

УДК 621.38.049.77:539.23(075.8)
В191

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент *Н. И. Филимонова*

канд. техн. наук, ведущий инженер-технолог АО «НЗПП Восток» *В. П. Попов*

Васильев В. Ю.

В191 Методы и возможности *in-line* контроля тонкопленочных материалов в производстве субмикронных интегральных микросхем: учебное пособие / В. Ю. Васильев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – 128 с.

ISBN 978-5-7782-4926-4

Пособие составлено на базе 40-летнего личного опыта работы автора на отечественных и зарубежных предприятиях микроэлектронной отрасли. Рассмотрена совокупность вопросов организации и использования в серийном производстве субмикронных интегральных микросхем (ИМС) методов непосредственного производственного (*in-line*) контроля тонкопленочных материалов – основы современных ИМС. Приведены примеры приборов контроля и возможностей их применения для характеристики процессов получения и свойств тонких пленок. Рассмотрены решения технологических задач с помощью *in-line* методов на примере важнейшего узла ИМС – диэлектрической планаризируемой изоляции между транзисторным уровнем (*FEOL*) и первым уровнем металлизации (*BEOL*) микросхем. Проанализирован подход к квалификации технологических процессов/оборудования для создания тонких пленок в производстве, изложены примеры проведения исследований технологической направленности. Показаны необходимость и возможности использования вместе с *in-line* методами также методов контроля *at-line* (в лабораториях вне производства) и *off-line* (в специализированных аналитических организациях). В пособии использованы и пояснены многочисленные англоязычные термины, принятые в технологиях и производстве интегральных микросхем.

Материал пособия может быть рекомендован для обучения бакалавров и магистрантов по направлениям 11.03.04 и 11.04.04 («Электроника и нанoeлектроника»), 28.03.01 и 28.04.01 («Нанотехнологии и микросистемная техника») в рамках семинаров по специальностям и по дисциплинам, связанным с преподаванием физико-химических основ технологических процессов изделий микроэлектроники, микросистемной техники, нанoeлектроники. Рекомендуется для магистрантов и аспирантов по специальности 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи», а также для технологов производства ИМС, исследователей в области нанотехнологий.

УДК 621.38.049.77:539.23(075.8)

ISBN 978-5-7782-4926-4

© Васильев В. Ю., 2023

© Новосибирский государственный
технический университет, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Вопросы для самопроверки по введению	12
Дополнительная литература по технологиям и маршрутам ИМС.....	12
Глава 1. Тонкие пленки в технологиях ИМС.....	13
1.1. Общие сведения.....	13
1.2. Краткие физико-химические основы ХОГФ	15
1.3. Основные методы ХОГФ в технологиях ИМС.....	16
1.4. Химические реакции формирования тонких пленок	18
1.5. Основные функциональные зависимости ХОГФ	19
1.6. Проблематика ХОГФ для технологий ИМС.....	22
Вопросы для самопроверки по главе 1	25
Дополнительная литература к главе 1	26
Глава 2. <i>In-line</i> контроль в технологиях ИМС.....	27
2.1. Общая информация	27
2.2. Общие требования к <i>in-line</i> методам контроля и оборудованию.....	31
2.3. Примеры методов и оборудования для <i>in-line</i> контроля тонких пленок в производстве ИМС	34
2.3.1. Измерение толщины тонких пленок (<i>thickness</i>).....	35
2.3.2. Измерение поверхностного сопротивления (<i>sheet resistance</i>)	36
2.3.3. Измерение поверхностной дефектности (<i>surface defects</i>)	38
2.3.4. Измерение механических напряжений (<i>stress measurement</i>)	40
2.3.5. Контроль состава тонких пленок (<i>composition, content</i>).....	42
2.3.6. Сканирующая зондовая микроскопия (<i>AFM</i>).....	44
2.3.7. Электрические измерения (<i>electrical</i>)	45
2.4. <i>At-line</i> методы анализа на предприятиях микроэлектроники.....	47
2.5. <i>Off-line</i> методы анализа.....	50
2.6. Использование результатов <i>in-line</i> контроля в производстве ИМС	53
2.6.1. Мониторинг технологических процессов.....	54
2.6.2. Концепция 6-сигма	56
2.6.3. Оценка техпроцессов по безразмерным индексам	60
Вопросы для самопроверки по главе 2.....	62
Дополнительная литература к главе 2.....	62

