

*Моим учителям: Владимиру Филипповичу Малахову
и Сергею Марковичу Репинскому*

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	8
ВВЕДЕНИЕ	14
Часть 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ХОГФ ТОНКИХ ПЛЕНОК ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ОБОРУДОВАНИЕ, ПРОЦЕССЫ ХОГФ И КОНТРОЛЬ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ПРОИЗВОДСТВЕ ИМС	18
Глава 1. Краткие физико-химические основы ХОГФ	18
1.1. Общие положения.....	18
1.2. Химические реакции.....	20
1.3. Основные функциональные зависимости ХОГФ.....	23
Глава 2. Проблематика ХОГФ ТП для технологий ИМС	27
2.1. Общие положения.....	27
2.3. Оборудование, реакционные камеры, режимы ХОГФ.....	28
2.3. Оборудование, реакционные камеры, режимы ХОГФ.....	32
2.4. Макродефектность тонких пленок.....	35
2.5. Покрытие ступенек и заполнение узких зазоров.....	36
2.6. Контроль качества и оптимизация промышленных процессов ХОГФ.....	38
2.7. Краткая характеристика источников информации по ХОГФ ТП для ИМС.....	41
Глава 3. Тонкие пленки в ИМС	45
3.1. Развитие технологий интегральных микросхем.....	45
3.2. Появление тонких пленок и методов ХОГФ в технологиях ИМС.....	48
3.3. Развитие технологий тонких пленок для ИМС.....	50
3.4. Тонкопленочные материалы в ИМС и требования к процессам ХОГФ.....	52
3.5. Тонкие пленки в технологиях МЭМС.....	54
Глава 4. Процессы ХОГФ в производстве ИМС	56
4.1. Примеры концепций современных предприятий.....	56
4.2. Производственное помещение — чистая комната.....	59
4.3. Энергетическая зона предприятий микроэлектроники.....	62
4.4. Оборудование чистой комнаты микроэлектронного производства.....	63
4.5. Работа с пластинами в производстве ИМС.....	67
Глава 5. Контроль характеристик тонких пленок в современном производстве ИМС	72
5.1. Общие положения.....	72
5.2. Классификация методов контроля характеристик ТП в производстве ИМС.....	72
5.3. Обоснование необходимости контроля характеристик ТП в производстве ИМС.....	75
5.4. Примеры in-line контроля характеристик ТП в производстве ИМС.....	79
5.5. Примеры at-line контроля характеристик ТП в производстве ИМС.....	86
5.6. Примеры off-line контроля характеристик ТП для производства ИМС.....	87
5.7. Использование результатов контроля ТП для обеспечения воспроизводимости процессов ХОГФ в производстве ИМС.....	88

