

Содержание

Введение	6
-----------------------	---

▼ Глава 1

Особенности тонкопленочных покрытий

для кристаллов БИС	9
1.1. Планарные контакты, межэлементные соединения и контактные площадки на основе алюминия	10
1.2. Тонкопленочные покрытия на основе благородных металлов, никеля и бинарных сплавов	25
1.3. Эксплуатационные характеристики тонкопленочных покрытий кристаллов БИС	32
1.3.1. Коррозионная устойчивость тонкопленочных покрытий кристаллов	32
1.3.2. Процессы электромиграции в слоях металлизации на основе сплавов алюминия	37
1.4. Особенности проволочного микромонтажа кристаллов БИС	44
1.5. Аппаратное обеспечение сопряженных с микромонтажом технологических процессов	56
1.5.1. Типовая структура производственных автоматических линий нанесения гальванопокрытий	57
1.5.2. Оборудование для локального нанесения покрытий	59
1.5.3. Источники питания гальванических ванн	60
1.6. Выводы	62

▼ Глава 2

Особенности разработки процессов формирования

функциональных тонкопленочных покрытий

для микромонтажа кристаллов БИС	64
2.1. Концепция воспроизводимого микромонтажа кристаллов в производстве изделий микроэлектроники	64

2.2. Моделирование процесса термической обработки планарных тонкопленочных покрытий с помощью ИК-излучения	74
2.3. Выводы	81

▼ Глава 3

Методы формирования и исследования функциональных тонкопленочных покрытий	82
3.1. Формирование элементов планарных тонкопленочных покрытий	82
3.1.1. Формирование пленок алюминия для систем двухуровневой металлизации	82
3.1.2. Особенности формирования углеродо- и алмазоподобных пленок при лазерном и ионном стимулировании процессов	89
3.1.3. Методы формирования тонкопленочных покрытий при стимулирующем лазерном воздействии	93
3.2. Особенности формирования непланарных тонкопленочных покрытий кристаллов БИС	100
3.3. Методы микромонтажа кристаллов БИС	105
3.3.1. Ультразвуковая микросварка и микромонтаж кристаллов на ленточных носителях по стандартам фирмы «LG»	105
3.3.2. Термозвуковая микросварка золотой проволокой на медных рамках	111
3.3.3. Моделирование и оптимизация процесса ультразвуковой микросварки алюминиевых проволочных выводов на покрытиях из сплава никель–индий	113
3.3.4. Токовая стимуляция ультразвуковой сварки алюминиевых выводов на никелевых покрытиях	119
3.4. Основные методики и результаты исследования технологических характеристик функциональных тонкопленочных покрытий и испытания прочности микромонтажных соединений	125
3.5. Выводы	140

▼ Глава 4

Состав, структура, физические свойства функциональных тонкопленочных покрытий	143
4.1. Планарные тонкопленочные покрытия на основе алюминия, меди и углерода	143
4.1.1. Морфология, микроструктура и устойчивость к образованию бугорков металлизации на основе сплавов алюминия	143
4.1.2. Электрофизические характеристики элементов первого и второго уровней разводки	156
4.1.3. Устойчивость к коррозии металлизации на основе сплавов алюминия	169

4.1.4. Устойчивость к электромиграции металлизации на основе сплавов алюминия	172
4.2. Непланарные тонкопленочные покрытия на основе золота, сплавов никеля и олова	179
4.2.1. Кинетика и механизм катодного осаждения тонких пленок золота	179
4.2.2. Интенсификация процесса электроосаждения тонких пленок сплавов олова	205
4.2.3. Закономерности формирования и свойства тонких пленок сплава никель–индий и слоистых структур на основе никеля	210
4.3. Выводы	218

▼ Глава 5

Методы оценки качества микромонтажных соединений	220
5.1. Стабильность характеристик соединений, полученных термокомпрессионной и ультразвуковой сваркой	220
5.2. Влияние на качество микромонтажных соединений толщины золотого покрытия и подготовительных операций	235
5.3. Влияние свойств и условий формирования никелевых покрытий элементов корпусов БИС на качество микросварных соединений	241
5.4. Выводы	246

▼ Глава 6

Базовое технологическое оборудование для формирования функциональных тонкопленочных покрытий и микромонтажа кристаллов	248
6.1. Устройство импульсной активации ультразвуковой микросварки и гальваническая магнитная подвеска	248
6.2. Устройства для формирования высококачественных электрохимических покрытий	252
6.3. Базовые конструктивно-технологические решения освоенных в серийном производстве изделий микроэлектроники	270
6.4. Техничко-экономическая эффективность промышленного использования разработанных технологий выпуска конкурентоспособных изделий	289
6.5. Выводы	295
Заключение	297
Список литературы	301

Введение

Эволюция изделий интегральной микроэлектроники неотделима от прогресса в области техники корпусирования интегральных микросхем, которую еще 12–15 лет тому назад в отечественной электронной промышленности относили к разряду второстепенных, не требующих проведения широкомасштабных научных исследований и базирующихся на использовании возможностей имеющегося парка сборочного оборудования. За этот период решены многие находившиеся в центре внимания существенные проблемы по автоматизированному проектированию интегральных микросхем и по технологии формирования базовых элементов конструкции кремниевых кристаллов (чипов) с локальными легированными и встроенными диэлектрическими областями, которые имеют систему тонкопленочных контактов и межэлементных соединений на лицевой или же планарной стороне [1–10].

Резкое повышение интереса к технике корпусирования современных изделий интегральной микроэлектроники – больших интегральных схем (БИС) и сверхбольших интегральных микросхем (СБИС), – в которой центральное место занимает микромонтаж кристаллов, обусловлено в настоящее время следующими основными причинами.

Во-первых, достигнутые успехи в изготовлении кристаллов высокой функциональной сложности и степени интеграции становится трудно реализовать без принципиального совершенствования системы соединений в составе аппаратуры в целом, если рассматривать проблему комплексной микроминиатюризации аппаратуры. Действительно, согласно правилу Рента, число необходимых сигнальных выводов (входов-выходов БИС) равно $n = 4,5m^{0,4}$, где m – число вентилях в кристалле [11]. Добавив число выводов шин питания и заземления, составляющих до 25% от расчетного числа сигнальных выводов, получаем, что для современных схем памяти и логических

схем, содержащих порядка 2500–7000 вентиляей, число внешних выводов достигает 200. В ряде случаев разработчики вынуждены даже идти на некоторое функциональное усложнение схемы, если оно позволяет сократить число внешних выводов.