Глава 3. Пример решения технологических задач в производстве ИМС: квалификация процессов ХОГФ ТП	64
3.1. Общие сведения.....	64
3.2. Постановка задачи.....	67
3.3. Квалификация технологии ТП БФСС по опции 1.....	69
3.3.1. Оборудование для SACVD БФСС.....	69
3.3.2. Выбор методов контроля ТП БФСС.....	72
3.3.3. Характеризация процесса SACVD и ТП БФСС.....	73
3.4. Квалификация технологии по опции 2.....	81
3.4.1. Оборудование для APCVD БФСС.....	81
3.4.2. Характеризация процесса APCVD и ТП БФСС.....	83
3.4.3. Оценка варианта APCVD <i>liner oxide</i> для опции 2.....	83
Вопросы для самопроверки по главе 3.....	85
Дополнительная литература к главе 3.....	85
Глава 4. Пример решения системных исследовательских задач в производстве ИМС: дефектность ТП БФСС	87
4.1. Исходные данные, проблема и постановка задач.....	87
4.2. Направление и методология исследований.....	88
4.3. Кинетика роста и укрупнение дефектов БФСС.....	91
4.4. Внешний вид и классификация дефектов БФСС.....	93
4.5. Обобщение результатов.....	100
4.6. Оценка заряда в пленках БФСС <i>in-line</i> методом SPV.....	101
Вопросы для самопроверки по главе 4.....	103
Глава 5. Примеры решений частных технологических задач в производстве ИМС: оценка процессов ХОГФ и тонких пленок для ПМД в субмикронных ИМС	104
5.1. Общие сведения.....	104
5.2. Задачи и методология оценки процессов ХОГФ.....	105
5.3. Оценка заполнения пустот в БФСС при использовании RTA.....	107
5.4. Оценка модифицированных процессов SACVD БФСС.....	107
5.5. Оценка PECVD <i>liner oxide</i>	110
5.6. Оценка процесса получения SiO ₂ и ФСС в ПВП.....	112
Вопросы для самопроверки по главе 5.....	115
Библиографический список.....	116
Термины, аббревиатуры, определения.....	120

ВВЕДЕНИЕ

История промышленных технологий изготовления интегральных микросхем, ИМС (*integrated circuit, IC*) началась в 1970-х годах. Пройдя гигантский путь развития, традиционно описываемый в рамках так называемого «закона Мура» (*Moor's law*) [1–3], к настоящему моменту времени наиболее передовые ИМС включают в себя миллиарды транзисторов с нанометровыми размерами элементов [4, 5]. На рис. 1 приведены примеры фотографий внешних видов ИМС. Слева изображена первая коммерческая ИМС в составе 2-х транзисторов фирмы Fairchild Semiconductors, изготовленная в 1961 году на кремнии [6]. Справа показана содержащая 42 млн транзисторов ИМС *Pentium 4* фирмы Intel, изготовленная в 2000 году по кремниевой технологии с проектно-технологическими нормами 0,18 мкм (ПТН, *technology node*).

ИМС изготавливаются по т.н. «групповым планарным технологиям» (*planar technology*) в/на исходных полупроводниковых подложках/пластинах (в разных источниках именуются *substrate, wafer, slice*). В основу изготовления ИМС положены разнообразные и чрезвычайно сложные производственные процессы, объединенные в многооперационные технологические маршруты (*process flow*). После прохождения всех групповых операций пластины разделяются на отдельные кристаллы (*chip, die*), которые собираются в различные корпуса на сборочных производствах.

Для удобства протяженные технологические маршруты изготовления кристаллов ИМС на групповых операциях общепринято разделяют на два укрупненных суб-маршрута:

– суб-маршрут создания совокупности транзисторных структур в подложках, который в англоязычных тематических информационных источниках называют *Front-End-Of-Line (FEOL)*;

– суб-маршрут создания на поверхности подложек с транзисторными структурами системы многоуровневой металлизации, который называют *Back-End-Of-Line (BEOL)*.