Часть 2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО ХОГФ ТОНКИХ ПЛЕНОК И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	91
Глава 6. конструкции проточных реакторов и методология проведения процессов ХОГФ.....	91
6.1. Структура оборудования для ХОГФ.....	91
6.2. Хронологический обзор основных конструкций реакторов для ХОГФ.....	94
6.3. Классификация оборудования для ХОГФ.....	102
6.4. Вакуумные насосы, измерение и регулирование рабочего давления газовых потоков, контроль герметичности вакуумных систем.....	103
6.5. Температурные режимы реакторов ХОГФ.....	116
6.6. Плотность ВЧ-мощности при плазменном осаждении.....	121
Глава 7. Методологии осаждения, исследований кинетики роста пленок и обработки результатов.....	122
7.1. Основные параметры оборудования и процессов ХОГФ.....	122
7.2. Методология осаждения ТП при ХОГФ.....	123
7.3. Формулировка задач исследований кинетики осаждения ТП при ХОГФ.....	126
7.4. Методология исследований кинетики осаждения ТП при ХОГФ в трубчатых реакторах (первая фаза исследований).....	130
7.5. Методология обработки результатов кинетических исследований в реакторах по вариантам А, Б, В.....	139
7.6. Методология исследований кинетики осаждения ТП при ХОГФ в индивидуальных реакторах (вторая фаза исследований).....	148
7.7. Методология исследований кинетики осаждения ТП рутения при импульсном ХОГФ в индивидуальном реакторе (третья фаза исследований).....	153
Часть 3. КИНЕТИКА РОСТА И ПРОЦЕССЫ ХОГФ КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ ТОНКИХ ПЛЕНОК.....	160
Глава 8. ХОГФ тонких пленок поликристаллического кремния.....	160
8.1. Кинетика роста ППК при пиролизе моносилана.....	160
8.2. Связь кинетики роста и структуры ППК.....	163
8.3. Влияние поверхности подложки на структуру ППК.....	167
8.4. Рост ТП поликремния при ХОГФ в промышленных групповых РНД.....	168
8.5. Представления о росте ППК при ХОГФ.....	173
Глава 9. ХОГФ тонких пленок нитрида кремния.....	176
9.1. Краткий исторический аспект.....	176
9.2. ХОГФ ПНК в системе $\text{SiH}_4\text{--NH}_3$	177
9.3. ХОГФ ПНК в системе $\text{SiCl}_4\text{--NH}_3$	180
9.4. ХОГФ ПНК в системе $\text{SiH}_2\text{Cl}_2\text{--NH}_3$	187
9.5. Схемы процессов ХОГФ ПНК.....	193
9.6. Производственные процессы ХОГФ ПНК.....	195
9.7. Процессы ПХО.....	196
Глава 10. ХОГФ тонких пленок диоксида кремния.....	198
10.1. Краткий исторический аспект.....	198
10.2. ХОГФ ПДК в системе $\text{SiH}_4\text{--O}_2$	199
10.3. ХОГФ ПДК при пиролизе и окислении ТЭОС кислородом и озоном.....	201
10.4. ХОГФ ПДК в системе $\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$	203
10.5. Производственные процессы ХОГФ.....	215

Глава 11. ХОГФ тонких пленок силикатных стекол.....	217
11.1. Краткий исторический аспект.....	217
11.2. ХОГФ силикатных стекол в системе $\text{SiH}_4\text{--O}_2$	218
11.3. ХОГФ силикатных стекол в системе $\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$	222
11.4. ХОГФ силикатных стекол в системе TЭОС--O_2	223
11.5. ХОГФ силикатных стекол в системе $\text{TЭОС--O}_3/\text{O}_2$	224
11.6. Общее и различия в кинетике осаждения ТП силикатных стекол.....	226
11.7. Промышленная технология пленок силикатных стекол для ИМС.....	232
Глава 12. Явления формирования аэрозолей при ХОГФ ТП.....	235
12.1. Краткий исторический аспект.....	235
12.2. Кинетические исследования формирования макрочастиц при ХОГФ.....	236
12.3. In situ исследования процессов формирования макрочастиц в газовой фазе реакторов ХОГФ.....	244
Часть 4. ОБОБЩЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ИМС, ХРОНОЛОГИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ХОГФ И БУДУЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ.....	254
Глава 13. Схемы и классификация процессов ХОГФ кремнийсодержащих тонких пленок.....	254
13.1. Исследованные реакторы и химические системы — обобщение.....	254
13.2. Обобщение закономерностей роста пленок в групповых РНД.....	256
13.3. Схемы роста кремнийсодержащих тонких пленок при ХОГФ.....	258
13.4. Классификация процессов роста тонких пленок при ХОГФ.....	263
Глава 14. Конформность роста тонких пленок на рельефах ИМС.....	267
14.1. Формулировка проблемы.....	267
14.2. Краткий исторический аспект.....	269
14.3. Методология анализа роста тонких пленок на рельефах ИМС.....	273
14.4. Варианты трактовки причин неконформности роста ТП при ХОГФ.....	277
14.5. Взаимосвязь конформности осаждения и кинетики роста тонких пленок.....	280
14.6. Возможности управления конформностью осаждения ТП при ХОГФ.....	284
Глава 15. Обобщение исторических тенденций развития методов ХОГФ тонких пленок из газовой фазы для технологий микроэлектроники.....	290
15.1. Прогресс ИМС и правило Мура.....	290
15.2. Хронологическое обобщение развития методов ХОГФ для технологий микроэлектроники.....	291
15.3. Характеризация выделенных этапов развития процессов ХОГФ для технологий микроэлектроники.....	294
15.4. Описание возможностей и перспектив процессов ХОГФ и АСО с помощью характеристики элементов ИМС «сложность структуры».....	302
15.5. К методологии исследований структуры, свойств, стехиометрии и других параметров тонких пленок, полученных методами ХОГФ.....	305
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	308
ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	312
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	321
ОБ АВТОРЕ.....	339

