

# ПЛЕНОЧНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

## Виды пленочных наноматериалов

К пленочным наноматериалам относятся нанопокрyтия, нанопленки и слоистые пленочные нанокомпозиты на поверхности какого-либо изделия или подложки (рис. 1).



Рис. 1. Классификация пленочных наноматериалов по структуре

# ПЛЕНОЧНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ

## Виды пленочных наноматериалов (по структуре)

- **Нанопокрытие** – однослойный *рыхлый (островковый, неоднородный)* пленочный наноматериал толщиной до 100 нм на поверхности какого-либо изделия (подложки).
- **Нанопленка** – однослойный *сплошной нанофазный* материал толщиной до 100 нм на поверхности какого-либо изделия (подложки).
- **Композиционное нанопокрытие** – *слоистый сплошной* пленочный наноматериал на поверхности какого-либо изделия (подложки), в котором чередующиеся нанослои могут быть выполнены из одного и того же материала (химический состав слоев – одинаков), либо – из различных (химический состав слоев – разный).

# ПЛЕНОЧНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ

- **Композиционные нанопокрyтия (рис. 2) состоят из набора чередующихся однородных нанослоев (одинакового (а) и различного (б) химического состава) и набора поверхностей между ними.**

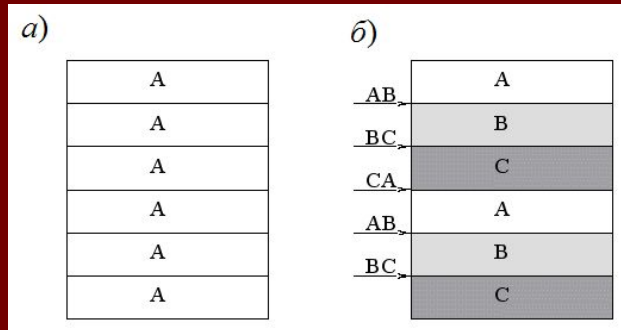


Рис. 2. Схемы слоистых нанокомпозитов:  
А, В, С – обозначения химического состава нанослоев;  
АВ, ВС, СА – обозначения химического состава границ раздела между нанослоями.

**Композиционные ПНК из одного материала** имеют диффузионную природу связи между нанослоями.

**Композиционные ПНК из разных материалов** имеют химическую природу связи между нанослоями (за счет образования химических соединений АВ, ВС, СА).

**Разновидностью композиционных нанопокрyтий являются СВЕРХРЕШЕТКИ.**

# ПЛЕНОЧНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ



Рис. 3. Классификация пленочных наноматериалов по дополнительным признакам

# ПЛЕНОЧНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ (ПНМ)

- **Все виды ПНМ обладают свойствами, которые существенно отличаются от свойств объемного материала.** Это обусловлено большей энергией поверхностных атомов по сравнению с атомами в объеме твердой фазы; их избыточная энергия вызывает искажение структуры приповерхностного слоя, а значит, и большую разупорядоченность материала нанofазы.

**Физико-химические свойства ПНМ** (а значит, и применение ПНМ) определяются:

- **1) структурой ПНМ (кристаллическая или аморфная, когерентная или некогерентная границы раздела между подложкой и пленкой и между чередующимися слоями нанofаз, толщина и дефектность слоя нанofазы);**
- **2) составом ПНМ (выбором материала и размером частиц нанofазы);**
- **3) технологией нанесения ПНМ и подготовки подложки (влияющей на характеристики границы раздела).**

# ПЛЕНОЧНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ (ПНМ)

## ■ 1. Влияние структуры на свойства ПНМ

**Монокристаллические** (широко применяемые в технологии микроэлектроники) и **поликристаллические ПНМ** обладают повышенной пластичностью и твердостью, но пониженной температурой плавления.

**Аморфные ПНМ** (например, плёночное стекло) обладают повышенной гибкостью, прозрачностью и термостойкостью.

**Композиционные (слоистые) ПНМ** могут обладать: сверхтвердостью, повышенной трещиностойкостью и другими особыми и уникальными свойствами.

# ПЛЕНОЧНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ (ПНМ)

## ■ 2. Влияние соответствия параметров решеток подложки и наносимого нанослоя на свойства ПНМ

В случае когерентной границы раздела фаз всегда образуются сплошные эпитаксиальные нанопленки с искаженной структурой и хорошими изолирующими свойствами (даже при малой толщине).

При большом (~ 10 %) отличии параметров (межатомных расстояний решеток) в ПНМ появляются (при определенной толщине) собственная неискаженная структура нанопазы с механическими напряжениями, ухудшающими целевые свойства ПНМ.