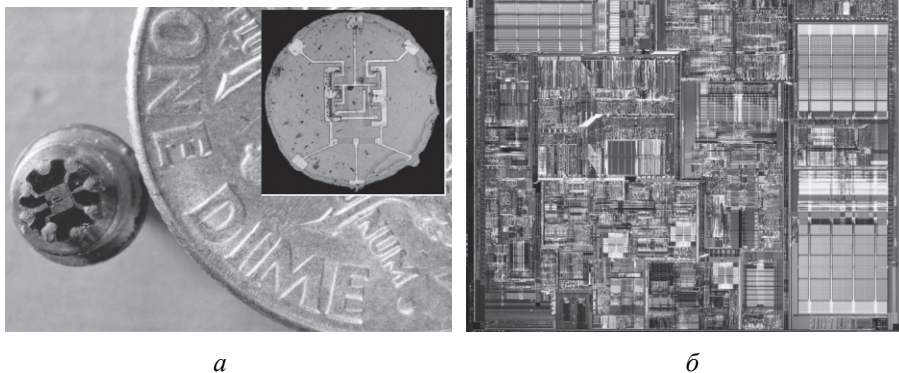


Рис. 1. Фотографии внешнего вида:

a – ИМС в корпусе фирмы Fairchild Semiconductors (слева) в сравнении с 10-ти центовой монетой США (диаметр 18 мм). На врезке справа сверху укрупненно показана топология ИМС; *б* – кристалла ИМС Intel Pentium 4, размер 217 мм², (изображение взято с сайта <https://www.tayloredge.com/museum/processor/processorhistory.html>)

Упрощенная схема организации производства ИМС приведена в виде блок-схемы на рис. 2 [7]. В производство, располагаемое в «чистых комнатах» (*cleanroom fab*), извне поступают исходные материалы (*materials*), пластины (*wafers*), а также фотошаблоны (*masks*), созданные на основе дизайна ИМС (*design*). Внутри производственной зоны с помощью многократно повторяющихся процессов фотолитографии (*photolithography*), термических процессов окисления, диффузии, отжига (*thermal processes*), ионной имплантации (*implant*) и травления (*etch*) в исходных подложках формируются прецизионные области диэлектрической изоляции, а с использованием легирующих элементов-примесей В, Р, As – диффузионные области. С помощью тонкопленочных диэлектрических (*dielectric deposition*) и других материалов формируются транзисторы, сопротивления, конденсаторы, элементы памяти. Далее эти элементы объединяются согласно принципиальным схемам ИМС металлическими проводниками (*metallization*) с изолирующими материалами между ними, составляя в целом систему многоуровневой металлизации ИМС. Для выравнивания (планаризации, *pla-*

narization) ступенчатых рельефов ИМС используется метод химико-механической полировки (*chemical mechanical polishing, CMP*)

После изготовления пластины покидают *cleanroom fab* и поступают на тестирование (*test*), разделение на кристаллы, сборочные процессы (*packaging*); изготовление ИМС заканчивается их измерением (*final test*).

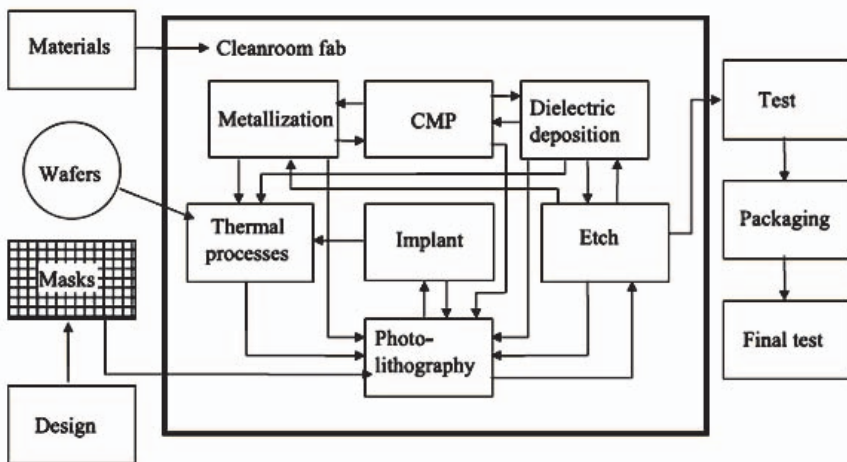


Рис. 2. Упрощенная блок-схема организации микроэлектронного производства

Строение ИМС общепринято отображать в виде схем/изображений поперечных сечений (*cross-section*). На рис. 3 приведены примеры сечений кристаллов ИМС. Слева показана схема простейшего инвертора, справа – фотография скола многоуровневого кристалла ИМС, полученная с помощью растрового электронного микроскопа, РЭМ (*scanning electron microscope, SEM*) [5]. Изображение четко демонстрирует логику формирования ИМС в виде последовательных слоев из важнейших конструктивных составляющих ИМС – материалов в виде тонких пленок (*thin film*). В их число входят: поликристаллический кремний, нитрид кремния, диоксид кремния, силикатные стекла, материалы с низкой диэлектрической постоянной, проводящие материалы (силициды и нитриды металлов), и металлы (алюминий, медь).

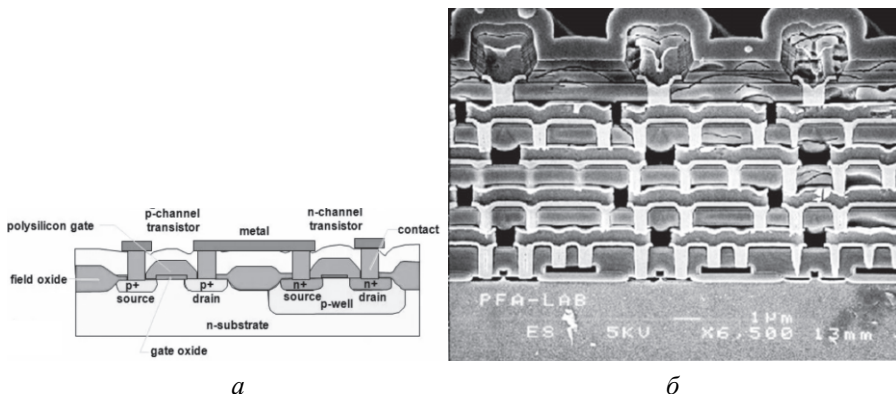


Рис. 3. Схема поперечного сечения ИМС простейшего инвертора (изображение взято из открытых источников Интернета) (а); РЭМ фотография скола поперечного сечения ИМС с 5-ти уровневой системой металлизации на основе алюминия и диэлектрических тонких пленок, изготовленной по ПТН менее 0,5 мкм (б)

Особенностью современных групповых планарных технологий изготовления ИМС является **наукоемкость** (применение сложных по составу материалов и сложных технологических процессов) и **прецизионность** (изготовление элементов ИМС с малыми размерами, высочайшими точностью и повторяемостью/воспроизводимостью). Последнее во многом определяется использованием сложнейшего современного технологического оборудования в совокупности со специальными инструментальными методами анализа материалов и технологий. Операции контроля технологических параметров ИМС являются неотъемлемой составной частью маршрутов изготовления кристаллов ИМС. При этом эволюция технологий ИМС сопровождалась эволюцией аналитических методов контроля технологий и соответствующих приборов. С уменьшением ПТН ИМС происходило усложнение аппаратуры и методик измерений, прежде всего, в плане точности проведения количественных измерений. Например, измерение толщины тонких пленок диоксида и нитрида кремния на подложках кремния в самом начале становления технологий ИМС проводилось визуально по таблицам цвета пленок на кремнии с точностью в десятки и сотни нанометров. В современном производстве ИМС аналитические приборы позволяют проводить измерения с точностью порядка долей нанометра в десятках точек на пластине в автоматизированных режимах

со сбором и компьютерной статической обработкой результатов измерений.

Обобщенных данных по методам контроля групповых технологий ИМС в настоящее время немного. Удобной и понятной представляется классификация методов и оборудования для контроля процессов и технологий современных субмикронных ИМС на автономные (*stand-alone tools*) и встроенные/интегрированные в оборудование (*integrated tools*), см. таблицу. Для рассматриваемого в настоящем пособии уровня технологий ИМС (ПТН > 0,13 мкм) актуальными являются автономные методы анализа, реализованные на соответствующих приборах. Отметим, что основы используемых для контроля технологий ИМС инструментальных методов в большинстве своем известны давно, в том числе исторически использовались для контроля технологий, то есть не являются оригинальными. Однако все применяемые в современных производствах ИМС методы контроля и аппаратура адаптированы под нужды производства. Это включает, например, работу с пластинами разных, в том числе – больших размеров, соответствие аппаратуры требованиям чистых производственных помещений, соответствие требованиям автоматизации больших объемов измерений и отображения результатов в удобной для инженеров-технологов форме.

Классификация измерительных приборов для технологий ИМС [8]

<i>Stand-Alone tools:</i>	
функционируют независимо от процессов производства и используются для выполнения необходимых измерений на пластинах	
<i>In-line</i>	Используются в процессе производства, в том числе на пластинах с рельефом (неразрушающие, не загрязняющие)
<i>At-line</i>	Используются на предприятии (разрушающие, загрязняющие)
<i>Off-line</i>	Используются только вне предприятий (разрушающие или загрязняющие)
<i>Integrated tools:</i>	
являются частью процессов/оборудования и представляют результаты измерений в режиме реального времени	
<i>On-line</i>	Используются для измерения пластин с рельефом, но не в ходе процессов
<i>In situ</i>	Измеряют параметры пластин, процессов или оборудования в процессе изготовления в режиме реального времени (real-time measurement)

В современном производстве ИМС автономные аналитические методы/приборы используются следующим образом:

– внутри *cleanroom fab* – основного производственного помещения. Такое помещение оснащено технологическим, аналитическим и вспомогательным оборудованием; в зарубежных источниках информации его также часто называют *production line* (см. описание зарубежного предприятия в [9]). В таких помещениях проводится два вида технологического контроля:

1) выборочный (репрезентативный) контроль параметров подложек с рельефом (*patterned wafers*) из так называемых «рабочих партий пластин» (*production wafer lot*). Такой контроль необходим для мониторинга только критически важных характеристик конкретных технологических операций по ходу производства кристаллов ИМС по заданному маршруту изготовления;

2) контроль характеристик «тестовых подложек» (*test wafer*, часто называют «пластины-мониторы» – *monitor wafers*), используемых, например, для контроля характеристик отдельных технологических процессов/операций.

Аналитические методы с соответствующим оборудованием, размещенным в пределах *cleanroom fab*, называют ***in-line* методами** (анализа, контроля, метрологии, мониторинга). В зарубежной литературе встречаются термины *in-line control*, *in-line metrology*, *in-line inspection*, *in-line monitoring*, далее используется термин *in-line* контроль. Методы *in-line* контроля являются **неразрушающими** (*non-destructive*), т.е. не приводящими к нарушениям целостности анализируемых объектов и изменениям их характеристик, и **не загрязняющими** (*non-contaminating*). Применительно к рабочим партиям пластин в производстве ИМС это означает, что после измерений параметров технологий на пластине изготовление кристаллов можно продолжать.

Важнейшими особенностями *in-line* контроля являются:

1) использование только целых полупроводниковых подложек и только внутри чистой комнаты, что исключает возможность загрязнения пластин;

2) определение усредненных значений критических параметров технологий в рамках зафиксированных программ измерений, введенных в аналитическое оборудование. Оборудование дает возможность проводить измерения в полуавтоматическом или автоматическом режимах с компьютерной обработкой данных. Это позволяет быстро отслеживать результаты и проводить долговременный мониторинг соот-

ветствия критических параметров технологических процессов установленным допустимым границам параметров процессов. Границы параметров задаются верхней и нижней границами допусков (ВГД, НГД) параметров технологических процессов (*Upper Control Limit, UPL*, и *Lower Control Limit, LCL*). Мониторинг параметров процессов дает возможность решать главную задачу современной производственной технологии изготовления ИМС – поддержание характеристик технологических процессов на заданном уровне с применением методологии статистического контроля производства.

– *At-line методы* используются вне «чистой комнаты» предприятия, как правило, в лабораториях предприятия, оснащенных набором необходимых аналитических приборов и оборудования. Подобный анализ обычно является **разрушающим** и чаще всего **загрязняющим**, не допускающим дальнейшее использование обследуемых пластин. Например, пластины могут подвергаться воздействию, приводящему к изменениям характеристик, оставаясь при этом целыми. Для анализа на РЭМ из целых подложек путем их раскалывания на мелкие части определенной формы изготавливаются объекты для проведения специализированных электронно-микроскопических исследований;

– *Off-line методы* используются в тех случаях, когда требуется проведение дополнительного анализа с помощью приборов и аппаратуры, не имеющихся на предприятии. Для этого существуют специализированные исследовательские центры или лаборатории при университетах. Примерами задач для решения могут быть, например, калибровка *in-line* аналитических приборов предприятия, или проведение расширенных исследовательских работ при появлении специфических видов отклонений технологий, в также освоение новых технологий. Подобный анализ является **разрушающим** и **загрязняющим**, что исключает возможность дальнейшего использования анализируемых пластин.

Технологии создания тонких пленок (ТП), их структура, состав и свойства требуют наиболее частого и наиболее разнообразного инструментального контроля в современном производстве ИМС с помощью вышеупомянутых методов анализа, причем в наибольшей степени – методами *in-line* контроля. Тонкие пленки для ИМС создают двумя основными методами. Метод физического осаждения (в зарубежной литературе используют термин *Physical Vapor Deposition, PVD*) в упрощенной терминологии может быть представлен как метод напыления ТП из соответствующих мишеней известного состава [10]. Метод химического осаждения из газовой фазы, ХОГФ (в зарубежной

терминологии – Chemical Vapor Deposition, CVD) подразумевает химический синтез нового материала из исходных веществ. Разновидностью ХОГФ являются методы плазмоактивированного (плазмохимического) осаждения, ПХО (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD), а также, в последние годы – методы импульсного ХОГФ (pulsed-CVD) и атомно-слоевого осаждения, АСО (Atomic Layer Deposition, ALD). Вопросы ХОГФ применительно к микроэлектронике рассмотрены в учебных пособиях [11–13].

Принципиальное отличие процессов ХОГФ тонких пленок от других технологических процессов в групповых технологиях ИМС заключается в том, что синтез новых ТП материалов (новой фазы) осуществляется непосредственно в ходе многооперационных технологических маршрутов изготовления ИМС. Это накладывает жесткие требования к пониманию инженерами-технологами особенностей процессов ХОГФ, качеству и повторяемости/воспроизводимости состава, структуры и свойств ТП материалов. Приборы *in-line* контроля (часто в совокупности с методами *at-line* и *off-line*) могут дать сведения о скоростях наращивания, составе, важных для технологии свойствах ТП (растворение, плазменное травление, неоднородность поверхности), стабильности материалов во времени, дефектности, механических напряжениях, и т.д.

Важно отметить, что в ходе эволюции ИМС роли, виды и количество ТП в ИМС непрерывно возрастают. Следовательно, в производстве ИМС регулярно возникают задачи освоения новых типов (последующих генераций) приборов, что в свою очередь означает необходимость освоения и использования новых, более сложных типов ТП. Технологи-производители как правило, ограничены во времени и в экспериментальных возможностях зафиксированными в приборах контроля алгоритмами измерений. В основном технологами решаются задачи мониторинга повторяемости/воспроизводимости процессов и характеристик ТП на соответствие *UCL* и *LCL*, а также проводится анализ возникающего брака. Однако часто для решения новых задач развития производства возникает необходимость выйти за очерченные производством рамки и, не меняя сути методик и приборов, получить максимально возможный объем новой необходимой технологической информации. На практике, например, требуется перейти от фиксирования единичных усредненных данных параметров для пластины по отношению к *UCL/LCL* к получению карт распределения контролируемых параметров по площади пластины (*wafer mapping*). Такие карты могут указывать на возможность возникновения локальных неодно-

родностей параметров по площади пластины в связи с изменением, например, режимов осаждения тонких пленок.

Целью настоящего учебного пособия является введение студентов в особенности применения *in-line* контроля групповых технологических процессов производства ИМС с ПТН > 0,13 мкм (что соответствует ИМС с алюминиевой металлизацией), а также, с использованием иных методов контроля – структуры, состава и свойств ТП. Предполагается, что на предшествующих годах обучения студенты ознакомились с базовыми основами технологии ИМС, принципами работы применяемых для контроля технологий измерительных приборов, а также с основными технологиями и свойствами ТП [11–13]. Для более глубокого ознакомления с маршрутами и технологиями ИМС рекомендуется использовать доступные зарубежные и отечественные монографии и учебные пособия, например, приведенные в списке дополнительной литературы.

Пособие составлено на базе 40-летнего личного опыта работы автора на отечественных и зарубежных предприятиях микроэлектронной отрасли и в исследовательских учреждениях. Работы включали исследования, разработки процессов ХОГФ и изучение тонкопленочных материалов, внедрение технологий в серийное производство ИМС. 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.

При составлении данного пособия автор выбрал пример важнейшего узла ИМС – создания диэлектрической планаризируемой изоляции между транзисторным уровнем (*FEOL*) и первым уровнем металлизации (*BEOL*) микросхем. Этот узел называют «предметаллический диэлектрик», ПМД (*pre-metal dielectric*, *PMD*) Были поставлены следующие задачи, рассмотренные в соответствующих главах пособия:

- глава 1 – кратко изложить необходимые сведения о ТП для ИМС;
- глава 2 – изложить материал о неразрушающих методах *in-line* контроля ТП в производстве ИМС; осветить назначение *in-line* методов для контроля технологии ИМС; дать краткие представления о наиболее часто используемых и информативных методах анализа *at-line* и *off-line*;
- глава 3 – рассмотреть пример с использованием в основном методов *in-line* контроля для квалификации новых для предприятия микроэлектроники оборудования и процессов ХОГФ наиболее сложного трехкомпонентного материала – борофосфоросиликатного стекла;