

ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ КВАЗИМОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ИСКУССТВЕННОЙ ЭПИТАКСИИ

А.Н. Осипов

Самарский государственный аэрокосмический университет,
г. Самара

Один из возможных источников отказов интегральных микросхем (ИМС) - отказы межсоединений или металлизации. В отличие от электронных схем на дискретных элементах в ИМС токоведущие проводники вносят и надежность свой вклад как равноправные пассивные элементы. С повышением степени интеграции изделий микроэлектроники уменьшаются геометрические размеры активных и пассивных элементов ИМС. Миниатюризация полупроводниковых приборов и ИМС достигли такого уровня, при котором технические параметры конструктивных элементов зависят от геометрических размеров.

Известно, что внешнее электрическое поле в электропроводящих твердых телах вызывает не только движение электронов, но и перемещение их собственных и примесных ионов. Перемещение ионов под действием электрического тока большой плотности приводит к переносу массы, это явление называют электропереносом или электродиффузией. В связи с миниатюризацией электронных устройств, в частности при создании мощных полупроводниковых приборов и больших интегральных микросхем с повышенной степенью интеграции, электродиффузия в тонкопленочных проводниках проявила себя как одна из важнейших причин их отказа. Активация электродиффузии происходит в основном за счет сильного разогрева пленочной металлизации в местах локальных дефектов. Современное развитие микроэлектроники приводит к необходимости формирования проводящих элементов, работающих с плотностями тока свыше $5 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2$. При этом время наработки на отказ обычных поликристаллических однослойных пленочных систем составит считанные часы. Следовательно, возникает задача найти способ увеличения времени наработки на отказ систем проводящей металлизации ИМС при работе с плотностями токов порядка $1 \cdot 10^7 \text{ А/см}^2$ и выше. Эта задача тем более актуальна, что с возрастанием степени интеграции доля отказов, падающих на межсоединения в ИМС, несмотря на существующие методы пассивации электродиффузионной деградации, неуклонно возрастает. Поэтому так актуальна проблема производства ИМС с более совершенной структурой тонкопленочных проводников.

Анализ имеющихся путей решения поставленной задачи

Электродиффузионная деградация пленочных металлических проводников, выражается в виде образования пустот и полостей с последующим формированием трещины и обрывом на одном полюсе проводника, для рассматриваемой группы металлов это отрицательный электрод, и формирования "бугров" и "усов" на другом. При этом доказано, что для поликристаллических пленочных проводников формирование таких макродефектов происходит на основе дефектов структуры пленки так называемых тройных точек, местах слияния трех и более границ зерен.

Известно три основных пути замедления процесса электродиффузионного разрушения проводника. Первый - это уменьшение количества дефектов структуры, называемых границами зерен и являющихся ускоренным путем электропереноса. Как правило, это достигается путем увеличения размеров зерна пленки. Таким образом, возможно увеличение среднестатистического времени до отказа (t_M) поликристаллической пленки при прочих равных условиях в 4-5 раз. Однако существует предельное значение величины размера зерна в зависимости от толщины пленки. Увеличение толщины ведет к возрастанию удельной доли отказов по другим причинам.

Второй - это нанесение на поверхность металлизации защитных диэлектрических покрытий типа SiO_2 , разного рода стекол и так далее. При этом достигается увеличение t_M для различных материалов более чем на порядок. Так для остеклованных проводников из Al t_M увеличивается, при прочих равных условиях в 10 раз. Механизм этого явления пока полностью не изучен, но сделано предположение о двух вероятных причинах: это снижение электродиффузии по поверхности за счет усиления степени "связанности" атомов поверхностного слоя и чисто механическое давление на объем проводника.

Третий метод считается наиболее действенным и общепризнанным, он заключается в применении в качестве материала пленочных проводников ИМС не чистых металлов, а сплавов различного рода. Так для алюминиевых проводников, срок службы увеличивается на 2-3 порядка, при прочих равных условиях, если к Al добавить 4% Cu, 1% Ni, 2% Mg. Известны также положительные результаты при использовании композитов Al и Si и других. Метод представляет известный интерес. Однако эмпиричность получения подобных сплавов, отсутствие глубокой теоретической базы для объяснения эффекта замедления электродиффузии, а также тот факт, что даже одна и та же примесь в разных количествах может, как замедлять, так и ускорять процесс массопереноса, делает его не технологичным и бесперспективным. Можно предположить, что эффект замедления достигается путем занятия атомами примеси дефектов структуры поликристаллической пленки, особенно тройных точек и границ зерен, а выбор материала и его количество зависит от геометрических размеров и количества этих дефектов.