## ■ 3. Влияние толщины нанослоя $\delta$ на свойства ПНМ

Уменьшение толщины сплошного нанослоя ( $\delta = 10\text{--}100$  нм) в составе ПНМ обеспечивает улучшение механических свойств (повышается твердость и прочность за счет уменьшения напряжений в нанослое):

$$HV = a + b / \sqrt{\delta}, \text{ ГПа};$$

$$\sigma_{\text{в}} = c + d / \sqrt{\delta}, \text{ МПа},$$

где  $a, b, c, d$  – константы, зависящие от природы материала нанослоя.

# ПЛЕНОЧНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ (ПНМ)

## ■ 4. Влияние размера частиц нанопазы на свойства ПНМ

Уменьшение размера частиц (до 10–20 нм) простых веществ (Ni, Cu, Si) существенно повышает (в 4–6 раз) твердость нанопленок (табл. 1).

Таблица 1

**Механические свойства никеля при 25 °С**

Вид материала (и размер частиц)		Свойства	
		$\sigma_b$ , МПа	HV, ГПа
Массивный материал (10 мкм)		400	1,4
Нанопленка	(100 нм)	1100	3,0
	(10 нм)	2100	6,5

## ■ 5. Влияние состава материала нанопазы на свойства ПНМ

Замена нано-Ni (10 нм) на нано-BN (14 нм) повышает твердость однослойных нанопленок более чем в 10 раз (для нитрида бора HV составляет 85 ГПа).



# ПЛЕНОЧНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ (ПНМ)

Разновидностью ПНМ с уникальными свойствами являются сверхрешетки.

- **СВЕРХРЕШЕТКИ** (*crystal superlattice*) – твердые слоистые структуры (получаемые методами эпитаксии), в которых чередующиеся слои отличаются физическими свойствами.

Сверхрешетками могут быть:

- 1) композиционные нанопокрyтия с *периодическим чередованием нанослоев*, которые отличаются физическими свойствами;
- 2) однослойные нанопленки из монокристаллического материала на поверхности подложки из того же материала;
- 3) однослойные нанопленки из монокристаллического материала на поверхности подложки из другого материала с небольшим (не более 10 %) рассогласованием межатомных расстояний однотипных решеток (**ПСЕВДОМОРФНЫЕ СВЕРХРЕШЕТКИ**).

# ПЛЕНОЧНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ (ПНМ)

## СВЕРХРЕШЕТКИ

### 1. Виды сверхрешеток (по составу межфазной границы)

#### ■ 1.1. Гомоэпитаксиальные

(образованы наночастицами одного типа):

$\text{Ni/Ni}$ ,  $\text{Ag/Ag}$ ,  $\text{Si/Si}$ ,  $\text{GaAs/GaAs}$ ,  $\text{TiO}_2/\text{TiO}_2$ ;

#### ■ 1.2. Гетероэпитаксиальные

(образованы наночастицами разных типов):

$\text{NiAl/Ni}$ ,  $\text{Si/Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ge/Si}$ ,  $\text{ZnS/Si}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiN}$ .

# ПЛЕНОЧНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ (ПНМ)

## 2. Виды сверхрешеток (по свойствам)

- **2.1. Сверхтвердые** (чередующиеся слои отличаются высокой и низкой упругостью, что может обеспечивать повышение **HV в 5–100 раз – до HV >40 ГПа**):



- 2.2. Сверхпрочные** (чередующиеся слои отличаются высокой и низкой прочностью):



- 2.3. Полупроводниковые** (чередующиеся слои сильно отличаются электронными свойствами – шириной запрещенной зоны, что обеспечивает качественные потенциальные барьеры в создаваемой структуре и возможность создания гетеропереходов на их основе, используемых, например в полупроводниковых лазерах):



- 2.4. Оптические** (чередующиеся слои сильно отличаются коэффициентом преломления электромагнитных волн) [фотонные кристаллы].

- 2.5. Магнитные** (чередующиеся слои сильно отличаются магнитными свойствами).

- 2.6. Термоэлектрические** (чередующиеся слои сильно отличаются удельным сопротивлением): **TiN/Ti**

# Технологии получения пленочных наноматериалов

- Нанесение пленочных наноматериалов относится к матричным методам, поскольку тонкие пленки и нанопокрyтия повторяют форму подложки. **Осаждение на подложку производят из паров, плазмы или коллоидного раствора.**
- **Группа физических методов:**  
термовакuumное напыление, ионно-плазменное напыление, ионно-лучевое напыление, молекулярно-лучевая эпитаксия.
- **Группа химических методов:**  
погружение подложки в коллоидный раствор (или дисперсию) с медленным вытягиванием подложки и высушиванием, ионное наслаивание, послойное осаждение, спинингование (нанесение на вращающуюся подложку), химическое осаждение из газовой фазы, плазмохимическое напыление.
- **Для получения композиционных нанопокрyтий и сверхрешеток** используют жидкофазные и газофазные технологии эпитаксиального осаждения.