ПРЕДИСЛОВИЕ

Полупроводниковые, диэлектрические и проводящие неорганические материалы в виде тонких пленок являются основой для формирования прецизионных конструктивных элементов изделий электроники, микросистемной техники, оптоэлектроники, силовой электроники, а также нанoeлектроники. Тонкая пленка (ТП, thin film) — это слой материала толщиной от одного монослоя до нескольких микрометров, который создается различными методами на поверхности объектов произвольной формы — подложках (substrates). Помимо термина «тонкая пленка» в литературе также используются термины «покрытие» (coating) и «слой» (layer).

Хронологически первыми, с середины 1970-х гг., ТП различных неорганических материалов начали исследовать и использовать применительно к технологиям кремниевых интегральных микросхем (ИМС). В связи с этим к настоящему времени именно для технологий микроэлектроники тонкопленочные материалы получили наибольшее развитие. Это относится как к исследованиям методов создания ТП и разработок соответствующего оборудования, так и к исследованиям собственно материалов (структура, состав, свойства) и вопросам применения ТП в приборах. В связи с этим совокупность вопросов получения и материаловедения ТП для ИМС является исчерпывающим примером для появившихся позднее по времени иных прецизионных технологий.

ИМС в виде чипа (chip, die, отечественный термин — «кристалл») изготавливается по групповым планарным технологиям на полупроводниковых подложках, в микроэлектронике именуемых пластинами (wafer). Последние имеют форму дисков диаметром до 300 мм и толщину в несколько сотен микрометров. Процессы формирования ТП на подложках являются составной частью многооперационных технологических маршрутов изготовления ИМС, включающих также определенную совокупность процессов химической и термической обработки, окисления, диффузии и имплантации, формирования на пластинах рисунков конструктивных элементов с помощью процессов фотолитографии, жидкостного или сухого травления, а также химико-механической полировки.

К настоящему времени в промышленных технологиях ИМС используют два основных метода получения ТП: метод физического осаждения и метод химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ). Первый метод (общепринято называемый в зарубежной литературе термином Physical Vapor Deposition, PVD) чаще именуется в отечественной литературе термином «напыление». Суть метода — перенос на подложку частиц материала с поверхности исходной мишени заданного состава, бомбардируемой, например, ионами аргона. Этим методом получают, как правило, металлические или проводящие ТП, необходимые для создания систем металлических проводников в ИМС.

Движение переносимых частиц материала от распыляемой мишени к объекту является прямолинейным, в связи с чем его применение для создания конформных (равномерных по толщине) тонкопленочных покрытий на объектах со сложной конфигурацией поверхности вызывает массу трудностей и ограничений. Второй метод (общепринято называемый термином Chemical Vapor

Deposition, CVD) является методом химического синтеза новой фазы (нового вещества) непосредственно на подложках из исходных химических реагентов, переведенных в парогазовую среду. Для ХОГФ возможно использование различных исходных реагентов и их комбинаций в широком диапазоне условий синтеза ТП. В технологиях ИМС метод ХОГФ используется для получения диэлектрических, полупроводниковых и проводящих типов ТП. Отличительной особенностью этого метода является сложность протекающих при ХОГФ химических реакций, в ряде случаев с участием поверхности объектов. Как следствие, при ХОГФ достигается значительно лучшая конформность ТП на сложных рельефах приборов.

