ИМС, которая оценивается на основании исследований изменений свойств материала в ходе ускоренных или долговременных испытаний как его самого, так и приборов с его использованием.

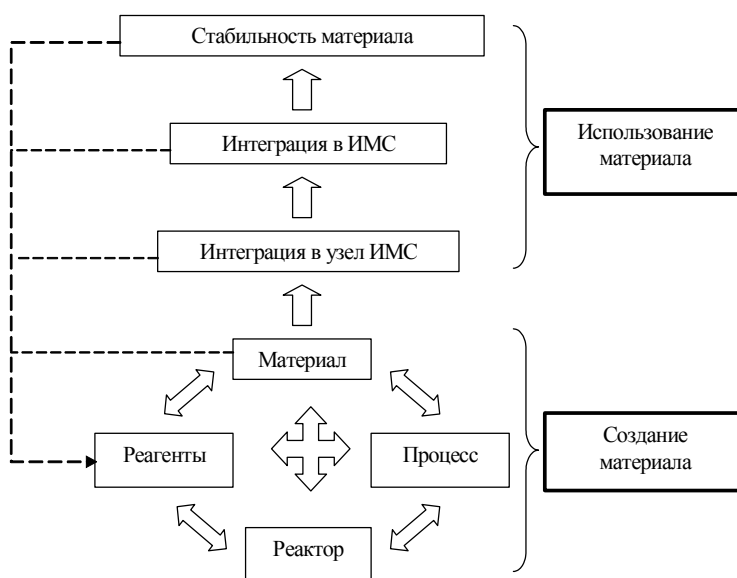


Рис. 4

Схематичное изображение взаимосвязи основных вопросов по оптимизации тонкослойного материала для использования в технологии ИМС (см. текст)

Необходимо отметить, что соответствие жестким требованиям к воспроизводимости свойств материалов для нужд микроэлектроники не может быть результатом оптимизации только одного определённого параметра или фактора. Для синтезированных из газовой фазы тонких слоёв оптимизация подразумевает большое число параметров. Соответственно выделенные на рис. 4 главные вопросы оптимизации включают, в свою очередь, множество отдельных конкретных вопросов (например, оптимизация процесса осаждения слоя включает оптимизацию температуры, концентрации реагентов, давления, скорости подачи реагентов).

Исторически задачи оптимизации тонких ХОГФ слоёв изменялись вместе с развитием технологии микроэлектроники и методов осаждения. С начала 1980-х годов, когда работы осуществлялись в исследовательских учреждениях и исследовательских отделах предприятий-разработчиков и производителей ИМС, базовыми были определены такие параметры тонких слоёв как толщина, состав и их воспроизводимость по площади кремниевой подложки. По мере развития технологии возникала необходимость контроля более широкого диапазона свойств, например: концентрации и послойного распределения примесей, макродефектности, знака и величины механических напряжений в слоях, специфических электрофизических свойств и т. д. Это потребовало разработки соответствующих аналитических приборов и методик для контроля параметров материалов как в одной точке на подложке, так и по всей её поверхности.

В настоящее время массовому потребителю вместе с оборудованием поставляются предварительно стандартизованные процессы осаждения с использованием определённых композиций реагентов. Согласно схеме рис. 4 это означает, что решение большинства вопросов аппаратуры, реагентов и предварительная оптимизация процессов осаждения осуществляется производителем оборудования. Результатом такой оптимизации является некое предварительно определённое “окно параметров”, показанное схематично на рис. 5а. Оно может быть также представлено в виде некоего распределения совокупных параметров материала, показанного как заштрихованное распределение на том же рисунке. Воспроизводимость разработанной технологии и соответствие представленному “окну параметров” подтверждается ведущими производителями оборудования путём проведения marathon тестов, то есть проверки ХОГФ оборудования и технологии “на отказ”. Общее количество круглосуточно обрабатываемых подложек достигает при таких тестах нескольких тысяч штук, а статистический контроль выбранных параметров слоёв осуществляется, например, для каждой 25-й подложки.

Таким образом, примерно с середины 1990-х годов собственные задачи по ХОГФ тонкослойных материалов у конкретного потребителя технологических процессов и материалов в массовом производстве ИМС можно охарактеризовать как уточнение предварительного “окна параметров”, определённого поставщиком серийного оборудования. Это схематично показано на диаграмме рис. 5а и изображено на том же рисунке внизу в виде суженного распределения совокупных параметров материала. Для осуществления такой оптимизации с применением методов математической статистики производится мониторинг необходимых параметров оборудования, процессов осаждения и свойств слоёв, а также поддержание распределения параметров внутри заданного верхнего и нижнего контрольных пределов, то есть в определённом интервале.