Рассмотрим особенности газофазных технологий.

# Технологии получения пленочных наноматериалов

## Физические газофазные технологии

1. *Технология термовакuumного напыления* (ТВН) основана на проведении процесса испарения-конденсации в вакуумной камере ( $P = 10^{-4}$ – $10^{-5}$  Па) при строго параллельном расположении источника пара (испаряемого вещества в тигле из W или Mo) и подложки (стекло, ситалл, кварц, немагнитный металл).

Качество и прочность пленок в большей степени зависят от чистоты подложки. Поэтому поверхность подложки предварительно полируют и тщательно очищают. Часто во время напыления подложку нагревают (специальным нагревателем) до температуры 100–300 °С с целью предотвращения образования внутренних напряжений в нанопленке и улучшения ее сцепления с подложкой. Температура подложки влияет на структуру нанопленок. Для увеличения скорости напыления в вакууме, уменьшают расстояние от испарителя до подложки.

# Технологии получения пленочных наноматериалов

## К технологии ТВН

Простейшая схема вакуумной установки для получения нанопленок методом ТВН приведена на рис. 4.

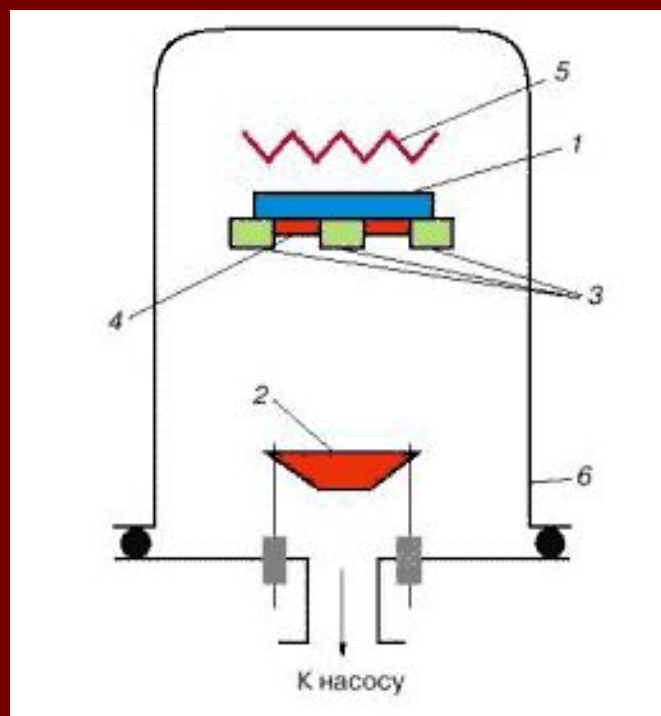


Рис. 4. Схема испарительной части вакуумной установки для получения нанопленок: 1 – подложка, 2 – испаритель, 3 – маска, – нанопленка, 5 – нагреватель, 6 – корпус вакуумной камеры

# Технологии получения пленочных наноматериалов

## К технологии ТВН

Технология ТВН предусматривает различные способы нагрева исходного материала: резистивный, индукционный, электронно-лучевой и лазерный. Резистивный нагрев осуществляют пропусканием тока через тигель, индукционный – путем помещения тигеля в ВЧ-индуктор, электронно-лучевой и лазерный – путем нагрева поверхности исходного материала сфокусированным электронным и лазерным лучом соответственно. Способ нагрева испаряемого материала является важным фактором, определяющим эксплуатационные особенности и конструкцию установок.

Достоинства резистивного нагрева – высокий КПД, низкая стоимость оборудования. Факторами, ограничивающими применение испарителей с резистивным нагревом, являются возможность загрязнения наносимой пленки материалом нагревателя, а также малый ресурс работы из-за старения (разрушения) нагревателя, что требует его периодической (иногда, частой) замены.

Технологию ТВН используют преимущественно для формирования нанопленок металлов (в т.ч. благородных). Несомненным преимуществом технологии является стерильность процесса, позволяющая при наличии высокого вакуума получать нанопленки, практически свободные от загрязнений.



# Технологии получения пленочных наноматериалов

2. *Технология ионно-плазменного напыления* (ИПН) основана на процессе физического распыления поверхности материала мишени (например, Al) в вакууме ( $P = 10^{-3}-10^{-4}$  Па) ионами инертного газа (например,  $Ar^+$ , генерируемыми в низкотемпературной плазме тлеющего разряда) с последующим осаждением потока распыленных частиц на нагретую подложку (например,  $SiO_2$ ) с температурой 50–200 °С.

Для реализации технологии ИПН, вакуумную камеру, содержащую анод и катод, откачивают до давления  $10^{-4}$  Па, после чего производят напуск инертного газа (с парциальным давлением 1–10 Па). Для зажигания тлеющего разряда между катодом и анодом подают высокое напряжение 1–10 кВ. Образующиеся в плазме ионы инертного газа ускоряются в электрическом поле и бомбардируют катод, вызывая его распыление (катод является распыляемым материалом). Распыленные атомы попадают на подложку (расположенную на аноде или на боковой стенке разрядной камеры) и оседают в виде нанопленки.



# Технологии получения пленочных наноматериалов

## К технологии ИПН

Простейшим устройством для реализации технологии ИПН является диодная система с тлеющим разрядом на постоянном токе. Схема установки представлена на рис. 5.

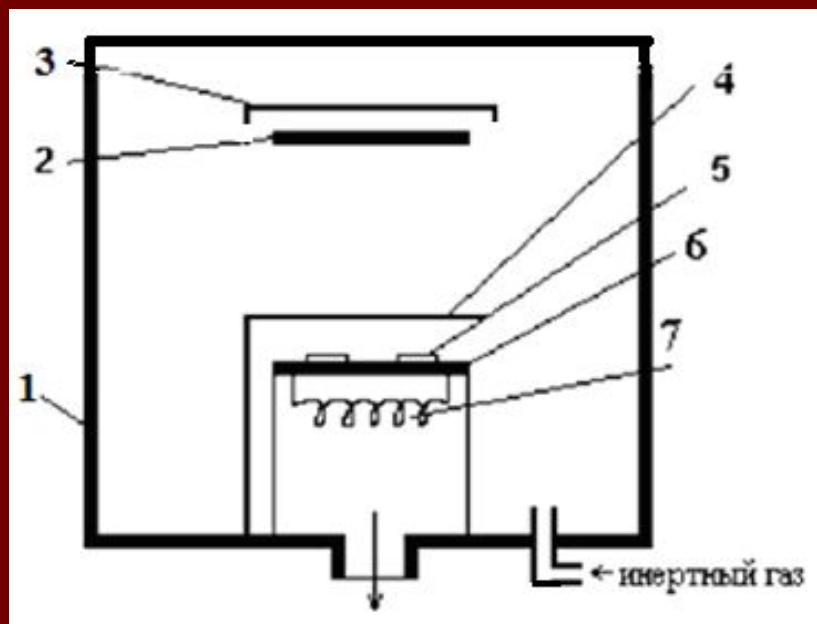


Рис. 5. Схема установки для нанесения нанопленок ионно-плазменным (катодным) напылением: 1 – вакуумная камера; 2 – катод; 3 – заземленный экран; 4 – заслонка; 5 – подложка; 6 – заземленный анод; 7 – резистивный нагреватель подложки

# Технологии получения пленочных наноматериалов

## К технологии ИПН

Ионная бомбардировка подложек в технологии ИПН приводит к образованию переходного слоя (ПС) на границе раздела нанопленка – подложка (т. е. отсутствию резкой границы между материалом пленки и подложки). Образование ПС обусловлено как частичным внедрением распыленных частиц в подложку, так и высокой скоростью диффузии частиц пленки по радиационным дефектам поверхностного слоя подложки. Наличие ПС приводит к высокой адгезии нанопленки. Например, адгезия Al на SiO<sub>2</sub> в 10 раз выше, чем для технологии термического нанесения.

Преимущества технологии ИПН:

- низкие температуры процесса (50–200 °С);
- возможность получения сплошных и высоко адгезионных нанопокровтий;
- сохранение стехиометрического исходного материала при напылении;
- достаточно высокая производительность (20–100 нм/мин)

Недостаток:

- возможность загрязнения нанопокровтий рабочим газом при проведении процесса в условиях повышенного парциального давления ( $P > 10$  Па).

# Технологии получения пленочных наноматериалов

## Разновидность технологии ИПН

Ионно-плазменное напыление находит широкое применение не только при создании токопроводящих нанопленок, но и диэлектрических и вспомогательных нанопокровов.

Для этого используют *физико-химическую технологию реактивного ионно-плазменного напыления (РИПН)* – как разновидность ИПН, в которой плазму создают в смеси инертного и химически активного (реактивного) газов. В этом случае подложку кроме распыленных частиц и частиц инертного газа бомбардируют химически активные частицы (ХАЧ) или же ХАЧ образуются на самой подложке при диссоциации адсорбированных молекул реактивного газа под стимулирующим воздействием плазмы. Такие условия процесса приводят к формированию нанопленок химических соединений материала мишени: оксидов, нитридов или карбидов.