За прошедшие 50 лет технологии ИМС претерпели колоссальное развитие, обычно характеризующееся так называемым правилом Мура (Moore's law) [1–3]. Это хронологическое развитие описывается как генерации ИМС с фиксированными проектно-технологическими нормами (ПТН), в зарубежной литературе именуемыми *technology node*. Развитие ИМС началось с ПТН 10 мкм. Априори каждая новая генерация ИМС (более сложная конструктивно) требовала применения новых материалов и технологий. В том числе появились и ужесточались требования к номенклатуре и качеству ТП, а также к методам их получения. В значительно большей степени это относилось к методам ХОГФ ввиду их определенных преимуществ и перспектив. Для производственных процессов ХОГФ ТП разрабатывалось разнообразное оборудование, синтезировались особо чистые реагенты, разрабатывались методы анализа качества и приборы контроля характеристик ТП.

Исследовательская, конструкторская, технологическая и внедренческая деятельность автора настоящего учебного пособия в области ХОГФ ТП для технологий ИМС с конца 1970-х гг. во многом хронологически совпала с ходом развития технологий ИМС. Принципиально важным для формирования авторского стиля и оригинальных подходов к исследованиям и разработкам в области ХОГФ ТП оказалась совокупность приобретенного разнопланового опыта после окончания отделения химии факультета естественных наук Новосибирского государственного университета в 1976 г. Основные вехи этого опыта состоят в следующем.

В ходе выполнения дипломной работы автор приобрел двухлетний экспериментальный опыт в лаборатории кинетики Института катализа Сибирского отделения Академии наук СССР. Темой дипломной работы, выполненной под руководством сотрудника института Владимира Филипповича Малахова, были исследования кинетики химических окислительных реакций в импульсных условиях на поверхности платиновой фольги методом термодесорбционной масс-спектрометрии в сверхвысоком вакууме. Три десятилетия спустя в силу близкой специфики реализации импульсных процессов осаждения это позволило глубже понять особенности наиболее современного варианта метода ХОГФ ТП, известного как метод атомно-слоевого осаждения, АСО (*Atomic Layer Deposition, ALD*).

Начиная с 1979 г., автор в течение 15 лет приобрел без преувеличения огромный экспериментальный опыт по ХОГФ ТП в Особом конструкторском

бюро при отечественном производственном предприятии Новосибирский завод полупроводниковых приборов (ОКБ при НЗПП, в настоящее время — АО «НЗПП Восток»). Лично, а также с коллегами в группе и секторе детально исследовал кинетику роста при ХОГФ кремнийсодержащих типов ТП: поликристаллического кремния, нитрида кремния, диоксида кремния, фосфоросиликатного и борофосфоросиликатного стекол. Был проведен необходимый объем материаловедческих работ по всем типам пленок. В конечном итоге это позволило создать практически «с нуля» промышленные процессы ХОГФ ТП, остро необходимые для организации серийного производства ИМС на предприятии. В начале 1980-х гг. групповые процессы ХОГФ вышеупомянутых типов ТП были внедрены в производство ИМС с ПТН 3 мкм. Важно отметить, что внедрение процессов было осуществлено на оборудовании, разработанном и изготовленном на предприятии под руководством автора пособия, что позволило «заложить» в оборудование и технологию результатов проведенных исследований. В этом контексте важно также отметить, что исследования и разработки проводились при плодотворном научном контакте с сотрудниками лаборатории кинетики Института физики полупроводников СО РАН под руководством доктора химических наук, профессора Сергея Марковича Репинского. Первые обобщения накопленных результатов, количественное описание закономерностей кинетики роста ТП и систематизация процессов ХОГФ были выполнены в ряде публикаций, обзоров, авторских свидетельств на изобретения и в конечном итоге обобщены в кандидатской диссертации автора [4].

