

Применение вакуумно-плазменных технологий в электронике

Владимир Белецкий, Валерий Киреев, Сергей Князев, Данил Челапкин (Москва)

В статье приведена классификация процессов получения тонкоплёночных слоёв, систем и покрытий, перечислены области применения и технологические характеристики процессов физического осаждения из газовой фазы функциональных плёночных слоёв. Рассмотрена эволюция параметров структур после проведения операций ФОГФ, и проведён анализ состава и параметров оборудования для реализации процессов.

ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЁВ И ПОКРЫТИЙ ФИЗИЧЕСКИМ И РЕАКТИВНЫМ ФИЗИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Получение высококачественных тонкоплёночных слоёв и покрытий из металлов, сплавов, диэлектриков и полупроводников является актуальной задачей технологии изготовления различных элементов и устройств современной электроники, оптики и точной механики. Например, в технологических процессах производства интегральных микросхем (ИМС) с субнанометровыми топологическими нормами, состоящих из 500 – 700 операций, от 30 до 60% приходится на операции, связанные с получением тонкоплёночных слоёв систем изоляции и металлизации [1]. В зеркалах отражательной оптики для систем литографии на экстремальном ультрафиолете (ЭУФ) с длиной волны 13,5 нм используются наборы из 30 – 60 пар бинарных слоёв Mo/Si толщиной соответственно 2,8 и 4,1 нм и атомарной поверхностной гладкостью [2].

Классификация процессов получения тонкоплёночных функциональных слоёв, систем и покрытий

Термин «получение» плёнок и покрытий носит в микроэлектронике самый общий характер и нуждается в уточнении, поскольку включает в себя процессы нанесения, осаждения, выращивания и формирования функциональных слоёв на поверхности подложек.

Термин «нанесение» обычно характеризует процессы получения слоёв (плё-

нок) из растворов методом центрифугирования или душирования. К таким процессам относятся нанесение резистивных покрытий (плёнок фото-, электро-, рентгено- и ионорезистов), планирующих и антиотражающих органических слоёв (плёнок полиимида и антиотражающих покрытий (anti-reflective coating, ARC), диэлектриков, называемых жидкими стёклами (SoG, spin on glass, или SoD, spin on dielectrics или FOX, flowable oxides)).

К процессам осаждения функциональных слоёв относятся процессы, представленные на рисунке 1 [1], а именно:

1) *физического осаждения из газовой фазы (ФОГФ) (PVD, physical vapor deposition), которые реализуются [3]:*

- с помощью термического испарения материалов в вакууме (thermal vacuum evaporation) посредством резистивного, электроннолучевого, индукционного, лампового и лазерного нагрева с последующим осаждением материалов без изменения их химического состава на поверхность подложки;
- с помощью ионно-плазменного (катодного, магнетронного – sputtering, magnetron sputtering) и ионно-лучевого (ion beam sputtering) распыления материалов в вакууме или плазме низкого давления с последующим осаждением материалов без изменения их химического состава на поверхность подложки;
- с помощью одновременного осаждения испарённых и/или распылённых в вакууме или плазме низкого давления материалов в виде атомарного и ионного пучков на поверхность подложки без изменения их химического состава (ion plating);

2) *реактивного физического осаждения из газовой фазы (реактивное ФОГФ – reactive PVD), которые реализуются с помощью процессов, в которых газовая среда низкого давления содержит достаточное количество химически активного (реактивного) газа для изменения химического состава испарённого и/или распылённого материала при его осаждении на подложку. Причём изменение химического состава осаждаемого материала может достигаться как на стадии его испарения или распыления, так и на стадии его осаждения на подложку [4];*

3) *химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ – CVD, chemical vapor deposition), которое реализуется посредством подачи двух (или более) паровых реагентов, необходимых для образования требуемого материала в результате проведения термоактивированных химических реакций на границе раздела газовая (паровая) фаза – подложка. При этом реагенты в вакуумную камеру, называемую в этом случае реактором, могут подаваться одновременно или поочередно, непрерывно или дискретно, с использованием или без использования газов-носителей. Если химическая реакция осаждения требуемого материала на подложку происходит только за счёт температуры, то процесс ХОГФ называется термическим ХОГФ (thermal CVD), низкотемпературным (LT) или высокотемпературным (HT). А если при проведении химической реакции осаждения используются различные способы активации, к которым относятся плазма, катализаторы, световые излучения и др., то такие процессы ХОГФ называются процессами ХОГФ с дополнительной активацией, например, плазмоактивированный процесс ХОГФ (ПА ХОГФ) (plasma enhanced CVD, PE CVD) [5];*

4) *плазмохимического осаждения (ПХО) (plasma chemical deposition or plasma deposition), являющегося разновидностью химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ), в котором реагенты и поверхность подложки активируются в плазме разряда и одновремен-*

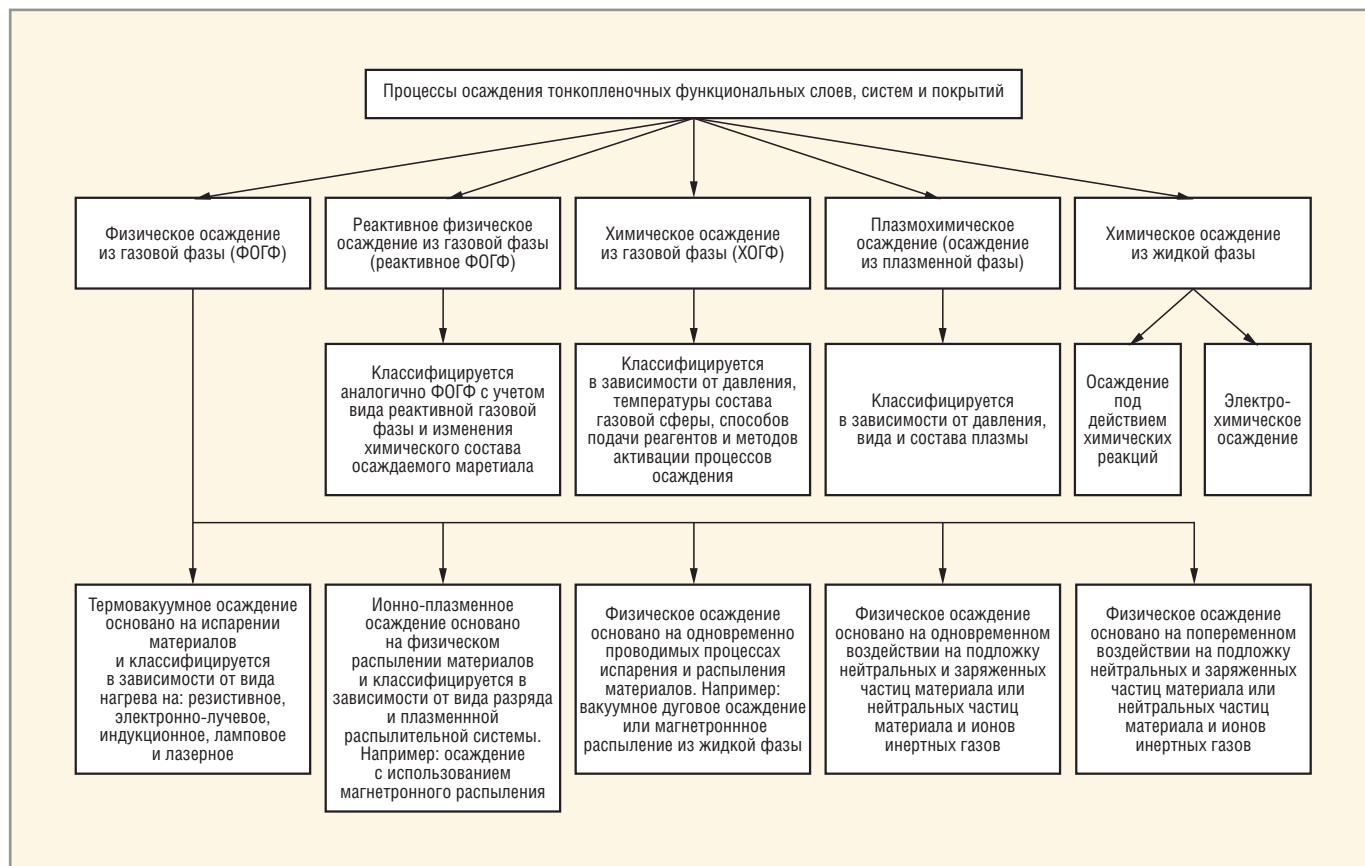


Рис. 1. Классификация процессов осаждения тонкоплёночных слоёв

но происходит активированная плазмой реакция осаждения слоя требуемого материала. При этом, по сравнению с ХОГФ, плазмохимическое осаждение может быть выполнено при более низких температурах и более высоких скоростях без потери качества функционального слоя материала;

5) *химического* (electroless deposition or electroless plating) и *электрохимического* (electrochemical deposition) *осаждения из растворов*, в которых химические реакции осаждения требуемого материала на подложку осуществляются в растворах соответственно без воздействия и под воздействием внешнего электрического поля. При этом поверхность подложки может быть выборочно или целиком активирована катализатором, а сами растворы могут быть активированы температурой, световым и ультразвуковым излучением и т.д.

К процессам выращивания относятся высокотемпературные процессы молекулярно-лучевой эпитаксии (molecular beam epitaxy), термического окисления (thermal oxidation) и термического нитрирования (азотирования) (thermal nitridation) поверхности кремниевых пластин или поликремниевых слоёв.

Термин эпитаксия применяют к процессам выращивания тонких моно-

кристаллических слоёв (плёнок) на монокристаллических подложках. Материал подложки в процессе выращивания играет роль затравочного кристалла. Эпитаксиальный процесс отличается от процессов выращивания монокристаллов, например, методом Чохральского, тем, что рост кристалла происходит при температуре ниже температуры плавления. Обычно эпитаксиальное выращивание плёнок основано на процессах ХОГФ, за исключением молекулярно-лучевой эпитаксии, где используется процесс вакуумной конденсации [5].

Если материалы выращиваемой плёнки и подложки одинаковы, например, кремний выращивается на кремнии, то процесс называется автоэпитаксиальным или гомоэпитаксиальным. Если же материал слоя и материал подложки различаются, например, плёнка Si1-xGex выращивается на кремнии, то процесс называется гетероэпитаксиальным, а сама плёнка – гетероструктурой. Однако, при гетероэпитаксии кристаллическая структура плёнки и подложки должна быть сходной для обеспечения роста монокристаллического слоя.

Процессы выращивания окисных и нитридных слоёв на поверхности подложки представляют собой разновид-

ность термических процессов ХОГФ, в которых в качестве одного из реагентов выступает сам материал подложки. Например, чистая поверхность кремниевой пластины при высокой (800...1100°C) температуре в присутствии кислорода покроется выращенной плёнкой оксида кремния, а в присутствии азота – плёнкой нитрида кремния. При этом процессы выращивания плёнок могут быть активированы плазмой, световым излучением, электрическим полем и др.

К процессам формирования функциональных слоёв и покрытий относятся группа процессов термического диффузионного (diffusion annealing), быстрого термического (rapid thermal annealing), пикового (spike annealing) и лазерного (laser annealing) отжига, формирующих структуру, состав и физико-химические свойства имплантированных, нанесённых, осаждённых и выращенных слоёв.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБЫЧНОГО И РЕАКТИВНОГО ФОГФ

В ранних работах [6–8] к тонким плёнкам обычно относили слои толщиной менее 10 мкм, которые получали методами физического или химического осаждения из газовой фазы.

Более толстые слои относились к толстым плёнкам и формировали методом намазывания и вжигания паст, методом ламинирования, методом погружения в расплавы и методами химического или электрохимического осаждения из растворов. В настоящее время, в связи с развитием мощных электронных и светодиодных осветительных приборов, граница толщины тонкоплёночных слоёв, особенно медных, постоянно повышается и уже достигла 15...25 мкм.

Кроме того, тонкие плёнки, используемые в микроэлектронике, оптике и точной механике, должны осаждаются в атомарном или молекулярном виде с помощью потоков индивидуальных нейтральных или заряженных атомов или молекул, так как получаемые функциональные слои и покрытия должны иметь атомарную гладкость. Поэтому целые классы процессов осаждения из газовой и жидкостной фаз, в которых тонкие плёнки осаждаются в виде кластеров и наночастиц, например, ионно-кластерное осаждение (ion cluster deposition) и золь-гель (sol-gel) технологии, здесь не рассматриваются.

В микроэлектронике процессы ФОГФ используются для осаждения функциональных слоёв алюминия (Al) и его сплавов с кремнием и медью Al[(1...4)%Si], Al[1%Si,0,5%Cu], Al[0,5%Cu], титана (Ti), тантала (Ta), никеля (Ni), кобальта (Co), платины (Pt), хрома (Cr) и меди (Cu), а также тонких зародышевых слоёв (seed layers) меди и золота (Au). Процессы реактивного ФОГФ применяются для осаждения барьерных слоёв нитридов титана и тантала (TiN и TaN), а также антиотражающих слоёв нитрида титана и окиси хрома (Cr2O3).

В оптике процессы ФОГФ используются для осаждения металлических отражающих излучение слоёв для зеркал, например, плёнок алюминия (Al) и хрома (Cr); поглощающих излучение слоёв для шаблонов, например, плёнок золота (Au) и вольфрама (W). С помощью процессов реактивного ФОГФ осаждаются антиотражающие и просветляющие покрытия оксидов алюминия, хрома и кремния (Al2O3, Cr2O3 и SiO2). В точной механике процессы обычного и реактивного ФОГФ используются для осаждения износоустойчивых, сверхтвёрдых, коррозионностойких и антифрикционных покрытий на основе тугоплавких металлов, а также их оксидов, нитридов и карбидов на различные взаимодействующие детали и инструменты.

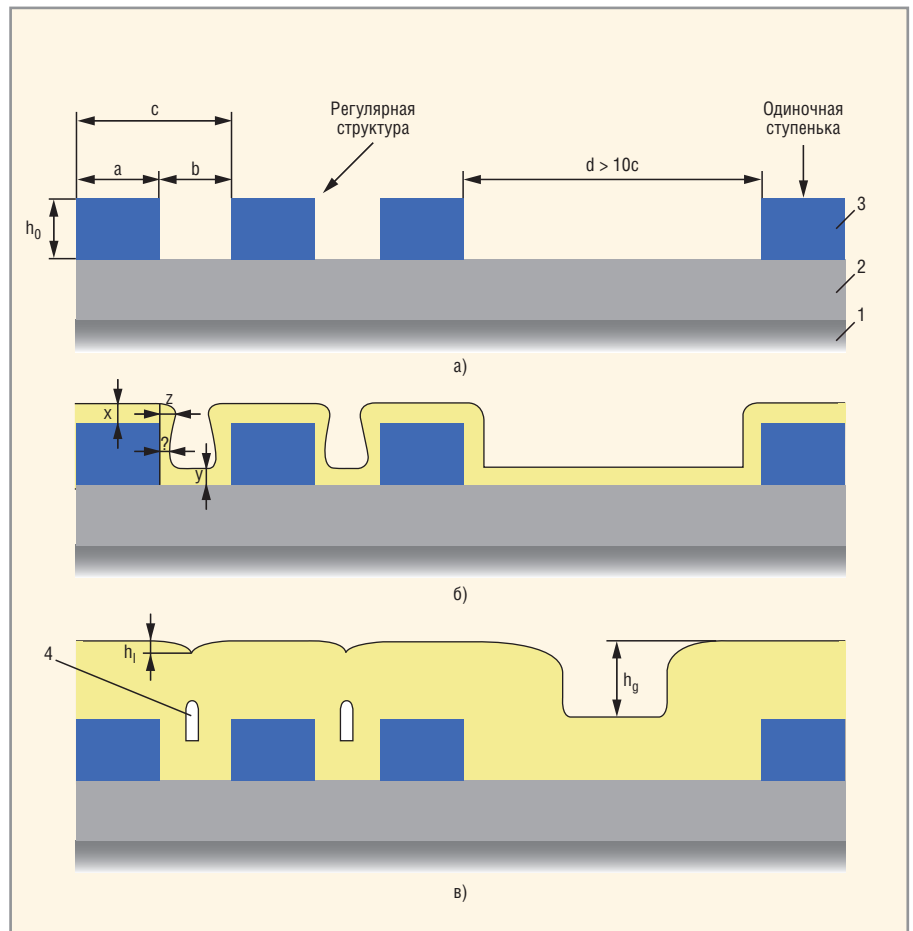


Рис. 2. Вид структуры до (а) и после (б, в) операции физического осаждения из газовой фазы (ФОГФ) функционального слоя

1 – подложка, 2 – гладкий подслой, 3 – рельефный подслой, 4 – незаполненные функциональным слоем пустоты (voids)

ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ ДО И ПОСЛЕ ОПЕРАЦИИ ФОГФ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СЛОЯ

На операцию ФОГФ функционального слоя в общем случае поступает структура со сформированным в подслое или подложке топологическим рисунком (гладкие подслой или подложка являются частными случаями), которая имеет следующие исходные характеристики (см. рис. 2а):

- 1) материал подложки или подслоя или материалы подслоев;
- 2) площади материалов подслоев на пластине;
- 3) параметры рельефа подслоя (подложки), включающие:

- наименьший период регулярных структур – ступенек, канавок, отверстий (параметр c на рисунке 2а);
- ширину (или диаметр) a и высоту (или глубину) h_0 элементов регулярных структур (ступенек, канавок, отверстий) с наименьшим периодом ($a = b$ и $a + b = c$, см. рис. 2а);
- ширину (или диаметр) и высоту (или глубину) наиболее узких и наиболее высоких (глубоких) одиноч-

но расположенных ступенек, канавок, отверстий.

Отношение глубины канавки к её ширине, глубины отверстия к его диаметру и высоты ступеньки к её ширине называется аспектным отношением (aspect ratio, AR) и служит важной характеристикой рельефа с точки зрения его покрытия или планаризации осаждаемыми пленками.

С операции ФОГФ могут выходить структуры трёх видов:

- 1) структуры со сверхтонкими (1...100 нм), обычными тонкими (500...1500 нм) и толстыми (5...25 мкм) плёнками, осажёнными на гладкую поверхность подложки (или подслоя) и используемые в качестве приборных, адгезионных, стопорных, защитных, маскирующих и антиотражающих функциональных слоёв (ФС);
- 2) структуры с тонкими плёнками, осажёнными на рельефную поверхность подложки и используемые в качестве зародышеобразующих (seed, nucleation), смачивающих (wetting), адгезионных и барьерных (barrier) ФС (см. рис. 2б);

3) структуры с толстыми плёнками, осаждёнными на рельефную поверхность подложки и используемыми в качестве заполняющей и планаризирующей рельеф ФС межслойной металлизации (см. рис. 2в).

Структуры первого вида, выходящие с операции ФОГФ, имеют следующие характеристики:

1.1) средняя толщина ФС на подложке:

$$d_{\text{ФС}} = [d_{\text{ФС}}(\text{max}) + d_{\text{ФС}}(\text{min})]/2, \quad (1)$$

где $d_{\text{ФС}}(\text{max})$ и $d_{\text{ФС}}(\text{min})$ – соответственно максимальная и минимальная толщина ФС на подложке (пластине);
1.2) неравномерность толщины ФС на подложке, %:

$$r(d_{\text{ФС}}) = [d_{\text{ФС}}(\text{max}) - d_{\text{ФС}}(\text{min})]/[d_{\text{ФС}}(\text{max}) + d_{\text{ФС}}(\text{min})]100, \quad (2)$$

$$d_{\text{ФС}}(\text{max}) = d_{\text{ФС}}\{1 + r(d_{\text{ФС}})\}, \quad (2a)$$

$$d_{\text{ФС}}(\text{min}) = d_{\text{ФС}}\{1 - r(d_{\text{ФС}})\}; \quad (2б)$$

1.3) состав ФС, характеризуемый отношением компонентов в химической формуле материала, например, для слоя TiN отношение Ti : N = 1 : 1;

1.4) структура материала ФС, характеризуемая типом решётки для монокристаллических плёнок, размером и ориентацией зёрен (кристаллитов) для поликристаллических плёнок и отсутствием упорядоченности для аморфных плёнок;

1.5) плотность материала ФС σ , г/см³. Состав, структуру и плотность ФС часто оценивают по скорости жидкостного химического травления материала ФС $V_{\text{ет}}$, нм/мин, в стандартных травителях и при стандартных условиях $p_0 = 101\,325$ Па и $T_0 = 298,16^\circ\text{K}$ и по усадочной деформации толщины плёнки (shrinkage) δb_s , %, при высокотемпературном отжиге с заданной температурой (обычно 1000°C) за определённое время;

1.6) коэффициент преломления материала ФС n ;

1.7) отражательная способность материала ФС (обычно относительно монокремния на длине волны света экспонирующей системы фотолитографии) R , %;

1.8) диэлектрическая постоянная ϵ и диэлектрическая прочность E , В/см, для диэлектрических ФС;

1.9) Поверхностное сопротивление ρ_s , Ом/кв, и объёмное удельное сопротивление ρ , Ом см, для проводящих ФС;

1.10) Механические напряжения, сжимающие (compressive) и растягиваю-

щие (tensile) в ФС S_c и S_t соответственно, дин/см²;

1.11) коэффициент термического расширения материала ФС k_{th} , K^{-1} ;

1.12) адгезия материала ФС (thin-film adhesion) к материалу подложки (к материалам подслоёв), характеризуемая силой адгезионного сцепления на единицу площади $F_{\text{ад}}$, дин/см².

Структуры второго вида, кроме указанных характеристик или их части, характеризуются также степенью покрытия рельефа, к которой относятся:
2.1) степень конформности покрытия ступеньки (топологического рельефа) (conformality step coverage) α_c , %:

$$\alpha_c = (s/z)100, \quad (3)$$

где s и z – соответственно толщина наиболее тонкого и наиболее толстого участков осаждаемой плёнки на боковой стороне ступеньки (см. рис. 2б);

2.2) степень покрытия боковой стенки ступеньки (side wall step coverage) α_w , %:

$$\alpha_w = (s/x)100, \quad (4)$$

где x – толщина осаждаемой плёнки на горизонтальной поверхности подложки (см. рис. 2б).

2.3) степень покрытия дна ступеньки (bottom step coverage) α_b , %:

$$\alpha_b = (y/x)100, \quad (5)$$

где y – толщина осаждаемой плёнки на дне ступеньки (см. рис. 2б).

Структуры третьего вида, кроме указанных характеристик для структур первого вида или их части, характеризуются также показателями заполнения и планаризации (сглаживания) рельефа, к которым относятся:

3.1) сплошность заполнения рельефа – отсутствие пустот (voids) (см. рис. 2в);

3.2) степень локальной планаризации (degree of local planarization) β_1 , %:

$$\beta_1 = (1 - b_1/b_0)100, \quad (6)$$

где b_1 – конечная высота ступенек или глубина канавок на локальном рельефе (см. рис. 2в), b_0 – начальная высота ступенек или глубина канавок (см. рис. 2а);

3.3) степень глобальной планаризации (degree of global planarization) β_g , %:

$$\beta_g = (1 - b_g/b_0)100, \quad (7)$$

где b_g – конечная высота ступенек или глубина канавок на глобальном рельефе (см. рис. 2в).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ ФОГФ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЁВ

К технологическим характеристикам процессов ХОГФ относятся:

1) средняя скорость осаждения функционального слоя (ФС) V_d :

$$V_d = [V_d(\text{max}) + V_d(\text{min})]/2, \quad (8)$$

где $V_d(\text{max}) = d_{\text{ФС}}(\text{max})/t_d$ и $V_d(\text{min}) = d_{\text{ФС}}(\text{min})/t_d$ – соответственно максимальная и минимальная скорости осаждения ФС на подложке (пластине); $d_{\text{ФС}}(\text{max})$ и $d_{\text{ФС}}(\text{min})$ – соответственно максимальная и минимальная толщины ФС на подложке, образующиеся за время осаждения t_d ;

2) неравномерность скорости осаждения по подложке (пластине) $r(V_d)$, %:

$$r(V_d) = [V_d(\text{max}) - V_d(\text{min})]/[V_d(\text{max}) + V_d(\text{min})]100. \quad (9)$$

Иногда для характеристики процессов ХОГФ используют понятие равномерности осаждения ФС R_d , которое определяется как:

$$R_d = [1 - 2r(V_d)]; \quad (10)$$

3) селективность осаждения ФС на разные материалы подслоёв на поверхности пластины (подложки):

$$S_d(p1/p2) = V_d(p1)/V_d(p2), \quad (11)$$

где $V_d(p1)$ и $V_d(p2)$ – соответственно скорости осаждения ФС на материалы подслоев $p1$ и $p2$. При $S_d(p1/p2) = 0$ ФС в процессе ФОГФ селективно осаждается только на подслое $p2$. Следует отметить, что селективности осаждения функциональных слоёв могут зависеть от соотношения площадей подслоёв на поверхности пластины. Кроме того, при одинаковых скоростях осаждения ФС на поверхности обоих подслоёв ($S_d(p1/p2) = 1$) может наблюдаться изменение в структуре осаждаемых на разные подслои плёнок;

4) анизотропия (показатель анизотропии) осаждения ФС на рельефную поверхность пластины:

$$A_d = V_d(\parallel)/V_d(\perp), \quad (12)$$

где $V_d(\parallel)$ и $V_d(\perp)$ – соответственно скорости осаждения ФС в направлениях, параллельном (\parallel) и перпендикулярном (\perp) поверхности пластины. При $A_d = 1$ процесс ФОГФ обеспечивает конформное осаждение плёнок на рельефную поверхность (конформное покрытие ступеньки с $\alpha_c = 100\%$). При $A_d \ll 1$ процесс ФОГФ плохо покрывает боковые поверхности рельефа (ступенек, канавок);

5) плотность привносимой процессом (операцией) ФОГФ дефектности на поверхность пластины D_{op} , дефект/см²:

$$D_{op} = (D_b - D_a)/F_w, \quad (13)$$

где D_a и D_b – количество дефектов с размером, большим или равным критическому размеру ($d_D \geq d_{cr}$) (губительных дефектов) на пластине соответственно до и после операции ФОГФ функционального слоя, F_w – площадь пластины;

6) плотность привносимых процессом (операцией) ХОГФ радиационных дефектов (radiation-induced defects) в поверхностные слои обрабатываемой структуры D_{rd} , дефект/см², определяемая в соответствии с формулой (13). Причём под радиационными дефектами, в зависимости от вида обрабатываемой структуры, могут подразумеваться: нарушения состава и кристаллической структуры поверхностных слоёв, пробой диэлектрических плёнок, изменения электрофизических характеристик МОП-структур, контактов и p–n-переходов. Наибольшую опасность с точки зрения внесения радиационных дефектов представляют процессы ФОГФ с высокой энергией распыляющих ионов и распыляемых частиц.

Следует отметить, что приведённые в этом разделе технологические характеристики относятся не только к операциям, но и к оборудованию ФОГФ функциональных слоёв, так как нельзя отделить процесс от установки, в которой он реализуется. Однако для оборудования, кроме указанных параметров, существуют ещё и дополнительные, присущие только ему конструктивно-технологические параметры, которые будут рассмотрены в следующем разделе.

СОСТАВ И ПАРАМЕТРЫ ОБОРУДОВАНИЯ ФОГФ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЁВ

Оборудование ФОГФ плёнок состоит из следующих основных систем:

- вакуумной камеры, служащей для проведения процесса осаждения ФС на пластины (подложки) и состоящей из рабочей камеры и расположенных внутри неё или присоединённых к ней снаружи подложкодержателей, экранов, электродов, нагревательных элементов, ионных источников;
- газовой системы, служащей для подачи требуемых потоков газов в рабочую камеру, распылительные системы и автономные ионные источники, их распределения в пространстве и во времени и состоящей из нескольких каналов, содержащих фильтры, трубки, вентили, клапаны, измерители и регуляторы расхода газов, коллекторы и стабилизаторы давления газов;
- вакуумной системы, служащей для обеспечения требуемых остаточных и рабочих давлений используемых газов, а также скоростей их откачки из рабочей, транспортной и шлюзовой камер, автономных ионных источников и состоящей из откачных коллекторов или отверстий, труб, клапанов, заслонок, измерителей и регуляторов давлений и скоростей откачки, ловушек, фильтров, вакуумных насосов, скрубберов или нейтрализаторов выхлопных газов;
- системы возбуждения и поддержания плазмы разряда в рабочей камере при проведении процессов физического распыления мишеней, процессов автоматической очистки элементов рабочей камеры и поверхности подложек с помощью ионных источников при использовании измерителей и регуляторов подводимых мощностей;
- системы испарителей осаждаемых материалов, служащей для измерения, регулирования и стабилизации их температуры;
- системы загрузки/выгрузки пластин, кассет, СМIF (стандартный механический интерфейс) контейнеров, транспортирования и позиционирования пластин внутри установки, состоящей из СМIF-загрузчиков, приёмных и передающих кассет, загрузочных и транспортных камер, устройств загрузки, перемещения, позиционирования и прижима пластин на подложкодержателях внутри установки;
- системы контроля момента окончания процесса осаждения функционального слоя (времени осаждения),

состоящей из датчиков сигналов на основе резистивного, массового, оптического эмиссионно-спектрального, лазерного интерферометрического или масс-спектрометрического методов, оптических и электронных устройств, а также специализированных программно-аппаратных вычислительных комплексов для обработки полученных сигналов по требуемому алгоритму;

- системы управления, служащей для управления перечисленными выше системами, контроля режимов их работы и исправности входящих в них устройств и состоящей из управляющей ЭВМ с программным обеспечением, клавиатурой ввода команд, дисплеем и устройств записи, хранения и передачи информации по локальным и глобальным компьютерным сетям.

К конструкционным параметрам оборудования относятся:

- его вес, размеры и конфигурация;
- форма, материалы, количество, размеры и взаимное расположение функциональных узлов и систем в составе установки, а также отдельных элементов в составе этих узлов и систем;
- размеры, форма и материалы требуемых подводок и отводов энергоносителей для подключения и запуска установки;
- расположение и размеры зоны обслуживания установки.

Состав оборудования ФОГФ материалов определяет перечень операционных (целенаправленно выставляемых режимных) параметров, к которым относятся:

- рабочее давление (p) и диапазон его возможного изменения (Δp) в установке;
- расход рабочих газов (Q) и диапазон его возможного изменения (ΔQ);
- температура подложкодержателя (chuck) (T_c) и диапазоны её возможного изменения (ΔT_c). Температура подложки (substrate) (T_s) обычно соответствует температуре подложкодержателя в стационарных процессах;
- мощности распылительного устройства (W_s), испарителя (W_e) и ионного источника (W_{is}), а также диапазоны их возможного изменения (ΔW_s , ΔW_e , ΔW_{is});
- время процесса осаждения (deposition) функционального слоя (t_d) или отдельных стадий (step) процесса осаждения.

Эти параметры встречаются во всех видах оборудования ФОГФ, тогда как для отдельных групп оборудования добавляются дополнительные операционные параметры. Например, для расплывчатых систем с магнитными полями это может быть индукция магнитного поля (B) и диапазон её возможного изменения (ΔB); для оборудования с перемещением подложкодержателей – скорость вращения (rotation) (ω_r) или перемещения (travel) (v_{tr}) подложкодержателя, и т.д.

Совокупность значений операционных параметров определяет режим (recipe) осаждения и служит для получения требуемых технологических характеристик процесса ФОГФ функционального слоя, которые, в свою очередь, определяют параметры выходной структуры с операции ФОГФ при заданных параметрах входной структуры. Управляющие ЭВМ на современном оборудовании ФОГФ контролируют с помощью измерительных приборов (датчиков) значения операционных параметров и поддерживают их в требуемых технологических допусках с помощью прецизионных регуляторов.

Параметры оборудования ФОГФ, которые связаны с конструктивными особенностями, но определяют его технологические возможности по обработке подложек в процессе производства изделий, называются конструктивно-технологическими. К таким параметрам относятся:

1) операционная производительность установки (производительность установки без проведения процесса ХОГФ), определяемая как:

$$Y_{op} = 60q_w/t_{tr} \text{ [пластин/час]}, \quad (14)$$

где q_w – количество одновременно обрабатываемых в установке пластин, t_{tr} – подготовительное время установки в минутах к проведению процесса ФОГФ, включающее для автоматизированной кластерной установки:

- выгрузку кассеты с пластинами из СМIF-контейнера;
- напуск газа в шлюзовую камеру (venting);
- открытие шлюзовой камеры и загрузку кассеты пластин в шлюзовую камеру;
- проверку количества и положения пластин в кассете (mapping) и откачку шлюзовой камеры (pumping);

- перемещение пластины (пластин) из кассеты в рабочую камеру;
- откачку камеры, напуск в неё рабочих газов и стабилизацию давления в ней;
- выгрузку пластины (пластин) из рабочей камеры в кассету шлюзовой камеры;
- напуск газа в шлюзовую камеру, открытие шлюзовой камеры и выгрузку кассеты с пластинами из шлюзовой камеры в СМIF-контейнер.

Операционная производительность характеризует быстродействие функциональных узлов установки и выбирается из условий максимальной надёжности их работы и минимальной привносимой дефектности;

2) технологическая производительность установки, определяемая как

$$Y_T = 60q_w/t_c = 60q_w/(t_{tr} + t_d) \text{ [пластин/час]}, \quad (15)$$

где $t_c = t_{tr} + t_d$ является длительностью в минутах цикла обработки пластины (пластин) на установке, состоящей из подготовительного времени (t_{tr}) и времени осаждения ФС (t_d);

3) среднее время наработки установки на отказ (fault), определяемое по формуле:

$$t_f = (t_1 + t_2 + \dots + t_n)/n_f, \quad (16)$$

где t_1, t_2, \dots, t_n – время обработки пластин между отказами установки за нормативный срок (в качестве нормативного срока обычно выбирается один, три или шесть месяцев эксплуатации оборудования), n_f – количество отказов за нормативный срок. Значение t_f характеризует надёжность установки в производственных условиях;

4) коэффициент использования (utilize) установки, определяемый по формуле:

$$k_u = t_{cal}/t_{cal}, \quad (17)$$

где t_{cal} – календарное время работы участка, на котором находится установка ХОГФ, в сутки, t_T – технологически заданное время обработки пластин на установке в сутки. Значение k_u характеризует длительность регламентной подготовки установки к проведению технологических операций ФОГФ;

5) коэффициент готовности (ready) установки, определяемый как:

$$k_r = t_w/t_T, \quad (18)$$

где t_w – время безотказной работы (uptime) установки в течение технологически заданного времени. Значение k_r характеризует ремонтоспособность оборудования, т.е. допустимость его ремонта в течение времени не более $t_T(1 - k_r)$ для технологически заданного времени работы установки;

б) плотность привносимой установкой (tool) дефектности на поверхность пластины (D_t) без проведения на ней процесса ФОГФ ФС определяется по формуле (13), где D_{ta} и D_{tb} – количество губительных дефектов на пластине соответственно до её входа в установку и после её выхода из установки без проведения на установке процесса ФОГФ. Значение D_t служит для оценки качества устройств загрузки и перемещения пластин внутри установки, систем откачки и напуска газов, чистоты газовых магистралей и внутренних поверхностей камер и оснастки. Значение D_t входит в суммарную плотность привносимой операцией ФОГФ дефектности D_{op} (см. (13)).

ЛИТЕРАТУРА

1. Киреев В.Ю. Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии. ФГУП «ЦНИИХМ», 2008.
2. Сейсян Р. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете. Журнал технической физики. 2005. Т. 75. Вып. 5. С. 1–3.
3. Бабкин С.И., Киреев В.Ю. Процессы и оборудование физического осаждения из газовой фазы в технологии интегральных микросхем. Известия вузов: Электроника. 2002. № 1. С. 7–22.
4. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкоплёночной технологии. Техносфера, 2010.
5. Киреев В., Столяров А. Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. Техносфера, 2006.
6. Бери Р., Холл П., Гаррис М. Тонкоплёночная технология. Энергия, 1972.
7. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких плёнок. Энергоатомиздат, 1989.
8. Технология тонких плёнок. Справочник под ред. Л. Майссела и Р. Гленга. Советское радио, 1977.



Новости мира News of the World Новости мира

Infineon: новое семейство микроконтроллеров

Компания Infineon представила своё новое семейство 32-разрядных микроконтроллеров XMC4000, в котором применён процессор Cortex-M4 компании ARM. К областям применения чипа относятся, например, электрические приводы, инверторы солнечных энергетических установок, системы автоматизации производства и системы автоматизации зданий.



XMC является сокращением Cross-Market Microcontrollers. Это означает, что семейство XMC4000 благодаря своей конфигурируемости пригодно для самых разнообразных промышленных приложений. Портфель элементов состоит из пяти серий: XMC4100, XMC4200, XMC4400, XMC4500 и XMC4700. Они различаются в основном тактовой частотой ядра, объёмом памяти, периферийными функциями и числом вводов-выводов.

Семейство XMC4000 работает на тактовой частоте 80...180 МГц, располагает DSP-функциональностью, имеет модуль для выполнения операций с плавающей точкой, Flash-память со временем считывания 22 нс и коррекцией ошибок, статическое ОЗУ, а также периферийные функции. К периферии относятся таймерные модули, до четырёх параллельных 12-разрядных аналого-цифровых преобразователей с периодом дискретизации 70 нс и временем преобразования 500 нс, кроме того, до двух 12-разрядных цифро-аналоговых преобразователей и до четырёх ШИМ-каналов (150 имп./с), а также интегрированные модули Delta-Sigma-демодуляторов и модули кнопок.

Коммуникация обеспечивается Ethernet MAC стандарта IEEE 1588, USB 2.0-, CAN- и SD/MMC-интерфейсами, также имеется до шести последовательных коммуникационных каналов, UART, SPI, Quad-SPI, IIC, IIS или LIN. Кроме того, семейство XMC4000 имеет внешний шинный интерфейс, который поддерживает

такие синхронные стандарты, как SDRAM или Burst-Flash, и такие асинхронные стандарты, как SRAM, NAND-Flash или NOR-Flash.

Интегрированная среда разработки DAVE3 для семейства XMC4000 обеспечивает комфортную разработку программного обеспечения. Среда на базе Eclipse с бесплатным GNU-компилятором, отладчиком и утилитами визуализации данных может быть расширена за счёт инструментов разработки третьих фирм. Кроме этого DAVE3 поддерживает автоматическое генерирование кодов на базе предварительно определённых программных компонентов, DAVE Apps.

Конфигурация DAVE Apps осуществляется через графический пользовательский интерфейс. В DAVE 3 производится компиляция, отладка и визуализация сгенерированного кода – или его импорт в инструменты разработки третьих фирм. Infineon кооперируется с более чем 20 партнёрами, которые предлагают дополнительные специфические инструменты разработки, программные решения, обучение и консультационные услуги по семейству XMC4000.

Первой из семейства XMC4000 на рынок выходит серия XMC4500. Продукты этой серии имеют CPU с тактовой частотой от 120 МГц, до 1 Мб встроенной Flash-памяти, 160 Кб RAM, а также обширную периферию и набор интерфейсов. К периферийному оборудованию относятся, кроме прочего, четыре параллельных быстродействующих 12-разрядных аналого-цифровых преобразователя, два 12-разрядных цифро-аналоговых преобразователя, четыре модуля Delta-Sigma-демодуляторов и шесть Capture/Compare-блоков (CCU4 и CCU8), а также два модуля интерфейса позиционирования и один модуль на восемь кнопок.

Коммуникация микроконтроллеров XMC4500 обеспечивается Ethernet-, USB, а также одним SD/MMC-интерфейсом, тремя CAN-узлами и шестью последовательными коммуникационными, а также внешним шинным интерфейсом. Варианты корпусов серии XMC4500 являются LQFP-144, LQFP-100 и LFBGA-100.

Образцы серии XMC4500 и среда разработки DAVE 3 будут предлагаться с марта 2012 г. Серийное производство начнётся в мае 2012 г. Для поддержки разработок Infineon предлагает модульный комплект проектирования, в котором, в зависимости от требований приложений к основной отладочной плате, могут подсо-

единяться до трёх дополнительных прикладных плат.

В четвертом квартале 2012 г. должны появиться образцы серий XMC4400, XMC4200 и XMC4100. В зависимости от серии и корпуса, цена одного XMC-микроконтроллера при заказе партии 10 000 шт. составляет от 1 до 7 евро.

www.infineon.com/xmc

32-разрядный микроконтроллер с СКТ-интерфейсом

V850E2/PJ4-E компании Renesas является 32-разрядным микроконтроллером с интегрированным СКТ-интерфейсом. Микроконтроллер используется для управления двигателем в электромобилях и гибридных автомобилях и в других приложениях автомобильной электроники. Речь идёт о дальнейшем развитии P-серии, микроконтроллер принадлежит семейству V850 32-Bit RISC-MCU.



Элемент имеет CPU-ядро Renesas V850E2 с функцией реального времени и функции периферии для управления двигателем. Благодаря комбинации Dual-Core-конфигурации и интегрированного в чипе СКТ-интерфейса микроконтроллер V850E2/PJ4-E выполняет требования безопасности норм ISO 26262. Микроконтроллер получает разработанный Renesas интегрированный СКТ-интерфейс для широкой палитры СКТ-датчиков, так что больше не требуется внешний цифровой преобразователь датчика СКТ.

Микроконтроллер имеет 1 Мб ROM, 80 Кб RAM и частоту CPU 128 МГц. Имеются функции коммуникации с другими блоками управления, а также стандартизованные CAN, SCI и UART для обмена данными. Элемент рассчитан на работу в температурном диапазоне -40...+125°C. Элемент имеет схему стабилизации питания с использованием внешнего транзистора.

Образцы микроконтроллера V850E2/PJ4-E появятся в марте 2012 г. Начало серийного производства запланировано на апрель 2013 г.

www.renesas.ru