Так, для осаждения по технологии РИПН барьерного нанослоя на основе нитрида титана используют в качестве рабочего газа смесь Ar и N<sub>2</sub>. При этом получают нанопленки TiN с существенно более низким удельным сопротивлением (20–80 мкОм·см), чем у нанопленок Ti. Состав покрытия регулируют путем изменения парциального давления азота, а размер зерен – путем изменения температуры подложки. На удельное сопротивление нитридов сильное влияние оказывает состав реактивного газа. Например, наличие кислорода (до 1 %) в газовой смеси (Ar + N<sub>2</sub>) приводит к увеличению удельного сопротивления TiN в 10 раз.

# Технологии получения пленочных наноматериалов

**3. Технология ионно-лучевого напыления (ИЛН)** основана на физическом распылении поверхности мишени ионным лучом (пучком частиц) инертного газа (Ar), создаваемым автономным ионным источником (ионной пушкой), и осаждении в вакуумной камере ( $P = 10^2\text{--}10^{-1}$  Па) распыленного материала на подложку в виде нанопленки.

Поток частиц с контролируемой энергией создают в аргонной среде ионной пушки низковольтным разрядом (40–80 В) между термоэлектронным катодом и цилиндрическим анодом. Магнитное поле, создаваемое в области анода, увеличивает вероятность столкновения электронов с молекулами газа. Система фокусировки и ускорения позволяет получать практически моноэнергетические пучки ионов (с энергией ~500–1000 эВ и плотностью тока 1–10 мА/см<sup>2</sup>). Для исключения рассеяния ионного луча на частицах остаточной атмосферы и существенного улучшения свойств пленок (по сравнению с технологией ТВН) процесс проводят при давлении не больше  $10^{-2}$  Па.

Недостатки технологии ИЛН – высокие радиационные повреждения подложки, низкие скорости осаждения.

Для получения нанопленок оксидов или нитридов ионное распыление может быть реализовано в присутствии O<sub>2</sub> или N<sub>2</sub>. Изменяя концентрацию реактивного газа можно менять состав и структуру тонких пленок.

# Технологии получения пленочных наноматериалов

Схема реализации метода ИЛН представлена на рис. 6.

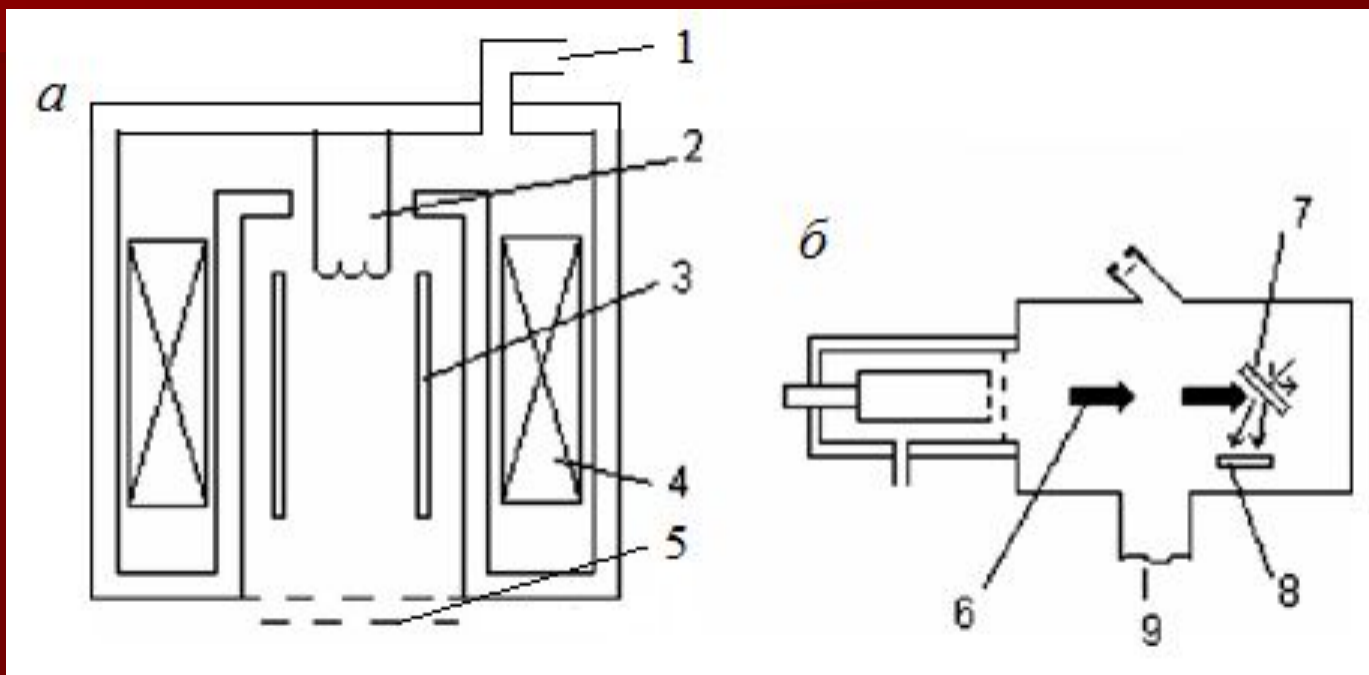


Рис. 6. Схема ионной пушки (а) и ионно-лучевого напыления (б):  
1 – ввод рабочего газа; 2 – термоэлектронный катод; 3 – анод; 4 – магнитная система; 5 – ускоряющий электрод; 6 – пучок ионов; 7 – распыляемый материал; 8 – подложкодержатель; 9 – присоединение к вакуумной системе