В 1996–2000 гг. автору представилась уникальная возможность продолжить исследовательскую деятельность в области ХОГФ ТП для ИМС в отделе исследований и разработок (Research and Development, R&D) вновь созданного, и в то время одного из самых современных, производственного предприятия Chartered Semiconductor Manufacturing Ltd, Сингапур. За четыре года автором с коллегами по сектору тонких пленок были внедрены в производство ИМС с ПТН 0,35–0,15 мкм процессы получения тех же типов диэлектрических ТП на самом современном на то время оборудовании для ХОГФ. Проведение исследований особенностей роста пленок на новых типах оборудования с индивидуальными реакторами (в том числе с плазменной активацией) позволило автору развить, расширить и углубить ранее сформулированные представления о кинетике роста ТП при ХОГФ. Принципиально новым предметом исследований оказалась конформность роста ТП на сложных рельефах ИМС с узкими (и все более уменьшающимися с каждой последующей генерацией ИМС) зазорами рельефа с большими аспектными отношениями. Результаты проведенных исследований позволили установить однозначную количественную корреляцию конформности роста ТП в зазорах с кинетическими характеристиками процессов ХОГФ. Наличие аналитической аппаратуры и методик на предприятии позволили автору провести детальные материаловедческие работы по ТП силикатных стекол. Многочисленные публикации, патенты и доклады на международных конференциях того времени в итоге были обобщены в докторской диссертации [5].

В 2006–2008 гг. автор принял участие в качестве приглашенного профессора в рамках госпрограммы Brain pool Республики Южная Корея в Корейском

политехническом университете в отделении нанооптики. Предметом исследований была технология получения ТП металлического рутения для ИМС с ПТН менее 0,045 мкм методом импульсного осаждения (вариант АСО). Были проведены кинетические и материаловедческие исследования, конечным обобщающим результатом которых явились журнальные публикации и обширная глава в монографии [6]. Оказалось, что в рамках сформулированных ранее представлений количественные результаты исследований кинетики осаждения ТП металлического рутения также коррелируют с закономерностями роста кремнийсодержащих ТП, в том числе в узких зазорах рельефа ИМС. Результатом обобщений явилась предложенная автором относительно простая методология количественной оценки и прогнозирования возможностей и ограничений методов ХОГФ и АСО для использования на подложках с высокоаспектными рельефами [7].

К настоящему времени существует огромная зарубежная информационная база по вопросам ХОГФ для прецизионных технологий, прежде всего — для технологий ИМС. Различные вопросы ХОГФ ТП регулярно обсуждались и продолжают обсуждаться на конференциях, обобщались в виде обзорных публикаций, а также неоднократно рассматривались в монографиях. В сети Интернет также можно найти лекционные материалы профессоров ведущих зарубежных университетов по тематике ХОГФ ТП. Кроме того, следует отметить, что осуществление цифровизации научных публикаций в последние годы дало возможность получить доступ к публикациям на многочисленных конференциях, ранее существовавшим только в печатном виде. Однако при огромном объеме фактического материала по ХОГФ ТП для ИМС и прочих прецизионных технологий, основной недостаток зарубежных обобщающих публикаций, по мнению автора данного пособия, — их в основном описательный характер, больше смещенный в область материаловедения. При безусловной важности такой составляющей, описание материала не позволяет составить целостный взгляд на совокупность проблем, решений и особенностей ХОГФ ТП для технологий ИМС. Например, невозможно понять взаимосвязь процесса ХОГФ и основных свойств ТП, трудно понять возникновение необходимости разработки новых типов оборудования по мере усложнения технологий ИМС.