Развивая метод увеличения размеров зерен и уменьшения количества ускоренных путей электродиффузии, типа границ зерен, можно предложить еще один путь - это переход к монокристаллической коммутационной системе интегральных схем. При этом полностью исключается доминирующий в эксплуатационной зоне температур путь, что значительно увеличивает срок службы и t_m пленочной металлизации ИМС.

Наиболее перспективным представляется совершенствование кристаллической структуры проводников, т.е. получение квазимонокристаллических пленок.

Квазимонокристаллические пленки можно получить с помощью эпитаксиальных процессов. Эпитаксия - это наращивание тонкой пленки на ориентирующей подложке. Эпитаксия заключается в том, что формирующаяся тонкая пленка попадает под ориентирующее воздействие монокристаллической подложки. Эпитаксия имеет две разновидности. Автэпитаксия, представляющая собой ориентированное наращивание материала пленки на подложку из того же материала и гетероэпитаксия, наращивание пленки на подложке другого материала.

Энергетические параметры поверхностей раздела пленки и подложки определяют возможность ориентационных изменений при росте пленки преимущественные конечные ориентации. В то же время для прогнозирования ожидаемых ориентаций в большинстве случаев нет данных о значениях энергии поверхностей раздела, особенно межфазных границ подложка-пленка, поэтому ранее на основе наблюдаемых экспериментально общих закономерностей ориентированной кристаллизации предлагали кристаллогеометрические критерии для предсказания взаимных ориентировок решеток сопрягающихся фаз.

Для объяснения наблюдаемых и прогнозирования возможных ориентационных соотношений наиболее часто используются 2 теории: теория псевдоморфного роста и теория решетки совпадающих узлов (PCY).

Теория псевдоморфного роста заключается в том, что на первых стадиях роста пленки на подложке происходит аномальное изменение периода кристаллической решетки пленки, приводящее его в полное соответствие периоду решетки подложки. Явление обусловлено тем, что для рассматриваемых систем атомы осадка связаны с глубокими центрами адсорбции, соответствующими минимумам периодически изменяющейся потенциальной энергии взаимодействия на межфазной границе. При этом межфазное взаимодействие сильнее, чем взаимодействие между атомами осадка. Тонкая пленка в этом случае находится в состоянии однородной плоской деформации. Псевдоморфная структура имеет место в слое толщиной не более 10 параметров кристаллической решетки.

Теория PCY позволяет предсказывать ориентации совпадения при совмещении плоских решеток одной ориентации. Для построения PCY на межфазной границе необходимы две параллельно ориентированные плоские

решётки одной симметрии, различающиеся только параметрами. В общий для решёток узел помещают начало координат и выбирают в каждой решётке атомы, находящиеся от него на одинаковых расстояниях $\sqrt{\Sigma_1 a_1} = \sqrt{\Sigma_2 a_2}$. Получают углы между осью координат и направлением на эти атомы Θ_1 и Θ_2 . При взаимном повороте решёток на угол $\theta_k = \varphi_1 \pm \varphi_2$ получим РСУ с параметрами Σ_1 и Σ_2 , характеризующими обратную долю совпадающих узлов в каждой решётке. В реальных системах отношение решёточных параметров является в основном иррациональным и "идеальным" РСУ будет характеризоваться $\Sigma \rightarrow \infty$. В этом случае теряется смысл применения концепции РСУ. Поэтому выбирают ячейки РСУ отвечающие приближительному совпадению. Таким образом, межфазная граница совпадения будет характеризоваться, помимо параметра Σ , еще несоответствием параметров РСУ, равным упругой деформации, необходимой для достижения точного совпадения.

Задавая отношения Σ_2/Σ_1 , можно получить углы, отвечающие ориентациям совпадения, и отношения параметров $\alpha = a_1/a_2 = \sqrt{\Sigma_1/\Sigma_2}$, при которых эти ориентации возможны.

Известно 2 механизма роста эпитаксиальных тонких плёнок: механизм монослойного роста и механизм островкового роста.

Для механизма монослойного роста (Франка и Ван дер Мерве) характерно возникновение на поверхности кристаллической подложки соответствия параметров кристаллических решёток плёнки и подложки. При дальнейшем росте происходит релаксация упругой деформации путём сдвигания на межфазную границу дислокаций, компенсирующих несоответствие параметров сопрягающихся решёток и поэтому называемых дислокациями несоответствия.

Осуществлению этого механизма препятствует то, что из-за больших рассогласований параметров решёток (при гетероэпитаксии) дислокации несоответствия не могут скомпенсировать возникающие напряжения, и поэтому плёнка распадается на отдельные островки. Дальнейший рост происходит по островковому механизму. Коалесцентный распад уже сплошной плёнки может произойти при неравномерности толщин плёнки, которые, в свою очередь, могут возникнуть из-за различия степени адгезии плёнки с подложкой.

Механизм островкового роста (Крастанова-Странского) предполагает шумерное зарождение плёнки с образованием трёхмерных островков при последующем росте. В процессе роста островки увеличиваются в размерах, коалесцируют, сливаются в сплошную плёнку. Этот механизм является основным для роста большинства металлических плёнок.

Существуют естественные эпитаксиальные процессы (собственно эпитаксия) и процессы, использующие искусственную эпитаксию. Эпитаксия может протекать как со средой носителем, так и без неё.

Эпитаксия со средой носителем может, в свою очередь, происходить со вступлением вещества носителя в химическую реакцию с подложкой, с выделением на ней нужного реагента и без вступления в химическую реакцию.

В хемоэпитаксии для формирования плёнки необходимо обеспечить протекание определённых химических реакций. К ней относится, например, химическое осаждение, ионное осаждение, газовое анодирование. Существенным недостатком данных методов и хемоэпитаксии в целом является наличие в области протекания процесса осаждения большого количества продуктов реакции, что влияет на чистоту получаемой плёнки и на её связь с подложкой. В результате существенно ухудшается ориентирующее воздействие подложки. Ещё одним недостатком является требование высокой температуры процесса, что не даёт подвергнуть этому процессу уже структурированную подложку. Также хемоэпитаксия позволяет выращивать плёнки не всех металлов.

Ещё один вид эпитаксии со средой носителем, но без осуществления химической реакции делится на ионное распыление и на жидкофазную эпитаксию. К достоинствам ионного распыления можно отнести то, что оно позволяет осаждать многокомпонентные системы и термостойкие материалы; обеспечивает хорошую адгезию и однородность плёнки по толщине на большой площади; весь процесс происходит при относительно низких температурах. Недостатком является низкая скорость осаждения и иногда (при повышении скоростей) необходимость охлаждать подложку. Так как процесс ионного распыления не может проходить в вакууме, то необходима какая-либо атмосфера (в большинстве случаев используется атмосфера инертных газов), что сильно сказывается на чистоте плёнки.

Главное достоинство жидкофазной эпитаксии - это возможность получения качественных плёнок путем простой отработанной технологии, так как эпитаксиальный процесс происходит при температуре ниже $T_{пл}$, то количество дефектов незначительно. Однако ЖФЭ не может быть использована для гетероэпитаксии металлов поскольку:

- материалы, применяемые в растворе-расплаве должны быть изовалентны, иначе не исключено легирование, образование сплавов;
- требуется тщательная очистка поверхности диэлектрика, в том числе от значительной степени газовых конденсатов;
- ЖФЭ не может происходить при рассогласовании решеток более чем на 2%.

Можно считать доказанным, что процессы аналогичные описанным не обладают необходимой степенью чистоты для формирования

высококачественных квазиоднокристаллических тонких металлических пленок.

Вторая группа эпитаксиальных процессов - без среды носителя, то есть вакуумные, представляются наиболее подходящими для формирования квазиоднокристаллических пленок. Из литературы известно, что металлические однокристаллические пленки были получены, как правило, в условиях высокого и сверх высокого вакуума при сильно перегретых подложках и низких скоростях осаждения. Все эти требования выполняются при так называемой молекулярно-пучковой или молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Она представляет собой разновидность вакуумных эпитаксиальных процессов и используется в настоящее время для получения наиболее совершенных тонких многослойных полупроводниковых структур. Процесс МЛЭ протекает при относительно низкой температуре подложки, в условиях вакуума, что позволяет получать чистые пленки, а также использовать эту, уже структурированную систему, в качестве подложки для напыления последующих слоев. Недостатком является необходимость в течение всего процесса поддерживать высокий вакуум.