# Технологии получения пленочных наноматериалов

4. *Технология молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ)* основана на взаимодействии нескольких молекулярных пучков (потоков атомов) элементарных компонентов в условиях высокого вакуума ( $P = 10^{-6}$ – $10^{-7}$  Па) с предварительно подготовленной, очищенной и нагретой (до 550–750 °С) монокристаллической подложкой с образованием необходимого пленочного наноматериала.

*Технология МЛЭ позволяет вести вакуумное осаждение из двух или большего числа источников пучков, причем эти источники можно использовать одновременно (для синтеза однослойной нанопленки химического соединения) или последовательно (для синтеза слоистых пленочных гетероструктур, являющихся основой многих приборов микроэлектроники).*

Источниками потока атомов являются эффузионные ячейки – замкнутые сосуды, содержащие тигель с испаряемым веществом, и имеющие отверстие определенного диаметра. Диаметр отверстия подбирают таким образом, чтобы в каждой эффузионной ячейке поддерживалось равновесное для данной температуры давление, а истечение (эффузия) из ячейки протекало без столкновения истекающих молекул друг с другом. Поэтому *обязательными условиями технологии МЛЭ являются использование высокого вакуума и малое расстояние от источника потока атомов (эффузионного отверстия) до подложки.*

# Технологии получения пленочных наноматериалов

## К технологии МЛЭ

Для осуществления процесса МЛЭ на предварительно подготовленную и нагретую подложку направляют потоки отдельных атомов (рис. 7, а). Скорости потока каждого сорта атомов (скорости эффузии из ячеек, моль/с) можно регулировать независимо:

$$v = 3,5 \cdot 10^{24} PS / (M^{0.5} T^{0.5}),$$

где  $P$  – давление в ячейке, Па,  $S$  – площадь сечения эффузионного отверстия ячейки, см<sup>2</sup>,  $M$  – молярная масса, г/моль,  $T$  – температура ячейки, К.

Достигая поверхности подложки, атомы упорядочиваются (рис. 7, б), образуя необходимую пленочную наноструктуру.

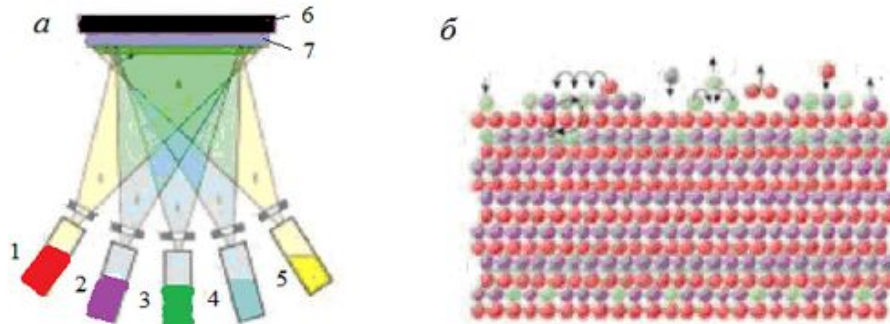


Рис. 7. Схема потоков отдельных атомов (а) и роста пленочного наноматериала (б) в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии: 1, 2 – испарители с компонентами подложки; 3, 4, 5 – испарители с легирующими элементами; б – нагретая подложка; 7 – пленочный наноматериал

Идеальные условия для МЛЭ создаются в случае когерентной границы между двумя монокристаллическими фазами (полное соответствие межатомных расстояний в одной и другой фазе).

Большую роль в технологии МЛЭ играет угол падения пучка атомов на подложку, поскольку от этого угла зависит коэффициент адгезии.