Во-вторых, несмотря на заметные успехи в масштабировании элементов БИС и использование микромошных режимов их работы, возрастание функциональной сложности кристаллов, сопровождающееся вместе с тем увеличением их габаритных размеров, все же приводит к росту рассеиваемой мощности. Заметной стала проблема обеспечения эффективного теплоотвода. Особенно резкий скачок в изменении указанных показателей отмечается за последние 5–6 лет. Поэтому конструктивная реализация современных БИС недостижима без увеличения габаритов всего корпуса, что, впрочем, не отвечает требованиям повышения быстродействия из-за роста распределенных паразитных сопротивлений и емкостей вследствие удлинения токоведущих элементов.

В-третьих, важнейшие проблемы микромонтажа кристаллов связаны с унификацией и автоматизацией технологических процессов, что является следствием жестких требований к их высокой воспроизводимости в серийном производстве конкурентоспособных изделий микроэлектроники. Без достижения высокого процента выхода годных на этом блоке операций (по стандартам корпорации Fujitsu – 98–99%) невозможно вести речь о международной деловой и технологической кооперации.

В-четвертых, ряд проблем микромонтажа кристаллов вытекает из задачи снижения стоимости сборочных операций и стоимости всего изделия за счет уменьшения расхода драгоценных металлов и кобальтсодержащих сплавов.

На наш взгляд, принципиальный подход к решению накопившихся научно-технических проблем микромонтажа кристаллов заключается в разработке адекватных современным требованиям тонкопленочных покрытий и технологий их формирования, а также соответствующих методов подсоединения микропроводочных и балочных выводов и создания твердотельных соединений кристалла с основанием корпуса таким образом, чтобы фактически реализовать важнейшую задачу интегральной технологии – создание твердотельной структуры в системе «полупроводниковый кристалл – внешние выводы корпуса БИС».

Действительно, до настоящего времени разработки в области тонкопленочных покрытий выполнялись в основном с целью решения

каких-либо отдельных задач, например повышения устойчивости к электромиграции [12], возможности реализации самосовмещения затвора с областями истока и стока МОП-транзисторов в составе БИС, снижения электросопротивления словарных шин благодаря использованию низкоомных силицидов тугоплавких металлов [13] и т. д.

К настоящему времени в научно-технической литературе и патентных источниках не приводится достаточно систематизированных сведений по технологическим закономерностям формирования такого класса покрытий, результатам комплексного исследования свойств получаемых пленочных покрытий. В большинстве публикаций ведущих западных фирм, производящих оборудование высокого класса для достижения указанных целей, эти составляющие «ноу-хау» вопросы остаются за рамками рекламных сообщений [14, 15].

Таким образом, проблема получения высококачественных функциональных тонкопленочных покрытий с высокой воспроизводимостью свойств, отвечающих требованиям к операциям микромонтажа кристалла, является актуальной и требует комплексного решения целого ряда задач, в том числе по обоснованному выбору материалов и пленочных структур на основе недефицитных металлов и сплавов, оптимизации режимов реализации технологического процесса нанесения покрытий и посадки кристаллов на основания корпуса (выводную рамку) в условиях обеспечения наивысшей производительности процесса изготовления и качества изделий микроэлектроники [16, 17].

Особенности тонкопленочных покрытий для кристаллов БИС



За последние два десятилетия в области технологии тонкопленочных покрытий на непланарной и особенно планарной (лицевой) стороне кристаллов для так называемых тонкопленочных систем металлизации (ТСМ) накоплен значительный опыт использования различных проводящих материалов, новых технологических процессов и маршрутов применительно к широкому классу изделий микроэлектроники, определяющих, по сути дела, конструктивно-технологические особенности ТСМ, а также микромонтажа кристаллов. Масштабирование БИС и СБИС, возрастание требований к их качеству, технологичности и надежности приводит к ужесточению и появлению новых требований, которым должны удовлетворять ТСМ. Например, при масштабировании БИС в t раз сопротивление пленочных проводников возрастает в $1/t$ раз (даже без учета вертикального масштабирования), а переходное сопротивление контактов – в $1/t^2$ раз. Свидетельствами большого внимания к проблеме получения высококачественных ТСМ являются резко возросший поток научных публикаций и сообщений на конференциях и симпозиумах, а также развертывание работ по республиканским научно-техническим программам, таким как «Белэлектроника», «Материалы» и др. Среди основополагающих работ отечественных ученых в этой области можно отметить публикации [1–6], включенные в библиографию.

1.1. Планарные контакты, межэлементные соединения и контактные площадки на основе алюминия

Поэтапное уменьшение топологических размеров элементов ТСМ и толщины отдельных слоев (масштабирование) тонкопленочных структур на планарной стороне кристаллов (чипов) в различных изделиях микроэлектроники, наряду с ужесточающимися требованиями к их электрофизическим свойствам и надежности, а также к технологичности процесса микромонтажа изготовленных кристаллов, обуславливают повышенное внимание к ним как разработчиков, так и технологов. Среди этих элементов можно выделить получившие наибольшее распространение ТСМ на основе алюминия и его сплавов (Al-Si, Al-Si-Cu), используемые для формирования планарных омических контактов и диодов Шоттки, межэлементных соединений и контактных площадок для подсоединения балочных выводов. Находят также применение и многослойные ТСМ на базе алюминия с использованием в качестве промежуточных слоев тугоплавких переходных металлов [1].

Структурные и фазовые превращения в многослойных ТСМ в результате высокотемпературных технологических и эксплуатационных воздействий определяют принципы и критерии выбора материалов слоев, их толщины и однородности по составу, а также методов формирования отдельных слоев. Важным фактором при разработке технологических процессов формирования многослойных ТСМ является принцип самосовмещения, который выдвигает определенные требования как к самим материалам слоев, так и к технологии их формирования, особенно в сложных структурах БИС с проектными нормами $\sim 1,0 \div 1,5$ мкм и глубиной залегания р-п-перехода на уровне 0,15 мкм.

Учитывая функциональные задачи, выполняемые отдельными слоями, многослойный планарный контакт к локальным областям кремния в общем случае можно представить в виде конструктивно и технологически взаимосвязанных слоев: контактного, барьерного, основного токопроводящего, пассивирующего, разделительного диэлектрического и др., при этом полагается, что самыми ответственными из них, с точки зрения воспроизводимости микросборки крис-

таллов и их надежности, являются проводящий и защитный слой [3, 12]. Разумеется, удовлетворить многочисленным и часто противоречивым требованиям, предъявляемым к ТСМ и технологии их изготовления, при использовании одного какого-либо металла или сплава сложно. Поэтому широкое распространение в современных БИС получили многослойные ТСМ, в которых материал каждого функционального слоя наиболее полно удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям.

Для получения контактных слоев к локальным областям Si-кристалла наиболее перспективными материалами представляются такие металлы платиновой группы, как Pt, Pd, Ru, образующие переходные слои силицидов с низким контактным сопротивлением – для силицида платины, например, не выше 10^{-5} – 10^{-6} Ом \times см² при концентрации легирующей примеси в Si выше 10^{19} см⁻³ [18]. Металлы платиновой группы позволяют также обеспечить формирование самосовмещенных контактов, однако их применение сдерживается заметным проникающим действием образующихся силицидов вглубь кремниевой подложки, что критично в случае мелко залегающих р-п-переходов, а также термических воздействий, например при микросборке кристаллов [17]. Несколько снизить эффект проникновения таких силицидов при термообработке можно легированием исходных тонких пленок платиновых металлов тугоплавкими металлами. Так, энергия активации роста силицида для сплавов Pd-V, Pd-W повышается соответственно до 1,44–1,52 эВ (для чистого Pd – 1,40 эВ), вследствие чего при термообработке снижается проникновение фазы Pd₂Si вглубь кремния при сохранении электрических свойств контакта [19].

Тугоплавкие переходные металлы, такие как W, V, Ti и др., также могут использоваться в качестве контактных или барьерных слоев в многослойной структуре ТСМ, а в ряде случаев функции контактных и барьерных слоев совмещаются при использовании лишь одного слоя из этих металлов. Эти металлы, а также некоторые их сплавы, например псевдосплав W-Ti, применяются наиболее часто, так как в целом полнее отвечают комплексу требований по основным электрофизическим свойствам: минимальным удельному электрическому сопротивлению, удельному переходному сопротивлению контактов к силицидным и металлическим слоям, остаточным механическим напряжениям, структурной однородности.

При этом преимущественным диффундирующим компонентом в системе Si/металл при температурах образования силицидов выше 600 °С является Si (хотя для систем типа Si/Pt и Si/Pd таким компо-

нентом остается металл). Поэтому проникающее действие силицида тугоплавкого переходного металла вглубь кремния при термообработках снижается [13], а энергия активации процесса образования таких силицидов превышает 2 эВ [20]. Расходование Si подложки при формировании силицидов можно еще сильнее уменьшить при нанесении предварительно синтезированных силицидов [1], имплантации ионов Si в пленку металла [21] либо формировании подслоев моно- или поликристаллического Si [22].

Следует, однако, отметить, что, используя в качестве контактных материалов тугоплавкие переходные металлы, не удастся обеспечить электрические характеристики силицидных структур, сравнимые с характеристиками контактов из металлов платиновой группы. Например, удельное переходное сопротивление контактов на основе WSi_2 , $TaSi_2$, VSi_2 , $TiSi_2$ к кремнию, легированному до $10\text{--}19\text{ см}^{-3}$, находится в диапазоне $10^{-3}\text{--}10^{-4}\text{ Ом}\times\text{см}^2$ [1]. Представляет интерес также применение в качестве барьерных слоев двойных сплавов тугоплавких переходных металлов, таких как Ti-W и Mo-Re, нитридов (TiN, HfN, ZrN) и различных комбинаций слоев различного состава, в том числе с использованием проводящих оксидных пленок, например TiO_2 или RuO_2 . ТСМ типа W/TiN/TiSi₂/Si с барьерным слоем, формируемым быстрым термическим азотированием поверхности $TiSi_2$, стабильна до температуры 900 °С [23]. Вместе с тем тугоплавкие металлы не только предотвращают взаимодействие между верхним проводящим слоем (Al, Au, Ag) и Si-подложкой, но их силициды меньше взаимодействуют с металлом проводящего слоя, по сравнению с силицидами платиновых металлов, что уменьшает вероятность образования высокоомных интерметаллических соединений.

К числу главных требований к материалам основных токопроводящих слоев относятся низкое удельное сопротивление и высокая устойчивость к термоэлектромиграции.

Сопротивление ТСМ, возрастающее при масштабировании БИС, оказывает сильное влияние на быстродействие (рис. 1.1) [24]. При этом, когда характеристический размер затворов МОП БИС становится меньше 2 мкм, дальнейшее масштабирование целесообразно лишь при использовании низкоомных ТСМ, а относительно высокоомные пленки поликристаллического кремния становятся неприемлемыми.

Другими словами, сопротивление ТСМ непосредственно определяет результаты масштабирования БИС. Уменьшение ширины

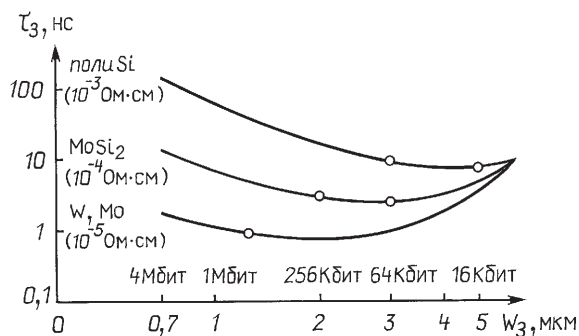


Рис. 1.1. Влияние технологического уровня, оцениваемого по характеристическому размеру топологического рисунка затворов (W_3) МОП БИС, на время задержки сигнала (τ_3)

словарных и адресных шин, а также межэлементных пленочных соединений позволяет снизить потери полезной площади кристалла, на которой дополнительно можно разместить активные элементы. В этой связи для БИС актуальна интеграция в третьем измерении, которая может реализовываться в двух- и трехуровневых ТСМ, причем площадь, занимаемая нижним уровнем, должна минимизироваться.

Для многоуровневых ТСМ с учетом необходимости создания межуровневой изоляции важно знать, помимо сопротивления основных токопроводящих слоев, такие характеристики материалов, как термостойкость, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), возможность формирования устойчивого оксида на поверхности проводящего слоя и другие технологические особенности. Поэтому в качестве материалов основных токопроводящих слоев нижних уровней наряду с поликристаллическим кремнием более широкое применение получают тугоплавкие металлы либо их силициды. Алюминий и его сплавы как наиболее низкоомные из проводящих материалов (табл. 1.1) используются для верхних уровней ТСМ. Сочетая токопроводящие слои из различных материалов в нижних и верхних уровнях разводки многоуровневых ТСМ, удастся получить значительно более компактные и быстродействующие БИС, чем при использовании одноуровневых ТСМ. Характерные примеры биполярных и МОП (металл–оксид–полупроводник) транзисторных структур с многоуровневыми ТСМ приведены на рис. 1.2, 1.3 [25].

Таблица 1.1. Важнейшие свойства материалов токопроводящих слоев многоуровневых ТСМ*

Материал	Удельное сопротивление, мкОм×см	Температура плавления, °С	ТКЛР 10 ⁻⁶ , град ⁻¹	Основной оксид	Примечание
Поли-Si	Определяется легированием	1420	3,0	SiO ₂	
Al	2,8	660	25	Al ₂ O ₃	
Mo	5,3	2620	5,0	MoO ₃	MoO ₃ в вакууме
MoSi ₂	21,5	1870	8,25	-	Улетучивается при нагреве
Ti	45,0	1690	8,5	TiO ₂	
TiSi ₂	16,7	1540	12,5	-	
Ta	15,5	2996	6,5	Ta ₂ O ₅	
TaSi ₂	38,0	2400	8,8–10,7	-	
W	5,3	3383	4,5	WO ₃	
WSi ₂	38,2	2050	6,25–7,9	-	
Zr	40,0	1852	5,7	ZrO ₂	
ZrSi ₂	106,2	1620	8,3	-	
Hf	35,1	2227	5,9	HfO ₂	
HfSi ₂	62	1910	–	-	
V	25,4	1890	8		
VSi ₂	52,5	1750	11,2–14,85		Данные по VSi ₂ противоречивы (от 13,3 до 66,5 мкОм×см)
Nb	12,5	2468	7	Nb ₂ O ₅	
NbSi ₂	50,0	1950	8,4–11,7	-	Данные по NbSi ₂ противоречивы (от 6,3 до 50,4 мкОм×см)
Co	6,24	1495	12		
CoSi ₂	19,0	1326	10,14		Данные по CoSi ₂ и NiSi ₂ противоречивы
Ni	6,84	1453	13		
NiSi ₂	~50	993	12,06		
Pd	10,8	1552	13		
Pd ₂ Si	32,5	1032	–	–	
Pt	10,6	1772	8		
PtSi	31,5	1229	–		
Ir	5,3	2410	6		
Ru	7,6	2310	8		
Y	32,0	1552	–		
Be	4,0	1278	12	BeO	
Au	2,35	1064	14,2		
Ag	1,59	961,93	19		

Таблица составлена по данным [26].

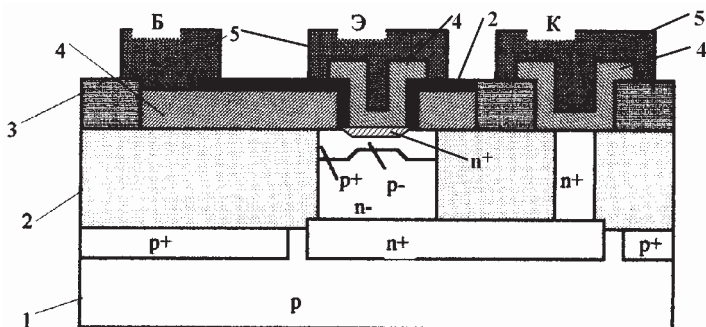


Рис. 1.2. Структура биполярного транзистора в составе БИС с многоуровневой ТСМ: 1) подложка из монокристаллического кремния; 2) термический SiO_2 ; 3) пленка SiO_2 , нанесенная химическим осаждением из газовой фазы; 4) поли-Si; 5) Al

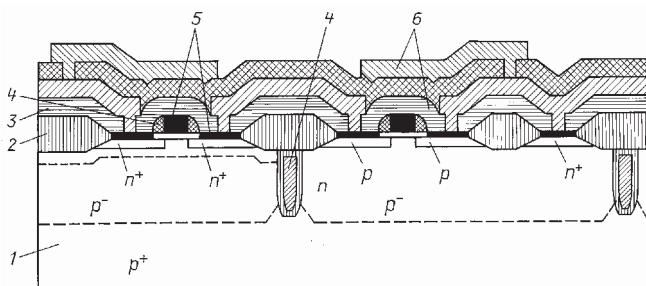


Рис. 1.3. Комплементарная МОП-структура с глубокими разделительными канавками и многоуровневой ТСМ: 1) подложка с эпитаксиальным слоем р-типа; 2) термический SiO_2 ; 3) термический SiO_2 , полученный нанесением из газовой фазы; 4) поли-Si; 5) TiSi_2 ; 6) Al

Нижние уровни таких ТСМ выполняются из термостойких материалов, способных выдерживать температуры процессов нанесения межуровневого диэлектрика (для пленок SiO_2 , получаемых методом низкотемпературного окисления (НТО), температура подложек составляет $450\text{ }^\circ\text{C}$, а методом плазмохимического окисления (ПХО)– $650\text{ }^\circ\text{C}$), а верхние обычно изготавливаются из Al, сплавов Al-Si или Al-Si-Cu и значительно реже – из других высокопроводящих металлов, таких как Au, Ве.

Полагается, что слои нижних уровней ТСМ удовлетворяют требованиям по электросопротивлению для современных БИС, если их поверхностное сопротивление не превышает 0,5–2 Ом/кв. Пленки поли-Si при толщине 0,45 мкм после операций диффузии или ионного легирования и отжига имеют достаточно высокое сопротивление (20–30 Ом/кв) и могут использоваться лишь на участках ТСМ малой протяженности. Полицидные пленки, то есть пленки силицидов, например титана или тантала, сформированные по методу твердофазных реакций на поли-Si, обладают при исходной толщине слоев Ti и Ta поверхностным сопротивлением соответственно 1 и 2 Ом/кв [13]. Многие зарубежные фирмы, такие как Texas Instruments, IBM, Nippon Electric Co. (NEC), Hitsu Ltd. и др., широко используют в новых разработках БИС преимущественно на МОП-структурах технологию «силицид» на поликремнии, то есть так называемых полицидных пленок на основе $TiSi_2$, $TaSi_2$, $MoSi_2$ и WSi_2 . Хотя пленки на основе $TaSi_2$, $MoSi_2$ и WSi_2 имеют более высокое сопротивление, чем $TiSi_2$, их применение оправдано высокой механической прочностью и термостойкостью, что положительно сказывается на операциях микромонтажа кристаллов.

Другая возможность снижения поверхностного сопротивления нижних уровней ТСМ заключается в применении чистых тугоплавких металлов (Mo, W, Ta) и псевдосплава TiW. Так, пленки Mo и W толщиной 0,35 мкм имеют поверхностное сопротивление 0,25 и 0,4 Ом/кв соответственно, что существенно ниже, чем у пленок поли-Si и силицидов [25]. Следует, однако, иметь в виду, что тугоплавкие металлы, за исключением Nb и Ta, не поддаются пассивации окислением наподобие пленок поли-Si и некоторых силицидов, что приводит к необходимости введения в технологический процесс дополнительных операций. В отличие от элементов ТСМ из силицидов, которые могут изготавливаться по самосовмещенной технологии, топологический рисунок элементов из тугоплавких металлов формируется лишь при помощи высокоэффективных методов травления, преимущественно по «сухой» технологии. В последние годы наметился прогресс в технологии селективного нанесения пленок W на кремниевые подложки методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ), после того как в 1985 г. фирмой Toshiba получен патент [27] и появились первые публикации о режимах осаждения W из газовой смеси гексафторида вольфрама и водорода и результатах опробования метода при изготовлении быстродействующих МОП

БИС. Проводятся также интенсивные исследования селективного ХОГФ и других материалов, в частности WSi_2 , Mo, Al.

В процессе масштабирования БИС значительно возрос уровень требований по устойчивости материалов основных токопроводящих слоев к термо- и электромиграции. Это обстоятельство обусловлено как непосредственно уменьшением характеристических размеров элементов, так и ухудшением теплоотвода в связи с наличием межуровневого диэлектрика и повышением плотности размещения элементов с ростом степени интеграции БИС. Кроме того, наряду с достаточно подробно изученным явлением зернограничной электромиграции в поликристаллических пленках [28] следует принимать во внимание другую важную причину отказов ТСМ БИС, которая проявляется в контактных окнах. Во многих случаях именно эта категория отказов ТСМ ограничивает надежность БИС.

Следует выделить еще один характерный вид отказов многоуровневых ТСМ, обусловленный пробоем межуровневого диэлектрика. Этот вид отказов часто имеет место при использовании на нижних уровнях ТСМ слоев на основе Al, в частности сплавов Al-Si (1 мас.%) и Al-Cu (2 мас.%) - Si (2 мас.%), вследствие образования пор и бугорков в металлической пленке в результате зернограничной электромиграции и термических воздействий, в том числе при микромонтаже кристаллов. В значительной мере ослабить действие этого фактора позволяет разработка фирмы Toshiba по технологии ТСМ, содержащей на нижнем уровне двухслойную пленку Al-Si/TiSi₂ либо Al-Si/MoSi₂. При этом улучшается статистика по противному напряжению межуровневого диэлектрика, приближаясь к показателям, характерным для ТСМ с нижним уровнем из соответствующего силицида, и возрастает время наработки на отказ почти на порядок величины в наиболее жестких условиях эксплуатации ($T = 125\text{ }^\circ\text{C}$, плотность тока $1,5 \times 10^6\text{ A/cm}^2$). Расчеты показывают, что энергия активации процесса электромиграции при использовании дополнительного пленочного покрытия Al-Si слоем TiSi₂ возрастает с 0,54 эВ до 0,83 эВ. Однако способность силицидов к образованию на их поверхности стабильных оксидных слоев ограничивает технологические возможности применения их в этих целях. Актуальность подобных исследований очевидна в связи с дальнейшим масштабированием БИС.

Анализ результатов исследований ТСМ с трехслойной структурой контактный/барьерный/основной токопроводящий слой на основе Al показывает, что большое значение имеют твердофазные реакции между отдельными слоями. Так, в многослойных контактах Si/PtSi/

Ti/Al при температурах отжига 485 °С обнаруживается фаза TiAl₃, на образование которой расходуется часть материала барьерного слоя. Следует также учесть, что растворимость Si в фазе TiAl₃ в несколько раз выше, чем в Al [29]. Поэтому при недостаточной толщине барьерного слоя или его дефектности скорость деградации контактов такого типа может оказаться неприемлемо высокой.

Одним из способов предотвращения образования в пленочных структурах ТСМ интерметаллических соединений является использование дополнительных барьерных слоев против химических и твердофазных взаимодействий. В отличие от диффузионных барьеров, основным критерием выбора материалов для таких дополнительных барьеров служит возможность минимизации градиента химического потенциала в системе. Если в двухслойной ТСМ типа «сплав АВ/С» свободная энергия системы А-В-С снижается за счет образования соединения или раствора состава ВС, то движущая сила твердофазной реакции пропорциональна разности частных свободных энергий В в АВ и В в АС [30]. Введение дополнительного слоя Д, образующего две новые поверхности раздела АВ/Д и Д/С, может при правильном выборе материала слоя Д иметь результатом снижение общей свободной энергии системы АВ/Д/С, по сравнению с АВ/С (рис. 1.4). При этом во время термообработок слой Д может почти целиком или полностью израсходоваться, но обеспечить уменьшение градиента химического потенциала в многокомпонентной системе и сделать ТСМ термодинамически более стабильной и устойчивой при термических воздействиях в процессе микромонтажа кристаллов БИС.

Другим способом повышения устойчивости многослойных ТСМ на стадии микромонтажа кристаллов является оптимизация состава материалов и режимов формирования барьерных слоев, выполняющих функции диффузионного барьера, с целью минимизации точечных дефектов структуры типа «проколов». Такая задача обычно решается путем выбора материалов с высокими значениями прочности и пластичности, а также технологических методов, не вызывающих больших радиационных повреждений в процессе нанесения пленок. Так, пленки псевдосплава Ti-W имеют оптимальное сочетание прочности и пластичности при соотношении элементов в сплаве 3:7 [31] и приемлемую плотность точечных дефектов при использовании магнетронного распыления плоской составной мишени со скоростью ~1 нм/с. Однако снижение дефектности барьерных слоев многослойных ТСМ остается серьезной проблемой в технологии масштабируе-

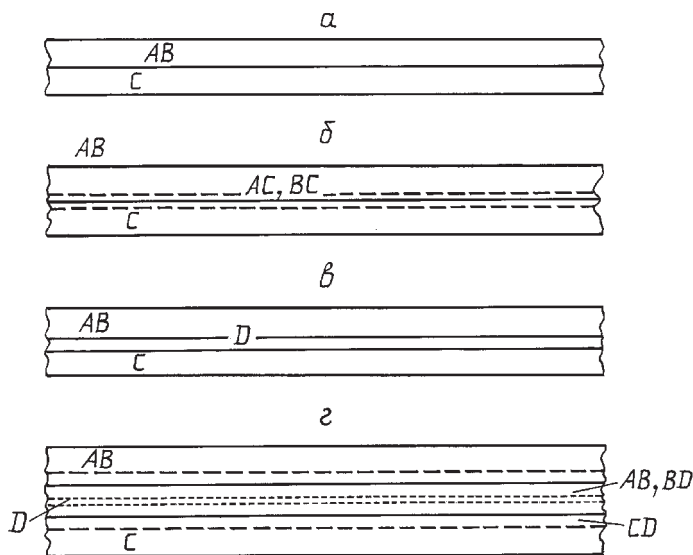


Рис. 1.4. Многослойные пленочные структуры без дополнительного барьера (*a*) и с термодинамическим барьером (*б*) до термообработки и после термообработки (*в*) и (*г*) соответственно

мых БИС в плане обеспечения экономически оправданного процента выхода годных кристаллов и высокой надежности.

Анализируя базовые технологические процессы формирования ТСМ, можно отметить следующее.

Большинство применяемых в серийном производстве технологических процессов формирования ТСМ можно отнести к двум методам: методу нанесения тонких пленок заданного состава и методу твердофазных реакций. Особую роль играют процессы селективного формирования пленок силицидов в составе многослойных ТСМ, из которых можно выделить метод химического осаждения из газовой фазы и метод твердофазных реакций. Несмотря на простоту маршрута последнего метода, он отличается критичностью к режимам проведения операции термообработки, в результате которой на межфазной границе кремний/металл происходит рост переходного слоя силицида. При низкой скорости роста силицида процесс нетехнологичен, а в случае повышенных температур термообработки падает воспроизводимость результатов.

Процессы, основанные на методах нанесения пленок проводящих материалов заданного состава, получили наибольшее распространение для изготовления основных токопроводящих и барьерных слоев. Значительно реже они используются для формирования контактных слоев, причем лишь в тех случаях, когда материал контактного слоя при взаимодействии с кремнием не образует химических соединений. Отмеченная особенность во многом связана с тем, что при формировании контактного слоя ТСМ путем нанесения проводящего материала на кремниевую подложку со вскрытыми окнами к активным областям свойства границы раздела контактный слой/кремний в большой степени определяются методами финишной обработки поверхности подложки и режимами процесса [7].

При нанесении основных токопроводящих слоев ТСМ из Al и его сплавов чаще других используются методы электронно-лучевого испарения и магнетронного распыления, возможности которых полностью определяются применяемым оборудованием. В процессах нанесения тонких пленок многокомпонентных материалов лучшие результаты дают методы магнетронного распыления в связи с тем, что при электронно-лучевом испарении, например, из двух источников воспроизводимость состава тонких пленок от процесса к процессу недостаточно высока.

Из методов магнетронного распыления наибольшие преимущества по производительности и качеству тонкопленочных покрытий имеет метод, в котором используется плоская мишень в системе планарного магнетрона с постоянными магнитами, что реализуется, например, в отечественных установках типа «Магна – 2М». Для нанесения на таком оборудовании тонких пленок многокомпонентных материалов требуются мишени, изготавливаемые из этих материалов методами порошковой металлургии либо путем размещения в зоне распыления секторов или иной формы вставок в основание мишеней, относительная площадь распыления которых позволяет получить заданный состав пленок.

Можно, разумеется, использовать и компактные материалы, выпускаемые промышленностью. Но не все из них удовлетворяют требованиям к чистоте по ряду примесей, кроме того, номенклатура изготавливаемых сплавов для нужд электронной промышленности значительно меньше существующей потребности, особенно применительно к новым разработкам изделий. Исключением служит выпускаемый в достаточном количестве сплав Al-Si (АК 1,5), используемый в технологии кремниевых БИС и дискретных приборов при

создании основных токопроводящих слоев при отсутствии барьерных слоев. Промышленное же изготовление сплавов для более узкого технологического применения, в особенности сплавов тугоплавких переходных металлов, вряд ли целесообразно ввиду необходимости продолжительных работ по определению оптимальных составов, разработки ТУ, согласованию и размещению заказов. При таком подходе не решается проблема изготовления опытных партий изделий с ТСМ из новых материалов. Кроме того, ряд сплавов, таких как псевдосплав Ti-W, принципиально сложно получить металлургическим путем из-за больших различий теплофизических свойств входящих в него компонентов.

Изготовление мишеней методами порошковой металлургии представляется более гибким средством опробования новых материалов ТСМ для непрерывно совершенствующихся изделий микроэлектроники. Однако имеются некоторые трудности при развитии этого направления. К числу основных из них относятся:

- низкая чистота получаемых заготовок;
- невысокая прочность и пластичность;
- существенная пористость и связанные с ней проблемы посадки распыляемых частей мишеней на вакуумноплотные водоохлаждаемые основания.

Для изготовления этим методом заготовок мишеней требуется создание специальных пресс-форм под посадочные размеры действующего распылительного оборудования, поскольку среди методов размерной обработки таких заготовок основными являются малопроизводительная электроискровая обработка и шлифование, применяемое обычно для доводки размеров и приводящее к загрязнению приповерхностного слоя. В процессе эксплуатации таких мишеней из-за неравномерности разогрева при распылении и невысоких механических свойств многокомпонентных материалов, например силицидов переходных металлов, мишени покрываются сетью трещин, и ресурс их эксплуатации снижается. Процесс «разгонки» подобных мишеней также зачастую имеет недостаточную воспроизводимость. Проблема увеличения ресурса наряду с повышением степени чистоты порошковых мишеней остается актуальной до настоящего времени.

При использовании для нанесения многокомпонентных пленок составных (секционированных, мозаичных) мишеней для магнетронного распыления также существуют проблемы ограниченного ресурса за счет различия теплофизических свойств материалов секций (ТКЛР, теплопроводность и др.) и обеспечения постоянства

состава пленок при длительной эксплуатации ввиду выработки мишени в зоне распыления. Для всех процессов формирования ТСМ, основанных на методах нанесения пленок, важной задачей является наиболее полное покрытие ступенек рельефа поверхности полупроводниковой структуры и, в частности, заполнение контактных окон в маскирующей пленке SiO_2 . Успешное решение этой задачи, актуальность которой особенно заметна для масштабируемых БИС с особо малыми топологическими размерами и большим числом уровней, позволит существенно повысить воспроизводимость технологического процесса и надежность БИС.

Одним из технологических методов, способствующих решению этой проблемы, является метод ХОГФ, отработанный в наибольшей степени для поликристаллического кремния и вольфрама и в меньшей степени для дисилицида вольфрама и других металлов. Такой метод, обеспечивающий селективность осаждения материала в контактных окнах, приводит к уменьшению высоты ступенек (рис. 1.5) [32].

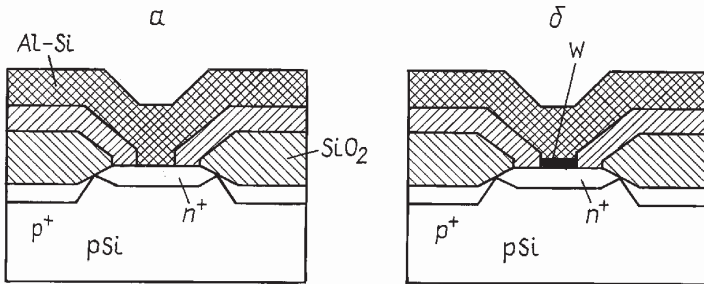


Рис. 1.5. Сечение контакта размером от $1,5 \times 1,5$ мкм до 3×3 мкм без барьерного слоя (а) и с барьерным слоем из W (б)

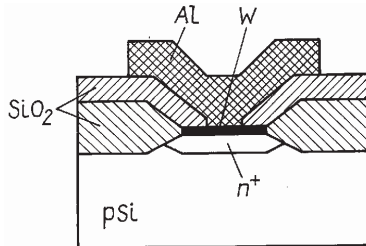


Рис. 1.6. Сечение «расширенного» контакта к мелкозалегающей ($h_j \sim 0,2$ мкм) n^+ -области в структуре СБИС

Процесс селективного нанесения W методом ХОГФ применим также и для создания самосовмещенных контактов к активным областям с мелкозалегающими р-п-переходами (рис. 1.6) [33]. В некоторых случаях эффект «расползания» растущей вольфрамовой пленки на периферийный оксидный слой можно использовать с целью экономии площади кристалла, занимаемой межэлементными соединениями, что поясняется рис. 1.7. При этом во время ионного травления пленки маскирующего оксида при вскрытии контактного окна пленка W служит стоп-слоем.

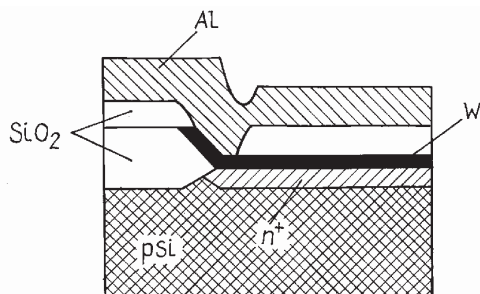


Рис. 1.7. Вариант «расширенного» контакта к мелкозалегающей области при использовании метода ХОГФ W

Другой технологический метод, обеспечивающий улучшенное заполнение контактных окон при нанесении проводящих пленок распылением, состоит в создании постоянного или ВЧ-смещения потенциала подложек относительно мишени. Его использование позволяет существенно повысить эксплуатационную надежность БИС [34, 35]. Такой процесс может проводиться по одному из следующих маршрутов:

- нанесение пленки Al или сплава Al-Si с последующей обработкой при наличии смещения;
- нанесение пленки при наличии смещения;
- нанесение пленки в два этапа, на первом из которых применяется обычное магнетронное распыление на постоянном токе, а на втором – распыление со смещением. Проведенное в [36] сравнение двух первых маршрутов показывает, что при одном и том же напряжении смещения степень планаризации контактных окон ($\gamma = 1 - d/d_0$, рис. 1.8) выше для процесса роста пленки в условиях действующего смещения.

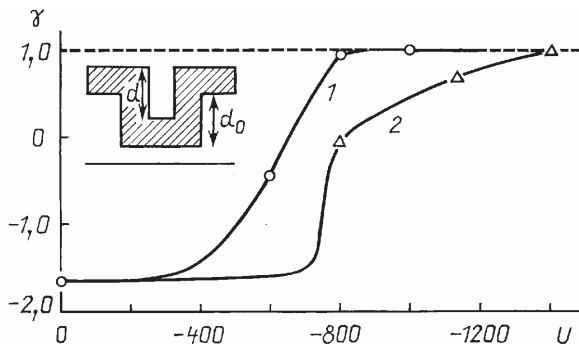


Рис. 1.8. Зависимость степени планаризации (γ) от напряжения смещения (U) для процессов нанесения Al пленки со смещением (1) и «обработка со смещением» нанесенной пленки (2)

Но и при обработке со смещением величиной 800 В сформированной пленки за время более 5 мин эффект планаризации достаточно выражен, а при смещении 1,2 кВ для Al пленок толщиной 1,5 мкм практически завершается за 5 мин. Третий вариант маршрута позволяет ослабить недостатки процесса, связанные с подтравливанием пленки в процессе нанесения со смещением, в результате чего наблюдаются загрязнение пленки, повышенное удельное сопротивление и шероховатость поверхности. В итоге можно получить пленки Al с удельным сопротивлением ~ 3 мкОм·см и коэффициентом отражения 75% при толщине слоя Al, получаемого на первой стадии, $\sim 0,2$ мкм. Следует иметь в виду, что регулированием величины смещения можно добиться наиболее желательной величины коэффициента отражения для процесса автоматизированной разварки микропроволочных выводов. В противном случае (при высокой степени «зеркальности» алюминиевой пленки) системы технического зрения сборочных автоматов оказываются бессильными для обнаружения на поверхности кристалла позиций контактных площадок.

Кроме постоянного смещения, положительные результаты получены при использовании НЧ- и ВЧ-источников, например на частотах 380 кГц и 13,5 МГц [37]. В этом случае на пластинах также в конечном счете наводится отрицательный потенциал смещения, величина которого саморегулируется и определяется параметрами рабочей камеры и согласующего устройства. Характерная мощность ВЧ-энергии составляет ~ 500 Вт, а удельная мощность — 1 Вт/см².

Далее, в главе 3, описаны методы формирования планарных элементов ТСМ, которые в значительной мере позволяют устранить отмеченные в данной главе недостатки, присущие ТСМ, получаемым по известным методам, и приведены результаты исследований их важнейших свойств.

1.2. Тонкопленочные покрытия на основе благородных металлов, никеля и бинарных сплавов

Качество непланарных тонкопленочных покрытий чипов (кристаллов) стало в настоящее время одним из ключевых факторов, определяющих воспроизводимость технологического процесса их посадки на основание корпуса или выводную рамку и величину теплового сопротивления, которые для современных БИС имеют чрезвычайно важное значение.

Значимость работ в направлении создания высококачественных тонкопленочных покрытий на непланарной стороне кремниевого кристалла, обеспечивающих в процессе сборки формирование надежного твердотельного соединения кристалла с элементами корпуса, имеющего минимальное переходное электрическое и тепловое сопротивление, обусловлена тем, что существующие технологии, основанные на использовании эвтектического сплава золото–кремний, обладают невысокой воспроизводимостью и не удовлетворяют возросшим требованиям к параметрам современных БИС. В частности, для приоритетных по маркетинговому прогнозу БИС новых поколений известные ранее методы формирования эвтектического соединения не обеспечивают однородности по площади и толщине спая, требуемой механической прочности и электрического сопротивления.

Исследования по металлизации на основе золота, серебра, меди и их сплавов на протяжении длительного периода являлись предметом для широкого круга ученых и специалистов, занимающихся проблемами тонкопленочной технологии для большинства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на основе кремния. К концу 80-х годов сложилось два основных направления формирования высококачественных соединений кристалла кремния с основанием корпуса в приборах силовой электроники: с использованием твердых припоев (на основе серебра) и эвтектического сплава золото–кремний. При этом последний вариант посадки остается

предпочтительным для приборов космического назначения, а также в случаях поставки кристаллов за рубеж, где получатель своими силами монтирует приборы в дискретные корпуса, или в составе микроборков.

Кроме того, на ряде международных конференций сделано множество докладов, посвященных исследованиям пленок на основе золота, серебра и меди, которые в большей степени удовлетворяют новым требованиям к пленочным покрытиям непланарной стороны кристаллов кремниевых БИС. Начиная с 1997 г. значительное число статей в данном направлении тонкопленочной технологии появилось в журнале IEEE Transaction on Components, Packaging and Manufacturing Technology. То есть лишь в настоящее время за рубежом наметилась тенденция активного исследования металлизации с непланарной стороны кремниевого кристалла, хотя совершенствованием металлизации с планарной стороны кристалла ученые и практики занимаются уже на протяжении двух десятков лет [1].

Одним из важнейших видов функциональных тонкопленочных покрытий непланарной стороны Si-кристаллов являются покрытия на основе золота. Они обеспечивают высокую коррозионную стойкость деталей в агрессивных средах, их электрическую проводимость и ее постоянство во время эксплуатации, сопротивление механическому и эрозионному износу, а также значительно упрощают технологические процессы микромонтажа посредством сварки проволочных выводов и пайки легкоплавкими припоями.

Однако высокая стоимость золотого покрытия, его дефицитность и снижение надежности контактных соединений в процессе эксплуатации требуют разработки новых, более экономичных покрытий с улучшенными техническими характеристиками. Ухудшение физико-механических свойств и надежности соединений, выполненных сваркой по золотому покрытию, связано с диффузионной и коррозионной деградацией контакта. Диффузионная деградация в системе Au-Al заключается в образовании интерметаллидов и в результате встречной диффузии алюминия и золота. Образовавшиеся при этом фазы имеют высокое электрическое сопротивление и низкую механическую прочность соединения, делают его хрупким. Это связано с появлением на границе фаз трещин и пустот из-за значительной разницы в ТКЛР и различной скорости взаимной диффузии металлов. Существенное ускорение процесса диффузионной деградации наблюдается с увеличением температуры выше 300 °С при термовыдержке или последующей технологической обработке [38].