В начале 2010-х гг. автор пришел к пониманию сформировавшегося пробела обобщенной информации по тематике ХОГФ ТП для ИМС. Этот пробел оказался наиболее характерен для отечественных публикаций и явился следствием колоссального отставания отечественных технологий микроэлектроники, фактически отсутствия отечественного электронного машиностроения и малого количества современных исследований и разработок. Произошедшая смена поколений инженерно-технологических сотрудников предприятий микроэлектроники явно указывала на необходимость адекватного обобщения огромного объема литературы по ХОГФ ТП для разработки будущих отечественных технологий ИМС. Однако к настоящему моменту времени имеется одна отечественная обобщающая монография по ХОГФ ТП для ИМС также с описательным изложением материала [8]. Системное изложение результатов многолетнего практического личного опыта разработок технологий ХОГФ для кремниевых ИМС, по

мнению автора, должны вооружить отечественного читателя относительно простой методологической базой для понимания количественных взаимосвязей различных вопросов и проблем ХОГФ ТП. Для решения поставленной задачи в последние годы автором были опубликованы многочисленные обзоры по различным направлениям ХОГФ/АСО, например [9–22], монографии по тонким пленкам и ХОГФ [23, 24], а также учебные пособия по вопросам технологий ТП для ИМС [25–29]. Оригинальные работы автора (статьи, обзоры и монографии) могут быть найдены в открытом доступе на личной страничке автора в сети Интернет: https://www.researchgate.net/profile/Vladislav_Vasilyev2/publications.

По итогам публикаций у автора сформировалось представление о необходимости составления расширенного и углубленного, но не перегруженного теорией учебного пособия по ХОГФ ТП для микроэлектроники и близких прецизионных технологий. Идея и цель настоящего учебного пособия, написанного на основании монографии [24], — дать отечественным читателям целостный взгляд на совокупность технологических вопросов ХОГФ ТП с учетом хронологии развития технологий ИМС. Стержнем подхода автора является методология количественной характеристики кинетических особенностей различных процессов ХОГФ кремнийсодержащих ТП для различных типов оборудования. На примере технологий ИМС с ПТН более 0,13 мкм (что соответствует микросхемам с алюминиевой металлизацией) анализируется широкий круг вопросов, связанных с ХОГФ тонких пленок. Рассматриваются особенности и характеристики оборудования, особенности исходных химических реагентов, методология ХОГФ кремнийсодержащих ТП, кинетические особенности роста пленок при ХОГФ и их количественная интерпретация, приведена классификация процессов ХОГФ ТП. Показана методология использования полученных количественных зависимостей для решения вопросов роста пленок в узких зазорах ИМС, взаимосвязь основных свойств ТП с особенностями процессов ХОГФ.

Вполне резонно может возникнуть вопрос актуальности материала пособия, поскольку автор рассматривает давно используемые «классические» кремнийсодержащие тонкие пленки. Пособие содержит большое число ссылок на оригинальные публикации экспериментального характера от разных групп исследователей и технологов, подтверждающие достоверность представленных автором идей и выводов. Именно поэтому массив данных по этим пленкам, рассмотренный в хронологическом порядке, дал возможность прослеживания и выделения общего и различий, выполнение обобщений и адаптацию решений по ХОГФ ТП к микроэлектронным технологиям. Приведенные в пособии сведения могут быть однозначно использованы для иных прецизионных технологий со сходными с ИМС задачами. Предлагаемое пособие является актуальным, современным и практически ценным введением в тематику как для студентов, обучающихся по тематике современных прецизионных технологий, так и для технологов современных производств таких изделий.

Выше автор сознательно разделил понятия кинетика роста ТП и материаловедение ТП, хотя с точки зрения применения они взаимосвязаны. Однако включение такой информации в рамках рассматриваемого уровня ПТН ИМС по-

требовало бы многократного увеличения объема учебного пособия в силу огромного количества опубликованной информации, которое явно выходит за рамки пособия. В связи с этим обобщение результатов по материаловедению ТП представляет собой отдельную задачу, частично решенную автором путем публикаций цитированных выше обзоров по тематикам ТП. Однако ключевым моментом, предшествующим любым материаловедческим исследованиям, является максимально адекватное описание условий получения образцов ТП, что и должно позволить предлагаемое учебное пособие.

ВВЕДЕНИЕ

Круг взаимосвязанных вопросов по ХОГФ ТП для прецизионных технологий довольно широк. По опыту автора на примере технологий ИМС можно выделить последовательность следующих основных составляющих для разработки и внедрения в производство качественного процесса ХОГФ ТП, что является, собственно, главной целью исследований и разработок.