Существует и так называемый метод искусственной эпитаксии. Он в целом не является альтернативой эпитаксии, а скорее является процессом её дополняющим. Данный метод позволяет выращивать квазиоднокристаллические пленки на подложках практически любой структуры и уменьшить требования к параметрам техпроцесса. В общем, искусственную эпитаксию можно разделить на 2 класса: с созданием ориентирующего рельефа и без него.

Ориентирующий рельеф можно разделить на потенциальный и топографический, выделив в отдельный вид боковую эпитаксию. Топографический рельеф можно создать следующими способами: механическим царапаньем и фотолитографией. Потенциальный рельеф может быть создан несколькими способами. Может быть создан термический рельеф, нагревом лазером или полосковым нагревателем. Терморельеф в отличие от топографического действует только в динамической системе, т.е. в сочетании с движением расплавленной зоны.

В рамках методов создания ориентирующего рельефа можно выделить боковую эпитаксию. К ней относят жидкофазную, твердофазную и парофазную кристаллизации. Недостатком жидкофазной является высокая температура процесса. Твердофазная протекает при температурах от комнатной до 200°C , и эпитаксиальный процесс идет очень медленно. Возникает опасность спонтанного, неориентированного зарождения кристаллитов в исходной аморфной фазе вдали от затравочного отверстия. Упорядоченному росту также препятствует пористость аморфных пленок, полученных осаждением при комнатной температуре, что чревато их окислением. Парофазная позволяет строго управлять ориентацией растущей

плёнки, но такая плёнка, как правило, имеет островковый характер. Кроме того, в варианте с кристаллизацией из пара иногда требуется проводить дополнительные операции по сглаживанию неровностей.

В искусственной эпитаксии без ориентирующего рельефа можно выделить зонную плавку (точнее горизонтальную зонную плавку для выращивания тонких плёнок). Ее недостатком является высокая температура процесса.

Таким образом, наиболее дешёвыми и освоенными методами из рассмотренных являются жидкофазная и газофазная эпитаксии, но они не позволяют получать плёнки высокого качества. Наибольшего качества позволяет добиться МЛЭ, но это дорогостоящий технологический процесс, что связано с созданием и поддержанием высокого вакуума в камере, где происходит напыление. Удешевить технологию позволяет применение совместно с эпитаксией элементов искусственной эпитаксии. Наиболее дешёвым и простым в осуществлении является создание топографического рельефа, но этот метод груб и не даёт однозначного результата. Потенциальный рельеф максимально приближен к реальным параметрам кристаллической решётки, поэтому позволяет добиваться лучших ориентационных эффектов, но его трудно совместить с вакуумными процессами, так как необходимо управление извне. А это, в свою очередь, усложняет конструкцию установки в целом. Зонная плавка может применяться совместно практически с любым методом. Она позволяет очистить уже готовую плёнку от возникших в процессе её формирования дефектов. Этот метод достаточно прост и дешёв и обеспечивает получение плёнок высокого качества.

Выбор элементов типовых технологических процессов

При решении задачи был предложен технологический процесс формирования металлических токопроводящих плёночных систем ИМС, использующий методы искусственной эпитаксии.

При осуществлении эпитаксиального наращивания слоев материала пленки на подложку того же или другого материала важным фактором, как уже говорилось, является ориентирующее воздействие монокристаллической подложки. Для его осуществления в простейшем случае, требуется условие соответствия параметров и формы кристаллической решетки подложки и пленки. Оно означает, что материалы подложки и пленки должны иметь либо одинаковый вид элементарной ячейки кристаллической решетки вещества с близкими значениями параметра решетки, либо соответствие по принципу решетки совпадающих узлов. Это условие не является безусловно необходимым и достаточным, поскольку существуют данные, подтверждающие возможность эпитаксиального наращивания для пар

материалов, не подчиняющихся этим условиям. Однако, для нашего конкретного случая примем его в качестве критерия выбора материала.

В качестве материала пленочного проводника необходимо использовать высокопроводящие металлы типа Al и Cu. Эти металлы относительно дешёвы, обладают самым низким удельным сопротивлением (кроме Ag) и имеют гранецентрированную кубическую (ГЦК) структуру кристаллической решетки. В качестве подложек для интересующей нас группы металлов использовались в основном сколы монокристаллов щелочных солей, имеющих ГЦК структуру кристаллической решетки, слюда и монокристаллы других металлов. Исследования проводились в группе благородных металлов, реже сплавов. Несмотря на важность алюминия как материала микроэлектроники, работ по его эпитаксиальному выращиванию мало. Известны работы по эпитаксии Al на NaCl, KCl, Si, MgO и AlAs. Рост металлов происходит, как правило, в условиях сильного перегрева подложек, но возможен, при определенных условиях, и при почти комнатной температуре.

В классических эпитаксиальных процессах применяемые для формирования металлизации ИМС материалы подложек должны подчиняться строго заданным ограничениям. Это должны быть монокристаллические диэлектрики или чистые полупроводники с высоким удельным сопротивлением, близкой по решетке узлов поверхностью, с наличием свободных связей ориентированных соответственно ориентации связей в металлах ГЦК структуры, имеющие необходимые технологические параметры для возможности использования их в виде подложек ИМС. Возможно использование монокристаллических полупроводниковых материалов типа Si, Ge, GaAs, SeS, ZnS и других, имеющих кубическую алмазоподобную или ГЦК структуру. Также интерес представляет использование материалов типа MgO [1], и некоторых видов титанатов, например титаната стронция SrTiO₃.

Размерное несоответствие f_i между материалами подложки и пленки можно оценить по формуле:

$$f_i = \frac{a_i^{(2)} - a_i^{(1)}}{a_i}, \quad a_i = \frac{a_i^{(1)} + a_i^{(2)}}{2}, \quad (1)$$

где $a_i^{(1)}$, $a_i^{(2)}$ - параметры решеток соответственно подложки и пленки.

Эта формула позволяет достаточно строго определить соответствие материалов при сопряжении их в одинаковых плоскостях ориентации, если они имеют один тип кристаллической решетки [9].

Произведем расчет размерного рассогласования для некоторых из рассмотренных выше материалов, наиболее подходящих для поставленной задачи, а результаты сведем в табл. 1.

В табл. 1 мы определили значения f_i для наиболее близких по параметрам решеток к металлам материалов, используемых

промышленностью. Из нее видно, что рассматриваемые вещества можно расположить в порядке убывания предпочтительности: LiF , SrTiO_3 , MgO , SiC , Si , CaF_2 и Ge . Известен факт эпитаксиального роста пленки Pd на CaF_2 , где $f_1 = 33,81\%$ [10], что говорит о возможности практического применения любого из рассмотренных в табл. 1 материалов.

Таблица 1

Подложка $a=[A]$ Металл	MgO 4,2130	CaF_2 5,4620	LiF 4,0279	SrTiO_2 3,8990	SiC 4,3596	Si 5,4297	Ge 5,6570
Al 4,0497	4,00	29,70	-0,54	-3,80	7,37	29,12	33,81
Cu 3,6074	15,48	40,90	11,01	7,77	18,88	40,33	44,10

* значения f_1 приведены в %; знак "-" означает, что $a_1^{(2)} < a_1^{(1)}$

Как видно из табл. 1 с точки зрения размерного соответствия наиболее хорош LiF , но он слабо растворим в воде и имеет температуру плавления близкую к возможным температурным режимам роста, поэтому условие наименьшего размерного несоответствия решеток является необходимым, но не достаточным. Имеется большое число работ, где говорится о получении ориентированных эпитаксиальных пленок металлов, и в частности алюминия, на самых разных материалах, чаще всего полупроводниках с ГЦК решеткой, обладающих некоторым сродством к материалу пленки. В частности, известен факт роста пленки алюминия на подложке арсенида галлия.

Одной из задач нашей работы является получение качественной металлизации на подложках любого типа. Таким образом, рассмотрев свойства материалов, выбираем в качестве материала тонкой пленки Al , как наиболее распространенный и технологичный металл проводящей системы микросхем, а в качестве материала подложки на первом шаге, для отработки основных этапов технологического процесса возьмем ситалл или поликор, так как они легко доступны.

На первом этапе мы стремимся получить крупноблочную ориентированную пленку, размеры ориентированных кристаллитов в которой должны быть больше поперечных размеров пленочного проводника. Это необходимо для того, чтобы исключить возможность возникновения ускоренных путей массопереноса, которыми в поликристаллической металлизации являются границы зерен, параллельные «электронному ветру». Кроме того, преимущественная ориентация отдельных кристаллитов позволит изменить физические параметры тех границ зерен, которые сохраняются в сформированном проводнике.

В технологическом процессе важную роль играет температура подложки. Эпитаксиальный рост металлов происходит, как правило, в условиях сильного перегрева подложек, но возможен и при почти комнатной температуре. Требуемая температура подложки зависит от многих факторов, в том числе от степени вакуума, чистоты подложки и скорости роста. Все перечисленные параметры также оказывают принципиальное воздействие на формирование квазимонокристаллической пленки. Скорость роста должна лежать в пределах $1-10 \text{ \AA}/\text{с}$ (что соответствует примерно $1 \text{ ML}/\text{с}$), а степень вакуума обычно не ниже 10^{-6} мм.рт.ст. при указанных скоростях роста, если рассматривать вакуумные эпитаксиальные процессы. Для реализации нашего процесса будет достаточно, если давление остаточной атмосферы в камере будет поддерживаться на уровне 10^{-1} Па. Температура подложки не превысит 300°C . Скорость осаждения должна уменьшаться в процессе и составить примерно $10 \text{ ML}/\text{с}$ на конечном этапе формирования металлической пленки. При предварительной стимуляции на подложке центров зарождения, например электронной бомбардировкой, такие условия приведут к требуемому результату.

Любой технологический процесс в современной микроэлектронике, начинается с подготовки максимально чистой и гладкой (в идеале — атомарно-чистой и атомарно-гладкой) поверхности. Поверхность называется атомарно-чистой, если концентрация посторонних атомов на ней ниже предела чувствительности используемого метода химического анализа, и атомарно-гладкой, если характерный масштаб неровностей составляет один атомный диаметр. Однако вопрос о чистоте подложки также не до конца теоретически обоснован. Ряд исследований показал, что на подложках потенциально более грязных (например, сколы на воздухе) имеет место облегченный вариант формирования эпитаксиального слоя и с лучшими параметрами, что теоретически обосновывалось возможностью формирования большого числа центров зарождения. Позже, однако, это утверждение также было признано не необходимым при условии варьирования определенным образом скоростей осаждения в процессе роста.

В нашем случае применяется стандартная подготовка электрической подложки для напыления металла, состоящая из нескольких шагов. Мытье подложки синтетическими моющими средствами, промывка очищенной водой и кипячение в толуоле с последующим длительным ожигом в вакууме. Это позволит добиться требуемой чистоты подложки. Активация центров зарождения производится с помощью электронной бомбардировки подложки.

В качестве испарителя используется электронная пушка. Выбор испарителя с электронной бомбардировкой определило то, что данный метод нагрева позволяет уменьшить взаимодействие между испаряемым

веществом и материалом испарителя, что наряду с возможностью плавной регулировки скоростей испарения делает его наиболее привлекательным для реализации эпитаксиальных процессов.

Возможно, в дальнейшем, получение пленок и более высокого качества. Чего можно добиться применением на заключительном этапе формирования пленочной структуры метода зонной перекристаллизации. В данном случае следует ожидать коалесценции отдельных кристаллитов с близкой ориентацией, что приведет к получению пленки с электрофизическими параметрами близкими к квазиоднокристаллическим пленочным материалам.

Идеальный метод анализа поверхностей твердых тел должен удовлетворять следующим требованиям:

- глубина анализа – один монослой;
- идентификация химических элементов;
- идентификация изотопов;
- идентификация химических соединений;
- высокая чувствительность;
- высокая разрешающая способность;
- одинаковая чувствительность ко всем изучаемым элементам;
- универсальное использование метода для поверхностей различных типов;
- отсутствие возмущений структуры и состава поверхности при анализе;

Не существует метода, который отвечал бы всем перечисленным требованиям. Основной метод исследования атомной структуры поверхности и субмонослойных пленок – дифракция медленных электронов, но в последние годы широко внедряется дифракция быстрых электронов на отражение, проводятся исследования методом высокоразрешающей электронной микроскопии. К наиболее удовлетворительным методам элементного и химического анализа поверхности можно было бы отнести масс-спектроскопию вторичной ионной эмиссии, оже-электронную спектроскопию и спектроскопию электронов. Физическими процессами возбуждения, используемыми при анализе поверхностей, служат: облучение образца фотонами; электронная бомбардировка; бомбардировка ионами, бомбардировка нейтральными частицами; наложение электрического поля, подведение тепловой энергии. Носителями информации о поверхностях твердого тела при ее анализе являются фотоны, электроны, ионы, нейтральные частицы.

Разработано несколько десятков экспериментальных методов исследования атомной структуры и анализа химического состава поверхностей тонких пленок.

Поскольку однозначная интерпретация результатов, получаемых дифракционными методами, часто затруднена, они должны быть дополнены

количественными исследованиями элементного состава (например, электронная Оже-спектроскопия и вторичная ионная масс-спектрометрия и др.). Некоторые методы (например, спектроскопия ионного рассеяния) позволяют косвенно получить информацию о структуре поверхностных слоев, в частности о расположении в них соответствующих атомов.

Сравнение наиболее важных особенностей некоторых методов элементного и химического анализа поверхностей дано в табл. 2.

Таблица 2. Анализ методов контроля структуры пленки

Характеристика	Оже-электронная спектроскопия	Фотоэлектронная спектроскопия	Масс-спектрометрия вторичной эмиссии
Анализируемая глубина, нм (монослой)	0,7 – 2 (2 – 5)	2 – 5 (5 – 15)	- (1)
Определение элементов	Возможно, кроме H и He	Возможно, кроме H	Возможно
Определение изотопов	Невозможно	Невозможно	Возможно
Определение соединений	Частичное (химический сдвиг)	Возможно (химический сдвиг)	Возможно (масс анализ)
Чувствительность метода (наименьшее определяемое число монослоев)	10^{-3}	10^{-2}	10^{-6}
Наибольшее отношение чувствительности для разных элементов	10	10	10^4

Анализ приведенных выше данных показывает, что водород можно определить только масс-спектрометрическим методом; то же справедливо и в отношении изотопного анализа. В отличие от методов электронной спектроскопии, исследование вторичной ионной эмиссии является разрушающим методом, даже при статическом режиме, при котором скорость распыления очень мала. Чувствительность метода вторичной ионной эмиссии различна по отношению к разным элементам. Важным преимуществом этого метода является получение информации только в самом верхнем монослое поверхности.

В тех случаях, когда качестве подложки применяют тонкую пленку или когда подложка может быть утонена после наращивания пленки до толщины, достаточной для получения дифракционной картины от двухслойного образца на просвет, дифракция электронов служит эффективным методом контроля характера сопряжения на межфазной границе (когерентное, полукogerентное – с помощью дислокаций несоответствия, некогерентное).

Эффект дифракции электронов на решетках дислокаций позволяет, не прибегая к высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии, контролировать дислокационное сопряжение границ при относительно большом несоответствии параметров решеток, когда прямое наблюдение дислокаций затруднено.

Мы остановились на рентгеноструктурном анализе пленок и электронной микроскопии, как наиболее доступных в лабораторных условиях и обеспечивающих достаточное качество поучаемой информации.

В рамках данной работы было разработано устройство автоматизированного контроля электродиффузионной надежности тонкопленочной металлизации интегральных микросхем. Оно позволяет определять профиль распределения температуры вдоль тонкопленочного проводника металлизации интегральных микросхем, что позволяет построить математическую модель электродиффузионной деградации, являющейся причиной отказов сильноточной металлизации.

Работа устройства происходит следующим образом. На предметном столе располагается подложка с нанесенным на нее исследуемым образцом тонкопленочного проводника, через который пропускается ток высокой плотности (порядка 10^6 А/см^2), тем самым стимулируется процесс электродиффузии и происходит нагрев проводника в местах локальных дефектов. С помощью измерительной головки, передвигающейся вдоль проводника, определяется градиент температуры. В качестве измерительного элемента используется терморезистор, изолированный от внешних воздействий фторопластовым корпусом головки. Информация с измерительной головки в виде разности потенциалов поступает в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а затем на последовательный порт ЭВМ, для дальнейшей обработки с помощью разработанной программы, которая графически иллюстрирует распределение теплоты вдоль проводника.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДНК ПРОВОДНИКОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПАСТ

А.М. Баталова

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Для достижения высокой надёжности гибридных толстопленочных микросхем и микросборок необходим постоянный контроль исходных материалов и физико-химических процессов, протекающих на различных этапах технологического процесса.

Качество исходных композиционных материалов определяет воспроизводимость параметров элементов схемы. Поскольку электрофизические параметры пленочных элементов определяют