# Технологии получения пленочных наноматериалов

## К технологии МЛЭ

**Схема реализации метода МЛЭ** представлена на рис. 8.

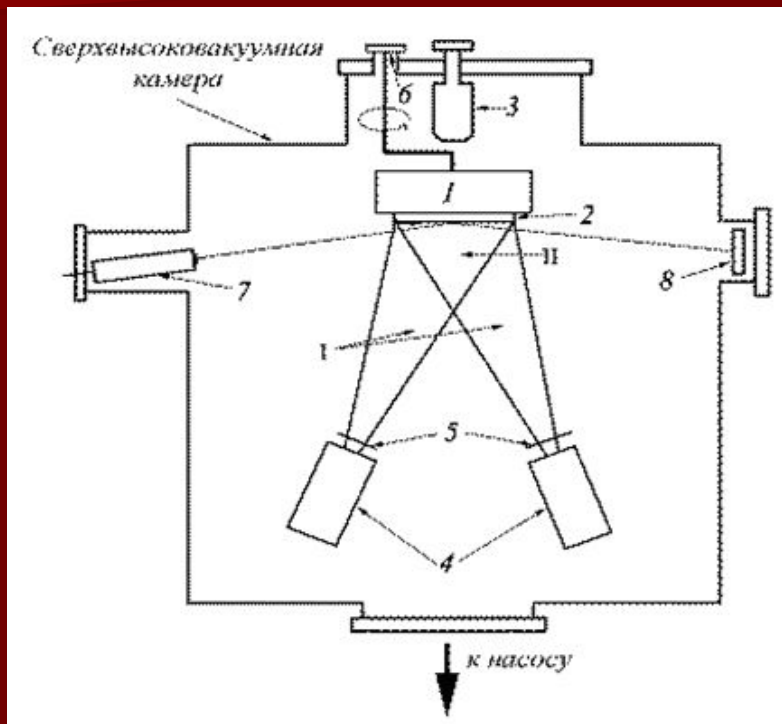


Рис. 8. Схема расположения элементов вакуумной камеры для осуществления молекулярно-лучевой эпитаксии: 1 – держатель подложки с нагревателем; 2 – подложка; 3 – масс-спектрометр; 4 – эффузионные ячейки; 5 – заслонки; 6 – манипулятор; 7 – электронная пушка; 8 – люминесцентный экран; I и II – молекулярные пучки (потoki) отдельных атомов



# Технологии получения пленочных наноматериалов

## К технологии МЛЭ

Пример процесса МЛЭ иллюстрируется рис. 9, на котором приведены основные элементы для получения полупроводниковой нанопленки арсенида галлия GaAs, а также слоистых пленочных наноматериалов на его основе.

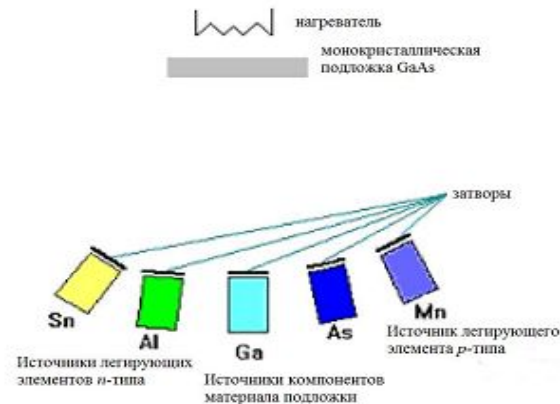


Рис. 9. Схема молекулярно-лучевой эпитаксии на подложку из арсенида галлия

Для обеспечения высокой скорости переноса атомов веществ на подложку в условиях высокого вакуума:

температуру нагревателей для каждого источника пучков (элемента пленочного наноматериала) подбирают таким образом, чтобы давление пара каждого из испаряемых веществ в несколько раз превосходило равновесное с подложкой давление пара;

нагреватели располагают так, чтобы максимумы распределений интенсивности пучков пересекались на подложке.

Для получения слоистых пленочных наноматериалов с разным химическим составом нанофаз (полупроводниковых сверхрешеток) требуется:

тщательный подбор температуры нагревателей и подложки;

использование затворов (заслонок), расположенных между нагревателем и подложкой (рис. 9), позволяющих управлять процессом эпитаксиального наращивания (резко прерывать или возобновлять попадание любого из молекулярных пучков на подложку).

# Технологии получения пленочных наноматериалов

## К технологии МЛЭ

### Преимущества технологии МЛЭ:

возможность получения тонких (от 1 нм до 10 мкм) однородных монокристаллических слоев любого типа проводимости и удельного сопротивления, на любых кристаллических подложках, из материалов с различными температурами испарения;

возможность легирования монокристаллических нанослоев непосредственно в процессе их выращивания;

возможность выращивания композиционных (слоистых) пленочных наноматериалов, в т.ч. сверхтвердых нанопокровов и полупроводниковых пленочных гетероструктур (с резкими *p-n*-переходами).

### Недостатки:

дороговизна процесса;

высокая температура процесса (550–750 °С, более высокая по сравнению температурой получения нанопленок другими газофазными методами);

сложность реализации технологии.

# Технологии получения пленочных наноматериалов

## Химические газофазные технологии

5. **Технология химического осаждение из газовой фазы** основана на том, что поток осаждаемых на подложку наночастиц образуется в результате химических реакций в парах жидкости (газе) или их смеси, протекающих при высокой температуре над поверхностью подложки. Условия протекания реакции (температура подложки и газа, тип газа или состав смеси, давление, расход газа и т. д.) подбираются таким образом, что продукты реакции, за исключением осаждаемых наночастиц, не адсорбируются на подложке и откачиваются из реакционной камеры. Температура осаждения может быть в пределах 400–1200 °С, а давление – в диапазоне от атмосферного до 7 Па. Нахождение подложки в потоке реагирующего газа при таких относительно высоких давлениях предопределяет основное преимущество технологии химического осаждения – комфортность нанопокрытия (т. е. воспроизводимость рельефа поверхности). Основной недостаток технологии химического осаждения – необходимость высокотемпературного нагрева пластин. Высокая температура, необходимая для реализации пиролитических реакций, не позволяет проводить осаждение пленок на ранее осажденные слои или пленочные структуры, если последние могут расплавиться, вступить в химическую реакцию или диффундировать в осаждаемую пленку. Например, невозможно осаждать нанопленку  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на Al.

# Технологии получения пленочных наноматериалов

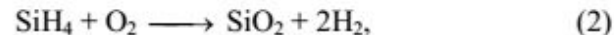
## К технологии ХОГФ

Наиболее часто химическое осаждение из парогазовой фазы используется для нанесения нанопленок Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, а также нанопленок металлов W, Mo, Ta, Ti.

Нанопленки кремния осаждают путем пиролиза силана при температуре 600–650 °С в реакторах, работающих при пониженном давлении 20–130 Па. Скорость осаждения лежит в интервале 10–20 нм/мин. Протекающая при этом химическая реакция в обобщенном виде выглядит следующим образом:

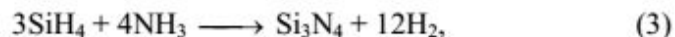


Нанопленки двуокиси кремния формируют за счет реакций между силаном и кислородом при низких температурах (ниже 500 °С), :

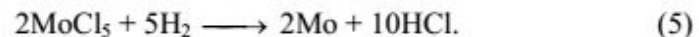


Осаждение может быть осуществлено при атмосферном или пониженном давлении. Основное преимущество реакций силана с кислородом – низкая температура осаждения, что позволяет осаждать нанопленку поверх алюминиевой металлизации. Следовательно, эти пленки могут быть использованы для пассивирующих покрытий на поверхности готовых приборов или для диэлектрической изоляции многослойной алюминиевой металлизации.

Нанопленки нитрида кремния осаждают за счет реакции между силаном и аммиаком при атмосферном давлении и температуре 700–900 °С:



Нанопленки металлов осаждают путем восстановления солей металлов водородом при температуре 500–800 °С:





# Технологии получения пленочных наноматериалов

6. *Технология плазмохимического напыления (ПХН)* основана на инициировании и стимулировании химических реакций в условиях среднего вакуума ( $P = 10^{-1} - 10^2$  Па) и потока низкотемпературной ( $T = 180 - 380$  °С) плазмы (создаваемой дуговым разрядом или ВЧ- и СВЧ-разрядом в разряженной газовой среде аргона, азота, аммиака или углеводорода). Генерируемые плазмой высокоактивные частицы взаимодействуют в реакторе с введенными в плазму реагентами и образуют наночастицы, которые в результате адсорбции в зоне охлаждения на подложке и последующей их диффузионной перегруппировки и взаимодействия с другими адсорбированными частицами, образуют пленочный наноматериал.

Низкие температуры подложки при ПХН позволяют осаждать нанопленки на любые ранее созданные структуры и устранять возникновение внутренних механических напряжений в нанопленках при их последующем охлаждении. При большей температуре ( $T = 300 - 380$  °С) получают пленки с меньшей концентрацией захваченных продуктов реакции, большей плотностью и более однородным составом.

# Технологии получения пленочных наноматериалов

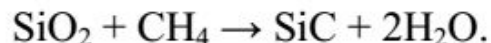
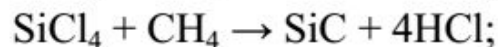
## К технологии ПХН

Технологии плазмохимического осаждения широко используют для получения сверхтвердых нанопленок нитридов и карбидов.

Нанопленки нитридов получают путем взаимодействия хлоридов с аммиаком (или смесью азота и водорода) в СВЧ (2–8 ГГц) -плазме:



Нанопленки карбидов металлов (а также бора и кремния) обычно получают взаимодействием хлоридов соответствующих элементов (иногда оксидов) с метаном (или другим углеводородом) в аргоновой ВЧ (1–27 МГц)-или дуговой плазме:



Достоинства технологии ПХН:

низкие температуры процесса (180–380 °С);

достаточно высокая производительность (5– 50 нм/мин).

Недостаток:

дороговизна процесса