1. Наличие некоторого начального объема знаний по ХОГФ ТП в целом.

2. Адаптация проблематики ХОГФ применительно к прецизионным технологиям и массовому производству прецизионных изделий на специфических подложках и со специфическими требованиями. Разработка процесса ХОГФ для применений, например, в микроэлектронике априори требует понимания основ методов, свойств реагентов, функциональных взаимосвязей, выделения проблем и поиска способов решения возникающих задач.

3. Понимание конкретной задачи процесса ХОГФ ТП для конкретного изделия прецизионных технологий: определение конструктивного местоположения ТП в ИМС и формируемых из ТП конструктивных элементов приборов. Это обычно отображается в виде схем поперечных сечений прибора в направлении «от подложки — к металлизации», последовательно усложняющихся по мере его изготовления. При этом во многих новых генерациях ИМС появляются новые ТП материалы. Местоположение ТП в приборах определяет одну из главнейших характеристик методов ХОГФ — температуру получения ТП. В свою очередь допустимая температура осаждения во многом определяет круг возможных исходных реагентов и условий получения ТП и, следовательно, определяет состав, структуру и свойства ТП материалов.

4. Изучение информационных источников о процессах ХОГФ ТП. Источники имеют разный уровень и глубину изложения материала и его достоверность. Как уже упоминалось выше, объем информации по ХОГФ ТП для ИМС очень велик и требует классификации по полезности извлечения данных.

5. Обоснованный выбор оборудования для ХОГФ и алгоритмы реализации процесса ХОГФ. Хронологически подходы к конструкциям оборудования и реализации процессов изменялись, например, ввиду возрастания размеров подложек.

6. Выбор и обоснование оптимальных для решения поставленной задачи совокупности исходных реагентов.

7. Выбор и освоение необходимых методов контроля основных характеристик ТП применительно к технологиям, например, ИМС. Для всех прецизионных технологий первой и основной характеристикой является скорость наращивания ТП, для чего необходимо как минимум проведение точных измерений толщины получаемой ТП.

8. Проведение кинетических исследований процесса ХОГФ в широком диапазоне исходных условий: температуры, давления, расходов и концентраций реагентов и т. д. Формирование методологий реализации процесса, исследований и количественного описания процессов ХОГФ с точки зрения кинетики роста ТП.

9. Решение материаловедческих задач: изучение необходимых свойств ТП параллельно с исследованиями по п. 8.

10. Определение оптимального «окна параметров» для ХОГФ ТП с необходимым набором свойств. Проводится с учетом вопросов оборудования, реагентов.

11. Отработка воспроизводимости (повторяемости) оптимального режима получения ТП при ХОГФ с элементами статистического контроля.

12. Квалификация процесса ХОГФ ТП для производства.

13. Опробование ТП в маршруте изготовления изделий, принятие решения о годности процесса и ТП для применения в изделиях, оформление рабочей технологической документации на промышленный процесс ХОГФ ТП.

Именно в такой общепринятой в 1970–1980-х гг. последовательности автор проводил большую часть исследований ТП. Перечисленные вопросы рассмотрены в настоящем пособии в соответствующих главах. На основании совокупности полученной информации автор выполнил систематизацию и количественные обобщения по тематике ХОГФ кремнийсодержащих ТП, рассмотренные в последних главах пособия.

Отметим, что в современной зарубежной микроэлектронной отрасли по мере развития технологий ИМС произошли сильные организационные изменения. Это определенно повлияло на содержание публикаций по тематике ХОГФ ТП. Поначалу производители оборудования, именуемые вендорами (vendor), реализовывали только оборудование, на базе которого потребители разрабатывали процессы ХОГФ своими силами под свои задачи. Позднее вендоры стали предлагать оборудование с базовыми техпроцессами и некоторым начальным материаловедческим описанием основных свойств ТП. В настоящее время большая часть из перечисленных выше составляющих (2–10) решается производителями/поставщиками оборудования и реализуется вместе с базовыми процессами ХОГФ ТП. Поставки оборудования осуществляются, как правило, под производство ИМС конкретных генераций.