Суть интеграции материала в технологию ИМС схематично изображена на рис. 5б как встраивание совокупного распределения свойств материала в последовательность подобных распределений для других материалов и технологических операций по ходу изготовления конкретной ИМС.

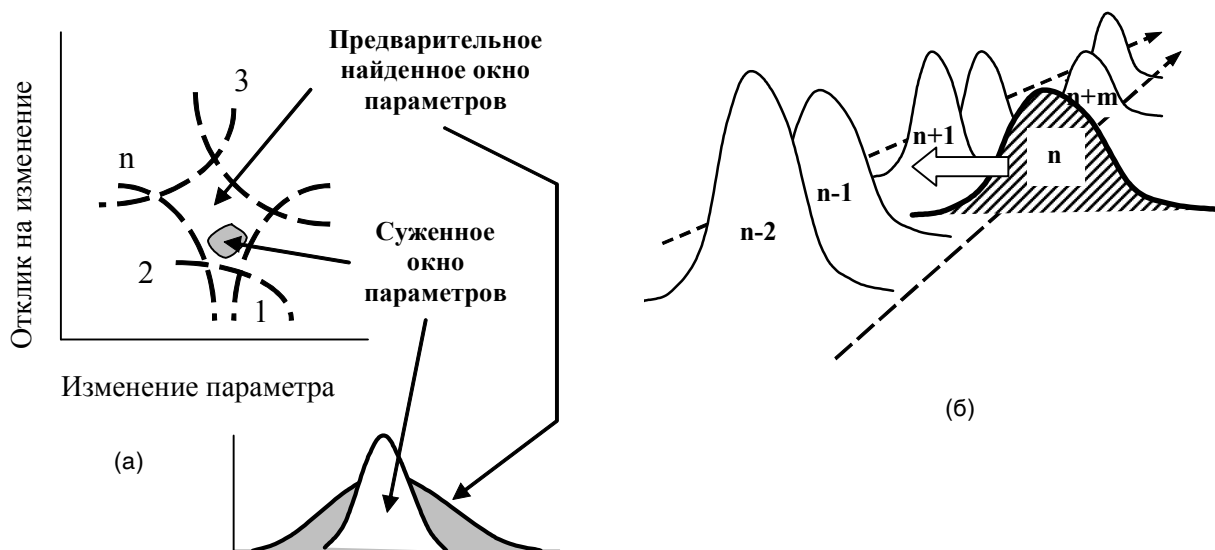


Рис. 5

Схематичное изображение “окна параметров” (а) и схема интеграции оптимизируемого тонкослойного материала (заштрихован в виде обобщённого распределения совокупных параметров с обозначением n) в технологию ИМС (б). Интеграция схематично представлена последовательностью совокупных распределений параметров (... $n-2$, $n-1$, n , $n+1$, ...), имеющих нижний и верхний допустимые пределы, показанные направлениями с пунктирными стрелками (в). Направление оптимизации параметров материала для удовлетворения технологии ИМС показано блочной стрелкой.

Заключение

Проанализирована совокупность различных аспектов применения методов химического осаждения тонкослойных неорганических кремнийсодержащих материалов (поликристаллический кремний, нитрид кремния, диоксид кремния и стекла) из газовой фазы (ХОГФ) для изготовления интегральных микросхем (ИМС) с алюминиевой системой коммутации и технологическими нормами 0,35-0,18 мкм. Рассмотрены основные тенденции развития и проблематика методов ХОГФ применительно к технологии ИМС. Потребности субполумикронных ИМС в тонкослойных материалах обеспечиваются комплексным решением вопросов аппаратуры, использованием правильно выбранных комбинаций сверхчистых исходных веществ, тщательной отработкой методов осаждения для снижения дефектности осаждённых материалов, обеспечения надлежащего роста слоёв на рельефных поверхностях и качественного заполнения узких зазоров в ИМС. Процессы ХОГФ слоёв различной природы и их термообработка в установках с кластерной идеологией позволяют осуществлять эффективную интеграцию слоёв, что в целом приводит к существенному снижению затрат на производство ИМС.

При использовании любых методов осаждения тонких слоёв важнейшим аспектом современной технологии является оптимизация процессов ХОГФ, основанная на статистическом контроле параметров процессов и слоёв, для чего необходим набор современных аналитических приборов.

Литература

1. Пауэлл К., Оксли Д., Блочер Д. Осаждение из газовой фазы. - М.: Атомиздат, 1970, 471 с.
2. Разуваев Г. А., Грибов Б. Г., Домрачев Г. А., Соломатин Б. А. Металлоорганические соединения в электронике. - М.: Наука, 1972, с.172-176.
3. Kern W., Van V. S. Chemical Vapor Deposition of Inorganic Thin Films//In “Thin Film Processes” / Eds. J.L.Vossen and W.Kern. 1978. New York.: Academic Press. P.257-331.
4. The International Technology Roadmap for Semiconductors: www.itrs.com.

-
5. Васильев В. Ю. Процессы химического осаждения из газовой фазы и свойства фосфор- и борсиликатных стеклообразных слоёв.//Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора химических наук. - Новосибирск, 2002.
 6. Васильев В. Ю., Репинский С. М. Осаждение диэлектрических слоёв из газовой фазы.//Успехи химии. 2005, т. 74, №5, с. 452-483.
 7. Cheng H. C. Dielectric and Polysilicon Film Deposition.//In "ULSI Technology"/Ed. C.Y.Chang and S.M.Sze. 1996. McGraw-Hill Int. Ed. P.205-269.
 8. Ting C. H. Inorganic Dielectrics.//In "Handbook of Multilevel Metallization for Integrated Circuits"/ S.R. Wilson, C.J.Tracy and J.L.Freeman, eds, 1993. Noyes Publications. P. 202-273.
 9. Maeda K. and Fisher S. M. CVD TEOS/O₃: Development History and Applications.//Solid State Technol. 1993. Vol.36. N6. P.83-87.
 10. Laxman R. K. Low e Dielectrics: CVD Fluorinated Silicon Dioxides.//Semiconductor International. 1995. V.18. N5. P.71-74.
 11. Winkle W. L and Nelson S. W. Improved Atmospheric-Pressure Chemical-Vapor-Deposition System for Depositing Silica and Phosphosilicate Glass Thin Films.//Solid State Technology. 1981. Vol.24. N10. P.123-128.
 12. Dobkin M. D. Makhtari S., Schmidt M., Pant A., Robinson L. Mechanism of Deposition of SiO₂ from TEOS and Related Organosilicon Compounds and Ozone.//J. Electrochem. Soc. 1995. Vol.142. N7. P.2332-2340.
 13. Applied Materials Inc. The Precision 5000 Story.//Solid State Technology. 1997. Vol.40. N5. P.117-126.
 14. Singer P. The Driving Forces in Cluster Tool Development.//Semiconductor International. 1995. Vol.18. N7. P.113-118.
 15. Sato M., Yoshinobu A. Step Smoothing by Radical and Ion Assisted Chemical Vapor Deposition.//J. Appl. Phys. 1986. Vol.256. N9. P.L764-766.
 16. <http://www.novellus.com>.
 17. <http://www.appliedmaterials.com>
 18. <http://kla-tencor.com>
 19. Shintani A. Particulates Dispersed in a CVD Reactor. 1. Semi-in Situ Observations.// J.Electrochem. Soc. 1977. Vol.124. N11. P.1771-1776.
 20. Shintani A. Particulates Dispersed in a CVD Reactor. 2. Correlations with Film Characteristics.// J. Electrochem. Soc. 1980. Vol.127. N2. P.426-429.
 21. Whitby E. and Hashino M. Particle Size Distribution in a Low Pressure SiH₄:O₂:He Chemical Vapor Deposition Reactor. //J. Electrochem. Soc. 1996. Vol.143. N10. P.3397-3404.
 22. Rao N. P., Nijhawan S., Kim T., Wu Z., Campbell S., Kittelson D., McMurry P., Chung C. C. and Mastromattee E. Investigation of Particle Generation During the Low-Pressure Chemical Vapor Deposition of Borophosphosilicate Glass Films.//J. Electrochem. Soc. 1998. Vol.145. N6. P.2051-2057.
 23. Васильев В. Ю. Тонкие слои борофосфоросиликатного стекла в технологии кремниевой микроэлектроники. Часть 1. Осаждение из газовой фазы и свойства слоёв стекла. - Микроэлектроника, 2004, т. 33, №4, с. 290-307.
 24. Васильев В. Ю. Тонкие слои борофосфоросиликатного стекла в технологии кремниевой микроэлектроники. Часть 2. Строение стекол и их применение в технологии. - Микроэлектроника, 2005, т. 34, №2, с. 83-97.