Технологи современного производства ИМС, таким образом, в основном проводят совместную с поставщиками оборудования квалификацию уже приобретенного оборудования и процессов ХОГФ по п. 10–12. С одной стороны, может обманчиво показаться, что технологам и не нужно приобретать информацию и опыт по п. 1–10, поскольку компании-вендоры уже решили большинство вопросов. Однако с другой стороны, это означает постепенную концентрацию знаний и информации о процессах у вендоров и, как следствие, ее дозированное представление по конкретным запросам конкретных потребителей. Очевидно, что информированность последних напрямую зависит от правильности и глубины постановки вопросов вендорам, для чего как раз и необходимы знания по п. 1–10.

Кроме того, многие из перечисленных выше составляющих могут возникать перед технологами производства ИМС в случае необходимости совершенствования технологий ХОГФ, например, для освоения производством следующей генерации ИМС. В этом случае обычно вопрос ставится так: возможно ли своими силами проведение оптимизации существующего оборудования/технологий, имеющихся на предприятии, или необходимо приобретение нового (как

правило, очень дорогостоящего) оборудования для ХОГФ. Очевидно, что вендорами всегда рекомендуется именно второе, что не всегда остро необходимо. Наличие необходимых знаний, информации и опыта по п. 1–10 у технологов предприятия-производителя ИМС будет иметь принципиальное значение как в плане проведения работ собственными силами, так и при техническом обсуждении вопросов с вендорами.

Рассмотренный в пособии круг проблем по ХОГФ ТП напрямую относится к ИМС с ПТН более 0,13 мкм. Это соответствует технологии микросхем с металлизацией на основе алюминия и диэлектриков на основе диоксида кремния. Многие рассмотренные вопросы применимы для ИМС с меньшими ПТН (имеющими металлизацию из меди с изолирующими материалами с низкой диэлектрической постоянной). Однако для нанометрового уровня ИМС все большее распространение получают импульсные методы создания ТП, известные как импульсное ХОГФ (pulsed CVD) и атомно-слоевое осаждение АСО (ALD). В силу популярности таких методов для них за последние 20 лет в мире накоплен очень большой объем информации. Однако подробная характеристика импульсных методов ХОГФ выходит за рамки настоящего пособия и является задачей для последующих обобщений в связи с чем в пособии для импульсных методов рассмотрены только некоторые важные методические вопросы.

Взятый за основу изложения пример технологий ИМС указанных ПТН может показаться ограничением и вызвать вопросы о применимости изложенного, например, для прецизионных нанотехнологий. Однако необходимо отметить, что устройства, называемые в общем случае «нанотехнологическими», по факту содержат некоторые отдельные ключевые нанотехнологические узлы, встроенные в более крупные узлы устройства, которые, в свою очередь, в совокупности составляют собственно устройство. Таким образом, устройство может быть представлено как совокупность узлов с размерностями макро, микро, нано. Очевидно, что информация настоящего пособия однозначно соответствует как минимум уровню микро любого прецизионного устройства. Возможности распространения рассмотренных вопросов на уровень нано обсуждаются в последней главе пособия.

Книга разбита на 4 тематически объединенные части.

В первой части (главы 1–5) дается общая характеристика ХОГФ тонких пленок для прецизионных технологий, рассматриваются вопросы оборудования и процессов ХОГФ в производстве ИМС, методы контроля характеристик тонких пленок в производстве. Этот материал на примере прецизионных технологий ИМС дает общие представления о методе ХОГФ и его проблематике, задачах и развитии применительно к производству ИМС.

Во второй части (главы 6–7) углубленно рассмотрены важнейшие аспекты экспериментальных исследований закономерностей осаждения тонких пленок в различных типах реакторов, характеристики оборудования, а также методология осаждения тонких пленок и обработки экспериментальных данных. Подобных обобщений ранее в литературе не обнаружено.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru