

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

А.В. Ершов, А.В. Нежданов

**НАПЫЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ИСПАРЕНИЕМ
В ВАКУУМЕ**

Практикум

Рекомендовано методической комиссией физического факультета
для бакалавров, обучающихся по следующим направлениям подготовки:

210100 – «Электроника и наноэлектроника»,
222900 – «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Нижегород

2020

УДК 621.382

ББК 22.379

E80

E80 Ершов А.В., Нежданов А.В. НАПЫЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ИСПАРЕНИЕМ В ВАКУУМЕ: Практикум. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2020. – 30 с.

Издание представляет собой описание лабораторной практикума по базовому курсу «Физико-химические основы технологии микро- и наноструктур». Методический материал включает краткую характеристику методов тонкопленочной технологии, общие особенности оборудования для получения тонких пленок в вакууме, физические аспекты процессов испарения веществ в вакууме, даны указания к выполнению лабораторного практикума. Практикум предназначен для бакалавров физического факультета ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки: 210100 – «Электроника и микроэлектроника», 222900 – «Нанотехнологии и микросистемная техника».

Рецензент: зав. лабораторией
НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
д.ф.-м.н., с.н.с. Шенгуров В.Г.

Ответственный за выпуск:
председатель методической комиссии ФзФ ННГУ,
к.ф.-м.н., доцент Перов А.А.

УДК 621.382

ББК 22.379

© Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК ФИЗИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ.....	6
2. ИСПАРЕНИЕ	7
2.1. ВАРИАНТЫ НАГРЕВА В МЕТОДАХ ИСПАРЕНИЯ.....	8
2.2. СКОРОСТЬ ИСПАРЕНИЯ И ДАВЛЕНИЕ ПАРОВ	12
2.3. О МЕХАНИЗМАХ ИСПАРЕНИЯ	14
2.4. ОБ ИСПАРЕНИИ СОЕДИНЕНИЙ И СПЛАВОВ	17
3. ПЕРЕНОС ВЕЩЕСТВА ОТ ИСТОЧНИКА К ПОДЛОЖКЕ	19
3.1. АКТУАЛЬНОСТЬ ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ	19
3.2. ВЛИЯНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПАРОВ	20
4. КОНДЕНСАЦИЯ ПАРОВ НА ПОДЛОЖКЕ	24
5. ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК	25
6. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	27
6.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	28
6.2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	28
6.3 УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА	29
ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	30

ВВЕДЕНИЕ

Пленочные технологии являются ключевыми во всех процессах изготовления современных электронных устройств. Их применяют для получения пленок металлов, полупроводников и диэлектриков, а также для формирования пленок разной структуры: аморфной, поликристаллической или монокристаллической. В современном планарном КМОП-процессе эти технологии повышают функциональную и экономическую эффективность, надежность и миниатюризацию пассивных и активных элементов.

Следует различать термины «толстые» и «тонкие» пленки, имеющие «технологическое» происхождение. Пленки толщиной более 5 мкм, характерные для техпроцесса трафаретной печати [1, 2], называются *толстыми*. *Тонкие* пленки имеют толщину порядка нескольких единиц микрон и менее. К *ультратонким* пленкам относятся слои, имеющие толщину менее и порядка единиц нанометров.

Методы получения тонких пленок твердотельных материалов в технологии микро-, наноэлектроники и микросистемной техники можно разделить на три группы: *физические, химические и физико-химические*. В основе физических методов лежат физические процессы, связанные, например, с фазовыми переходами (испарение, конденсация). Химические методы обязательно используют химические реакции (окисление, восстановление и т.п.). Физико-химические методы используют и физические, и химические процессы.

Методы испарения и ионно-плазменного распыления относятся к группе *физических* методов осаждения пленок. Множество вариантов *химического* осаждения из паровой (газовой) фазы (ХОГФ) относится к группе химических методов. Типичными примерами группы *физико-химических* методов могут служить «реактивные» ионное распыление и испарение в разреженных средах с газообразными реагентами (водород, кислород, азот и другие). Основные отличия физических методов от химических заключаются в следующем. *Во-первых*, в качестве источника

используются твердые или расплавленные вещества, в отличие от газообразных в ХОГФ. *Во-вторых*, физические механизмы (испарение или распыление при столкновении) используются для создания паровой среды в разреженной (вакуумной) остаточной атмосфере. *Третье отличие*, – это отсутствие химических реакций в газовой фазе и на поверхности подложки.

Процесс осаждения термическим испарением в вакууме состоит в управляемом переводе атомов из нагретого источника на расположенную на некотором расстоянии подложку, с *атомистическими* образованием и ростом на ней пленки. Тепловая энергия в источнике передается атомам пленкообразующего вещества в жидкой либо твердой фазе, так что его температура повышается до уровня эффективного испарения или возгонки. Испарение отличается от ионно-плазменного распыления тем, что атомы выбиваются с поверхности источника, обычно находящимся при комнатной температуре, за счет воздействия газообразных ионов.

Данный практикум имеет целью практическое освоение студентами физических процессов, лежащих в основе технологических методов получения тонких пленок методом испарения в вакууме.

1. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК ФИЗИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ

При нанесении тонких пленок в вакууме одновременно протекают три основных процесса: генерация направленного потока частиц испаряемого вещества; пролет их в разреженном пространстве от источника к подложке; осаждение (конденсация) частиц на поверхности с образованием слоев.

В связи с этим, технологические установки физического осаждения должны обеспечивать оптимальность действия указанных процессов для формирования пленок в вакууме с заданными свойствами. Независимо от конкретного назначения, конструктивно установка осаждения состоит из следующих основных частей: вакуумной камеры, системы вакуумной откачки для обеспечения необходимого разрежения; источника потока частиц пленкообразующего материала (ПОМ); нагреваемого держателя подложек, позиционирующего ввод подложек в зону осаждения. Типовую установку осаждения пленок в вакууме можно представить схемой, как на рис. 1.

Установка имеет стальную каркасную стойку 1, на которой установлена вакуумная (часто называемая, – рабочая) камера 2 с источником 3 пленкообразующего материала (ПОМ). Подложки 4 расположены на вращающемся держателе 5, оснащенный нагревателем 6. В дополнительных блоках и стойках установки обычно располагаются системы электропитания, управления и контроля параметров процесса роста и самой пленки. Рабочая камера 2 представляет собой цилиндрический колпак, как правило, из нержавеющей стали, с уплотнительной дверцей для обеспечения доступа к внутрикамерному (или подколпачному) устройству. В камере должны быть предусмотрены системы: напуска воздуха 7, напуска реакционного газа 8, контроля толщины 9, контроля давления остаточной атмосферы и давления паров 10. Осаждаемое вещество из источника 3 переносится в виде газофазного потока на подложки 5. Нагреватель 6 обеспечивает нагрев подложек до необходимой температуры роста пленки. Управляемая с

внешней стойки загораживающая заслонка 11 обеспечивает прерывание процесса осаждения перекрытием потока.

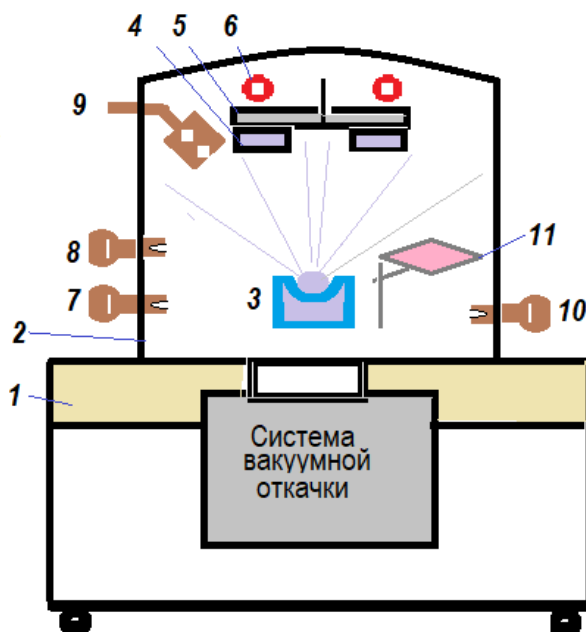


Рис. 1. Схема установки для нанесения пленок.

1 – каркас установки; 2 – рабочая вакуумная камера; 3 – источник пленкообразующего вещества; 4 – подложка; 5 – держатель подложек; 6 – нагреватель подложки; 7 – натекаТЕЛЬ воздуха; 8 – регулятор подачи реактивного газа; 9 – датчик скорости и/или толщины пленки; 10 – датчик вакуума; 11 – поворотная заслонка.

В технологии приборов микро- и нанoeлектроники при получении тонких пленок в вакууме наиболее часто используют два метода генерации потока частиц напыляемого материала: термическое испарение и ионное (ионно-плазменное) распыление (рис. 2), относящиеся к физическим методам нанесения тонких пленок. Практическое изучение методов формирования пленок ионно-плазменным распылением, на примере магнетронного распыления, студентам предлагается освоить в рамках отдельного практикума [2].

2. ИСПАРЕНИЕ

Кратко рассмотрим первый из указанных процессов – генерацию направленного потока частиц испаряемого вещества для методов физического осаждения тонких пленок.

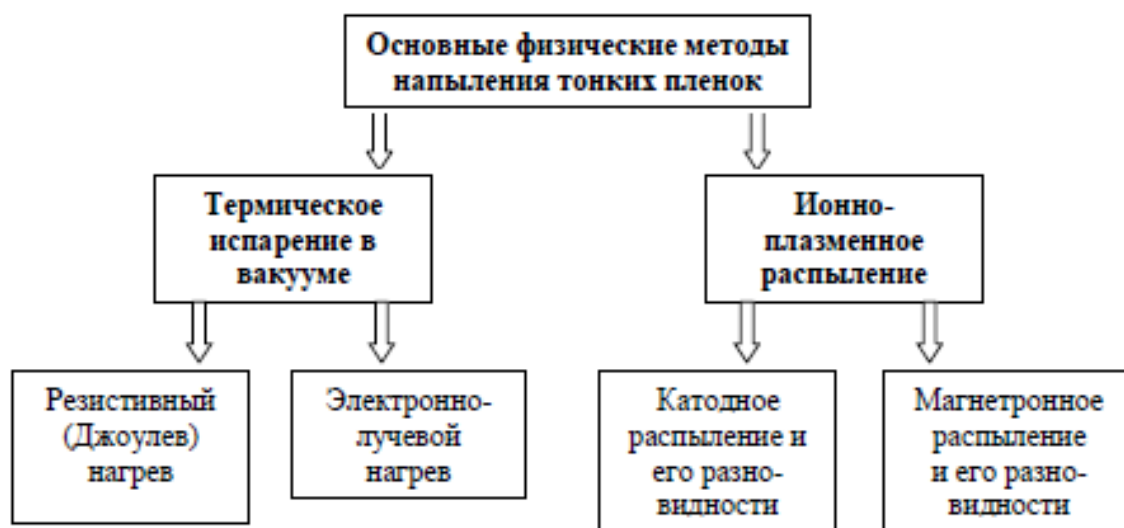


Рис. 2. Наиболее распространенные физические методы получения тонких пленок

2.1. ВАРИАНТЫ НАГРЕВА В МЕТОДАХ ИСПАРЕНИЯ

Метод *термического испарения* основан на нагреве пленкообразующего вещества, находящегося в специальных испарителях или тиглях, до температуры, при которой начинается заметный процесс испарения. В случае *резистивного* испарения для нагрева вещества используются в основном два типа испарителей: прямонакальные проволочные (или ленточные) испарители, изготовленные из тугоплавких материалов (*прямой разогрев*), и керамические тигли, нагреваемые внешним спиральным нагревателем (*косвенный разогрев*). В этих случаях ПОМ находится в контакте с испарителем (тиглем), и разогрев происходит под действием джоулева тепла, возникающего при пропускании тока через проволочный или ленточный нагреватель [3, 4].

Для легкоплавких диэлектриков-фторидов распространен *испаритель с радиационным нагревом* [5], когда над указанным материалом устанавливается ленточный Та- или W-нагреватель и его ИК-излучение, при пропускании большого тока, разогревает испаряемый ПОМ.

Для получения металлических пленок бывает удобно использовать испаритель с индукционным разогревом испаряемого материала [4, 6]. Тигель с ПОМ располагается как сердечник индукционной катушки

(индуктора), подключенной к генератору с частотой в диапазонах 1-66 кГц или 0.44-1.76 МГц [6]. Индуктор генерирует переменное магнитное поле, индуцирующее вихревые токи Фуко в корпусе тигля (косвенный разогрев), если он выполнен из проводящего материала, или непосредственно в проводящем испаряемом материале, если тигель из диэлектрика (прямой разогрев). Вихревой ток обеспечивает джоулев нагрев тигля (или ПОМ) до необходимой температуры. Для напыления пленок методом испарения с индукционным источником используют вакуум порядка 10^{-5} - 10^{-2} Па и добавление реактивных газов [6].

В *электронно-лучевом испарении* разогрев навески вещества осуществляется электронным сфокусированным лучом высокой плотности (до $\sim 10^3$ - 10^4 Вт/см²). При этом электронный пучок нагревает или непосредственно сам материал (прямой разогрев) или тигель с ним (косвенный разогрев) [1, 3-5].

На рис. 3 приведены некоторые варианты испарителей, применяемых для напыления пленок методами испарения в вакууме.

Отметим более современный метод *импульсного лазерного испарения* (рис. 3д). Луч мощного (~ 0.5 Дж/имп) лазера фокусируется на поверхности мишени-испарителя. Энергия луча поглощается, преобразуется в тепловую, химическую и механическую, вызывая электронное возбуждение атомов мишени, абляцию (отделение вещества от твердого тела), расслоение поверхности и образование плазмы. Метод характеризуется высокой локальной (в области пятна луча) плотностью мощности $\sim 10^9$ Вт/см². Для достижения такой мощности используются твердотельные лазеры на основе алюмоиттриевого граната с неодимом (Nd³⁺:YAG), излучающие на длине волны 1064 нм. Популярны и мощные газовые эксимерные лазеры (ArF, KrF и XeCl) с коротковолновым излучением (≤ 308 нм). В режиме модуляции добротности лазеры обеспечивают ~ 0.5 -1 Дж/импульс при частоте повторения последних, до $\sim 10^2$ Гц. В режиме абляции, пар образует над мишенью направленную струю, состоящего из совокупности разных по

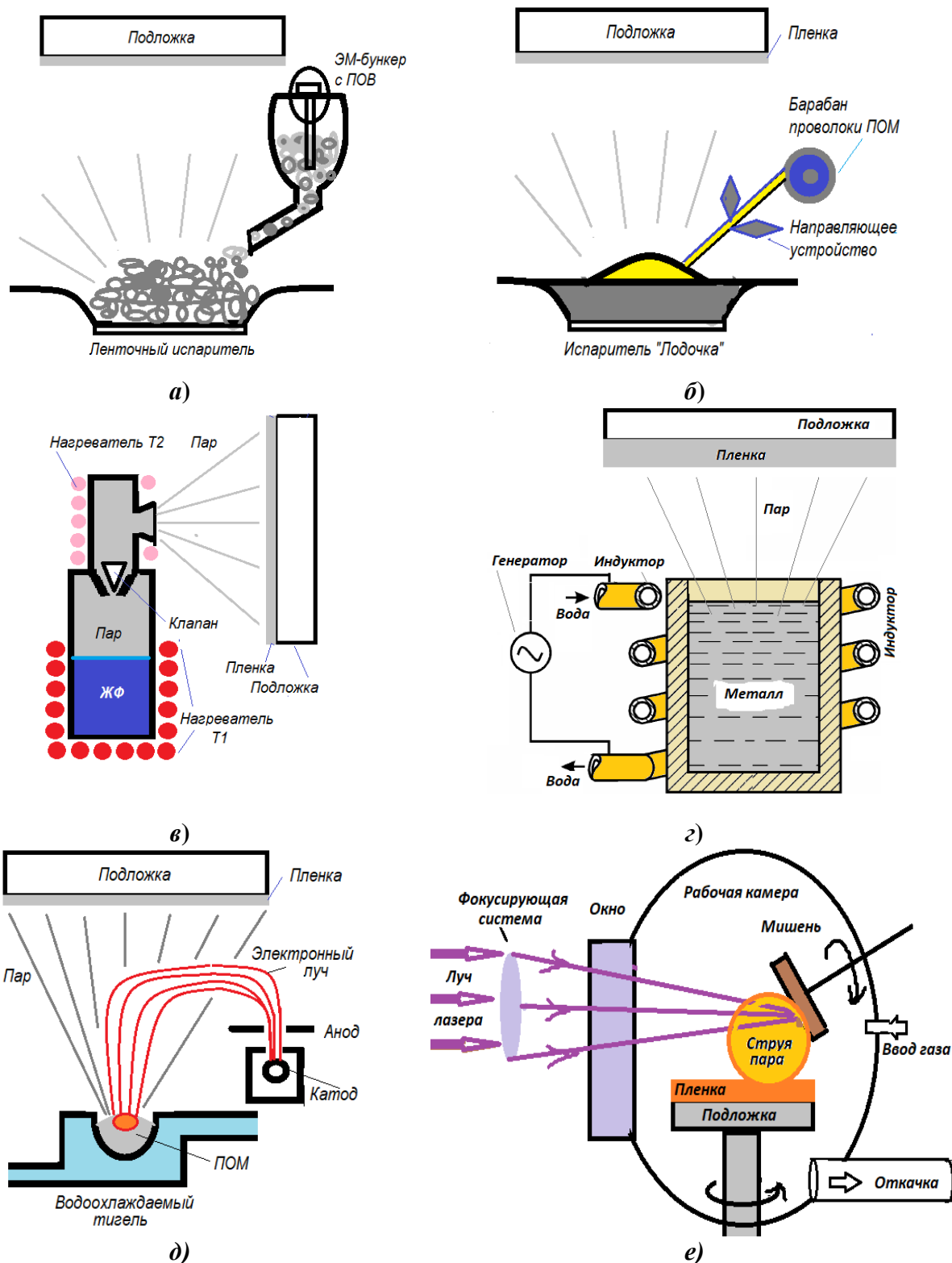


Рис. 3. Варианты конструкций испарителей, используемых для получения тонких пленок в вакууме. Обозначены: а – резистивный испаритель для мелкодисперсных частиц, включая метод «взрывного испарения»; б – резистивный испаритель проволоки дискретного типа; в – вариант эффузионной ячейки; г – испаритель с индукционным нагревом; д – электронно-лучевой испаритель с разворотом луча на 180°; е – вариант нанесения импульсным лазерным физическим осаждением (метод лазерной абляции).

энергии нейтральных атомов, молекул, ионов, электронов, кластеров атомов, микронных частиц и расплавленных капель. Струя конденсируется на подложке и образует пленку. Метод позволяет получать как отдельные слои, так и многослойные структуры. В последнем случае лазерный луч должен испарять несколько источников. Это достигается либо использованием светоделителей или последовательной фокусировкой луча на разных мишенях вращающейся карусели [7, 8, 9, 10].

Все приведенные схемы испарения осуществляются в высоком вакууме (при малом давлении остаточной атмосферы), что соответствует *молекулярному режиму* потоков в газовой среде (см. рис. 4). Напомним из вакуумной техники, что критерием различия режимов газового потока является число Кнудсена, **Kn**, определяемое отношением длины свободного пробега L частиц газа к характерному размеру D камеры (или трубопровода), т.е. $\mathbf{Kn} = L/D$. Таким образом, для *молекулярного потока* $\mathbf{Kn} > 1$, для *промежуточного (переходного)* $1 > \mathbf{Kn} > 0.01$ и для *вязкого* $\mathbf{Kn} < 0.01$ [7].

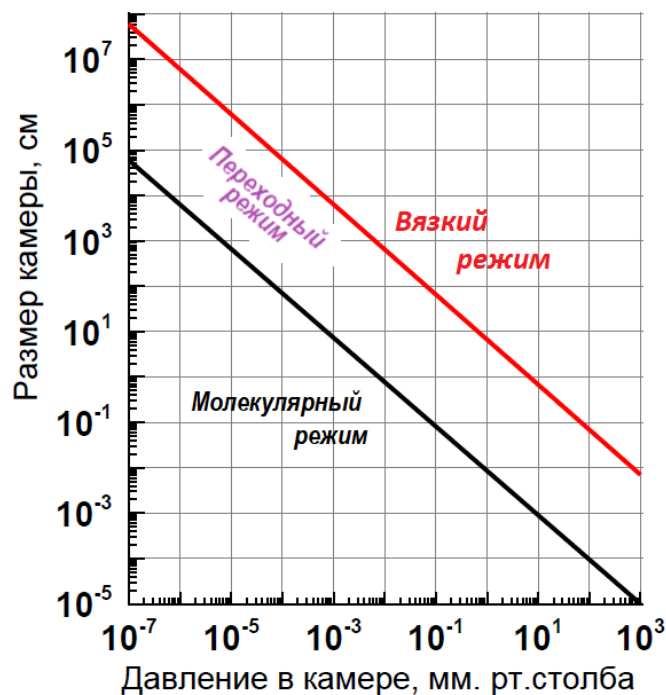


Рис. 4. Режимы газовых потоков как функция размеров рабочей камеры [7].

Хотя в процессе испарения вблизи электронно-лучевой пушки и мишени лазерного испарителя имеются малые локальные области высокого

давления паров в вязком режиме, доминирование молекулярного режима отличает методы испарения от методов физического распыления, где доминируют вязкий и промежуточный режимы.

2.2. СКОРОСТЬ ИСПАРЕНИЯ И ДАВЛЕНИЕ ПАРА

В случае термического испарения при нагревании до определенной температуры вещество испаряется, кинетическая энергия его частиц (атомов или молекул) возрастает, в результате чего увеличивается вероятность разрыва межатомных и межмолекулярных связей. Отрываясь от поверхности, частицы вещества распространяются в вакууме, образуя пар. При этом возможны две схемы испарения: 1) *твердая фаза – жидкая фаза – пар* и 2) *твердая фаза – парообразная фаза*. Вторую схему испарения называют *возгонкой* или *сублимацией*.

Уравнение Герца-Кнудсена [4] дает, что поток Φ_e испаряющихся частиц N_e с поверхности испаряемого вещества площадью A_e за время dt зависит от разницы давления насыщенного пара P_e и гидростатического давления P_h :

$$\Phi_e = \frac{dN_e}{A_e dt} = \frac{\alpha_v N_A (P_e - P_h)}{(2\pi MRT)^{1/2}}, \quad (1)$$

здесь Φ_e – испаряемый поток, и α_v – коэффициент испарения, величина которого лежит между 0 и 1. Если выполняется условие, что $\alpha_v = 1$ и $P_h = 0$, то имеем максимальную скорость испарения, для которой поток Φ_e будет:

$$\Phi_e = 3.513 \cdot 10^{22} \frac{P_e}{\sqrt{MT}}, \quad (2)$$

где Φ_e выражается в [частиц/см²·с], а P_e в [тор], и скорость испарения по массе запишется:

$$\Gamma_e = 5.84 \cdot 10^{-2} P_e \sqrt{M/T}, \quad (3)$$

где Γ_e есть скорость испарения по массе [г·см⁻²·с⁻¹]. Выражение для максимальной скорости испарения (3) было получено Ленгмюром [4] из экспериментов и соответствует испарению со свободной поверхности, т.е. ситуации «невозврата» испаренных частиц на поверхность источника. Такое

испарение называется *ленгмюровским* [4]. При давлении 10^{-2} тор, типовая величина Γ_e для многих элементов приблизительно 10^{-4} г·см⁻²·с⁻¹. Ключевой переменной, определяющей скорость испарения является температура, поскольку она оказывает сильное влияние на давление насыщенного пара. Количество испаренного вещества связано со скоростью по массе и площадью поверхности испарения:

$$M_e = \iint_{tA_e} \Gamma_e dA_e dt. \quad (4)$$

Связь давления паров и температуры для равновесия систем «твердое тело-пар» и «жидкость-пар» по уравнению Клаузиуса-Клайперона [1, 4, 7]:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V}. \quad (5)$$

Изменения энтальпии ΔH и объема ΔV разные для пара (v) и конденсированной фазы (с), в то время как T является температурой перехода. Поскольку $\Delta V = (V_c - V_v)$ и объем пара сильно больше объема конденсированной фазы, то $\Delta V \approx V_v$, и для пара – идеального газа: $V_v = RT/P$ и (4) можно переписать:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2}, \quad (6)$$

Поскольку $\Delta H(T) \approx \Delta H_e$ – молярной теплоте испарения (термодинамической справочной постоянной), то интегрирование, дает

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_e}{RT}\right) \quad \text{или} \quad \ln P = -\frac{\Delta H_e}{RT} + I \quad (7)$$

где I (или $P_0 = \exp I$) - постоянная интегрирования [4].

Для практических целей (7) приближенно описывает температурную зависимость давления пара для многих материалов только в небольшом температурном интервале, для расширения которого надо учитывать температурную зависимость $\Delta H(T)$ [4]. Например, из оценки термодинамических данных [4, 11] давление насыщенного пара Al над расплавом равно:

$$\log P \text{ (мм.рт.ст.)} = -15.993 \cdot T^{-1} + 12.409 - 0.999 \log T - 3.52 \cdot 10^{-6} \cdot T.$$

Для многих других металлов получены данные по давлению паров подобным образом [1,7, 12] и представлены на рис. 5 как функция температуры.

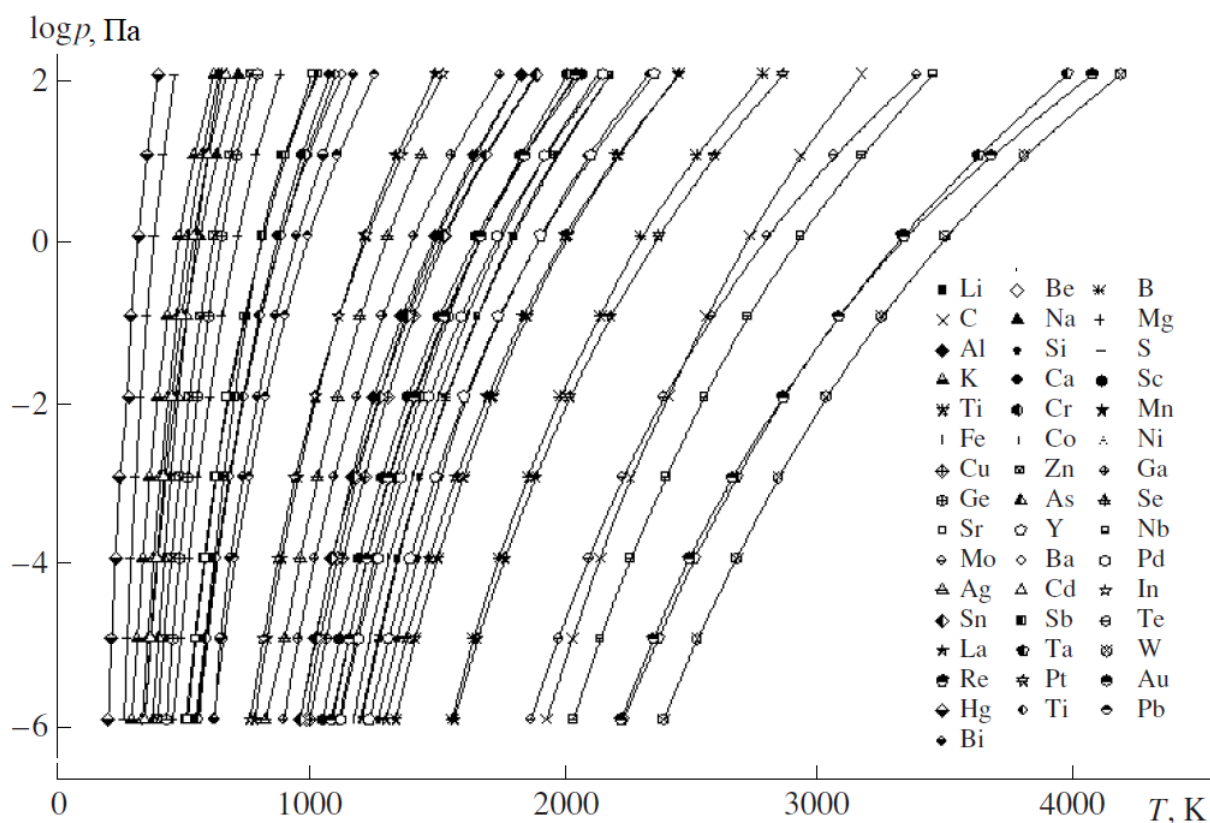


Рис. 5. Давление паров некоторых элементов от температуры [12].

Температура, при которой давление насыщенного пара вещества примерно равно $1 \cdot 10^{-2}$ Тор (≈ 1 Па), называется *температурой испарения*. В [1] этот параметр называется как *условная температура испарения*. В таблице 1 представлены температуры плавления и испарения для некоторых металлов и диэлектрических соединений, там же приведены материалы испарителей.

2.3. О МЕХАНИЗМАХ ИСПАРЕНИЯ

Механизмы испарения обычно рассматривают с позиций двух схем [4, 13, 14]: испарение из жидкого расплава и сублимация с поверхности твердого тела. В случае расплава исходят из модели, что энергия связи всех молекул на поверхности жидкости равны, и все молекулы имеют одинаковую вероятность испарения. Конденсированная фаза рассматривается как система осцилляторов, поверхностные молекулы которой связаны энергией E_e

(энергией испарения). Переход в пар происходит, когда энергия колебаний поверхностных частиц будет равна или выше E_e .

Таблица 1
Параметры некоторых испаряемых веществ.

Материал	Температура, °С		Испаритель резистивный	Тигель для ЭЛИ
	плавления	испарения		
Al	660	996÷1148	W, Ta	Mo, W, Ta
Ge	959	1251	Ta, Mo, W	графит, Al ₂ O ₃
Au	1063	1465	W, Mo	Mo, W, Ta
In	157	952	W, Fe, Mo	Mo, W, Ta
Fe	1535	1447	W	Al ₂ O ₃ , BeO
Si	1410	1343	–	BeO, графит
Cu	1083	1273	Pt, Nb, Mo, Ta, W	Mo, W, Ta
Ni	1455	1510	W	Al ₂ O ₃ , BeO
Sn	232	1189	Mo, Ta	Al ₂ O ₃ , графит
Pt	1774	2090	W+Pt-многожильная проволока	W
Ag	961	1047	Ta, Mo, Nb, Fe, Ni	Mo, Ta
Al ₂ O ₃	2057	1781	W	Cu
Cr ₂ O ₃	2440	1900	W	–
SiO ₂	1610	1725	Ta	Cu
SiO	–	2300	Mo, Ta	–
ZrO ₂	2700			Cu

Оценки вероятности испарения дают [4, 13]:

$$f = \sqrt{\left(\frac{kT}{2\pi m}\right)} \frac{Q_e}{Q_c} \exp\left(-\frac{E_e}{kT}\right), \quad (8)$$

где Q_e и Q_c – статистические функции паровой и конденсированной фаз. В [4, 13] показано, что $\frac{Q_e}{Q_c} \exp\left(-\frac{E_e}{kT}\right) = \frac{N}{V}$, что соответствует статистическому закону действующих масс, а выражение (8) эквивалентно уравнению Герца-Кнудсена для максимальной скорости испарения (1). Простая модель осцилляторов испарения жидкости способна объяснить (1) только для максимальной скорости и $\alpha_v = 1$. Эксперименты показали, что это справедливо для большинства расплавленных металлов, испарение которых происходит за счет обмена одиночных атомов с одноатомным паром [4].

Основной причиной экспериментального наблюдения ситуации, что $\alpha_v \ll 1$, является загрязнение поверхности расплава посторонними примесями.

При испарении с поверхности твердого тела «изотропное» поверхностное испарение по жидкостной модели не может работать из-за развитой морфологии поверхности кристалла. Согласно модели Коссея [4,13,14] (рис.6), вероятность отрыва атома (кубика) с поверхности кристалла будет тем выше, чем меньше связей (плоскостей кубика) атом имеет с соседями.

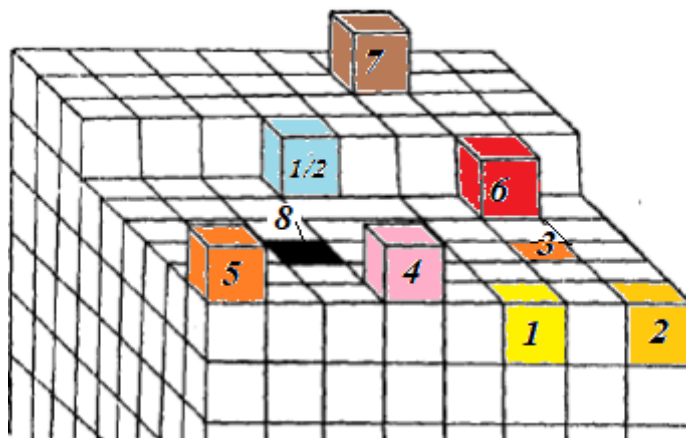


Рис. 6. Простая модель поверхности кристалла по Коссею и Странскому [13]. Обозначения положения атомов: 1 и 2 – на заполненных ребре и углу; 3 – атом в поверхностной плоскости; 4 и 5 – на незаполненных ребре и углу, 6 – на ступени, 7 – атом на плоскости, 8 – вакансия поверхности; 1/2 – в «полукристаллическом» положении.

Тогда минимальная энергия испарения будет необходима для отдельного адсорбированного атома 7 на плоскости, а максимальная для атома 3 – поверхностной атомной плоскости (рис. 6). Удаление остальных атомов, по-видимому, потребует средних, от указанных, энергий испарения. Интересным здесь считается [4,13] «полукристаллическое» положение атомов («1/2»), где атом связан с решеткой 3 связями из шести. Удаление или присоединение таких атомов – обратимые процессы, определяющие рост или испарение кристалла. Найдено, что процесс испарения из этого положения осуществляется через набор последовательных миграционных перемещений (поверхностная диффузия) атомов в положение 6, а затем в 7, откуда и происходит испарение. Более поздние исследования [14] показали, что в

процессе испарения, в отличие от роста (конденсации) важную роль играют не только ступени, но и углы и ребра 1, 2, 3 и 4 (рис. 6), а у поликристаллических ПОМ – ступени на краях кристаллитов, границы зерен, макродефекты, трещины и т.п. Коэффициент испарения с поверхности кристаллических материалов составляет $\alpha_v = 0.33 \div 1.0$ [14].

2.4. ОБ ИСПАРЕНИИ СОЕДИНЕНИЙ И СПЛАВОВ

Металлы и большинство элементарных полупроводников в парообразном состоянии являются одноатомными, за исключение сурьмы, которая «летит» в виде молекул (Sb_2). При интенсивном испарении возможен перенос металлов в виде атомных групп и кластеров.

Для соединений ситуация сильно осложняется. Очень мал набор неорганических соединений ПОМ, которые испаряются без молекулярного изменения. Состав пара обычно отличается от состава исходного твердого или жидкого источника, и стехиометрия пленки отличается от ее источника. Экспериментально установлен широкий набор физико-химических процессов в паре над источником с исходным веществом-соединением [1, 4-7, 14]. Сложность процессов и реакций в парах химических соединений можно проиллюстрировать данными в таблице 2 [7].

Проблемы с нарушением стехиометрии оксидов при напылении их методами испарения могут быть решены применением реактивного испарения в атмосфере кислорода или ионно-ассистированного испарения с ионизаторами кислорода в рабочей камере.

Большинство металлических и полупроводниковых двойных растворов (сплавов) АВ, подобно составляющим их элементам, испаряются атомарно и независимо друг от друга. Однако, из-за разницы химических потенциалов каждого из элементов А и В в паре и в твердом состоянии и зависимой от концентрации А или В, возможно отличие элементного состава пленки от исходного в сплаве. Это отличие есть отклонение от закона Рауля для испарения *идеальных* твердых растворов АВ, указывающего, что

парциальное давление пара чистого элемента над сплавом P_A (или P_B) пропорционально концентрации элемента $x_A \cdot (x_B)$ в нем:

Таблица 2

Некоторые физико-химические процессы в парах и конденсатах ионных соединений

Тип реакции	Химическая реакция *)	Пример соединения	Примечания
Испарение без диссоциации	$\text{MX}_{(т;ж)} \rightarrow \text{MX}_{(г)}$	SiO, B ₂ O ₃ , GeO, SnO, CaF ₂ , MgF ₂	Стехиометрия в пленке сохраняется
Распад (разложение)	$\text{MX}_{(т)} \rightarrow \text{M}_{(т)} + 1/2\text{X}_2_{(г)}$ $\text{MX}_{(т)} \rightarrow \text{M}_{(ж)} + 1/n\text{X}_n_{(г)}$	Ag ₂ S, Ag ₂ Se, полупроводники A ^{III} B ^V	Раздельные испарители (тигли) необходимы для стехиометрической пленки. Обычно пленки обогащены металлом
Испарение с диссоциацией			
Халькогениды	$\text{MX}_{(т)} \rightarrow \text{M}_{(г)} + 1/2\text{X}_2_{(г)}$, здесь X ≡ S, Se, Te	CdS, CdSe, CdTe	Раздельные испарители (тигли) нужны для стехиометрической пленки.
Оксиды	$\text{MO}_2_{(т)} \rightarrow \text{MO}_{(т)} + 1/2\text{O}_2_{(г)}$	SiO ₂ , SnO ₂ , GeO ₂ , TiO ₂ , ZrO ₂	Пленки обогащены металлом. Лучше добавлять в пары O ₂ (реактивное испарение в атмосфере O ₂)

*) М – металл, X – неметалл, O – кислород, (т) – твердая фаза, (ж) – жидкость, (г) – пар.

$$P_A = x_A \cdot P_e^A \quad \text{или} \quad P_B = x_B \cdot P_e^B, \quad (9)$$

где P_e^A и P_e^B – упругости пара отдельных компонентов [1, 4].

Отклонения от закона Рауля для *реального* раствора учитываются дополнительными в (9) *коэффициентами активности* компонента f_A или f_B :

$$P_A = f_A \cdot x_A \cdot P_e^A \quad \text{или} \quad P_B = f_B \cdot x_B \cdot P_e^B. \quad (10)$$

Для идеальных растворов любых концентраций $f = 1$. При $f > 1$ силы взаимодействия между атомами А-В в сплаве слабее, чем одинаковых атомов А-А (или В-В) в чистой фазе и необходимая для испарения энергия ниже [1]. Это приводит не только к отличию концентрации компонент сплава в пленке от исходного, но и к появлению неоднородностей состава по толщине пленки. На практике преодоление трудностей получения пленок однородного состава по толщине решается набором приемов. Один из них, например, для

резистивного испарения – это метод вспышки (или «взрывное» испарение) (рис.3а) [4]. Мелкодисперсные гранулы каждого из компонентов А и В будущей пленки сплава АВ в нужных весовых пропорциях тщательно перемешиваются и загружаются в электромагнитный бункер подачи на испаритель. При напылении гранулы ПОМ сыплются на испаритель, разогретый до и выше T_e высокотемпературного компонента, тогда гранулы А и В испаряются на разных высотах от испарителя, формируя пленку сплава. Другим подходом служит использование отдельных источников испарения для всех вариантов разогрева ПОМ.

3. ПЕРЕНОС ВЕЩЕСТВА ОТ ИСТОЧНИКА К ПОДЛОЖКЕ

3.1. АКТУАЛЬНОСТЬ ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ

При нанесении пленок методами испарения вещество должно испаряться в молекулярном режиме (см. рис.4), при этом создается атомарный (часто называемый, как «молекулярный») пучок, и его частицы перемещаются от источника к подложке прямолинейно, без столкновений и рассеяния. Эти условия достигаются при давлении пара и остаточной атмосферы $P < 10^{-2}$ Па [1], т.е. при невысокой скорости испарения. Когда скорость испарения очень велика и создается давления более $\sim 10^2$ Па, над поверхностью подложек образуется слой пара, затрудняющий процесс переноса вещества к подложке. Здесь создаются условия для переходного или вязкого режимов газовых потоков (см. рис. 4), и длина свободного пробега частиц L будет сравнима и менее расстояния между испарителем и подложкой. Средняя длина свободного пробега определяется через статистику соударений частиц. Число молекул N , перенесенных на расстояние l без столкновений с соседними частицами, дается [1, 4, 5, 7] как:

$$N = N_0 \exp(-l/L), \quad (11)$$

здесь l – расстояние (испаритель-подложка, например); N_0 – общее количество частиц в камере; L – средняя длина свободного пробега частиц.

Согласно кинетической теории газов:

$$L = kT/\pi\delta^2\sqrt{2} \approx 5 \cdot 10^{-3}/P, \quad (12)$$

здесь δ – эффективный диаметр молекул (в см); k – постоянная Больцмана, P – давление пара (в мм. рт. ст.), L – в см.

Как следует из таблицы 3, для выполнения условия $L \gg l$ и создания прямолинейной траектории движения частиц необходимо давление не выше 10^{-4} Тор.

Таблица 3

Зависимость длины свободного пробега частиц от давления остаточных газов в камере

P , Тор	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
L , м	0.05	0.5	5	50	500

Таким образом, при вакууме выше, чем 10^{-4} Тор в рабочей камере с типовым размером около 50 см при испарении достигается режим молекулярного потока паров пленкообразующего вещества при условии, что они не повышают указанное давление.

3.2. ВЛИЯНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПАРОВ

Толщина пленок, полученных методом термического испарения в вакууме, зависит от нескольких факторов: от эмиссионных свойств источника, определяющих распределение потока испаряемого вещества в пространстве, от геометрических размеров и положения подложки относительно источника, скорости и времени испарения осаждаемого вещества.

По эмиссионным свойствам испарители делятся на *точечные* и *поверхностные*. Точечный источник представляет собой малую сферу, диаметр которой значительно меньше расстояния «источник – подложка». Если с единицы поверхности точечного источника вещество испаряется с одинаковой скоростью Γ_e (размерность $[\text{г} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}]$), то количество вещества, проходящего внутри телесного угла $d\omega$ в любом направлении в единицу времени (рис. 7а), можно записать как:

$$d\Gamma = (A\Gamma_e/4\pi) \cdot d\omega, \quad (13)$$

где A – поверхность сферы испарения.

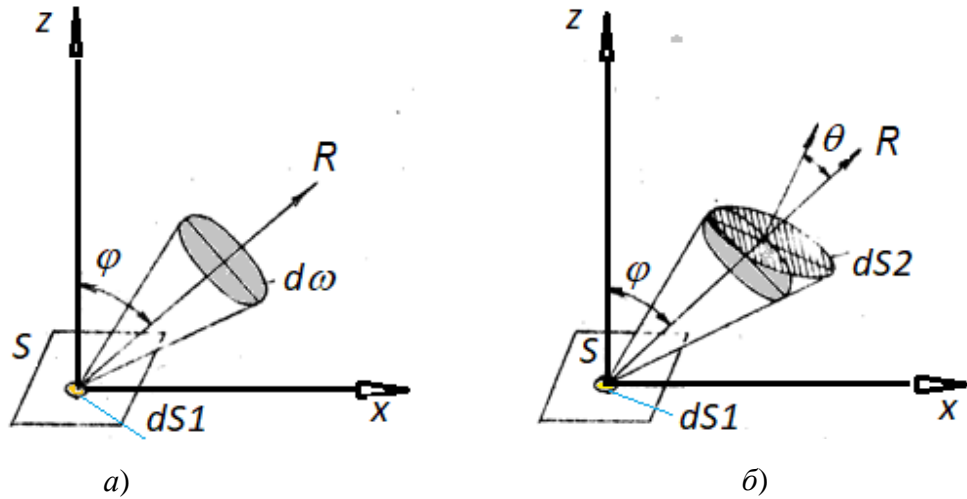


Рис. 7. Модели эмиссионных параметров испарителей. Рисунок *a* – испарение из источника S в телесный угол $d\omega$ по направлению R ; *б* – приемная поверхность dS_2 с нормаль к которой составляет угол φ с направлением потока паров.

Если испаряемое вещество поступает на элемент площади dS_2 подложки, наклоненной под углом θ к направлению потока паров на расстоянии l от точечного источника (рис. 7б), то количество вещества, падающего на dS_2 , представляется как:

$$d\Gamma' = \frac{A \cdot \Gamma_e \cdot \cos\theta}{4\pi l^2} dS. \quad (14)$$

За единицу времени толщина пленки:
$$d = \frac{A \cdot \Gamma_e \cdot \cos\theta}{4\pi l^2 \rho}, \quad (15)$$

где ρ – плотность испаренного вещества, сконденсированного на подложке.

Поверхностный источник – это малая площадка, с единицы площади одной стороны которой в единицу времени в телесный угол $d\omega$, образующим угол φ с нормалью поверхности источника (рис. 7 б) идет испарение:

$$d\Gamma = \left(\frac{A\Gamma_e}{\pi} \right) \cdot \cos\varphi \cdot d\omega. \quad (16)$$

Количество вещества, осаждаемого на элемент площади подложки dS_2 , будет:

$$d\Gamma' = \frac{A \cdot \Gamma_e \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi}{\pi l^2} dS, \quad (17)$$

а толщина пленки за единицу времени:

$$d = \frac{A \cdot \Gamma_e \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi}{\pi l^2 \rho}. \quad (18)$$

На практике, в частности, в планарной технологии микро- и наноструктур тонкие пленки напыляют на плоские подложки (рис. 8).

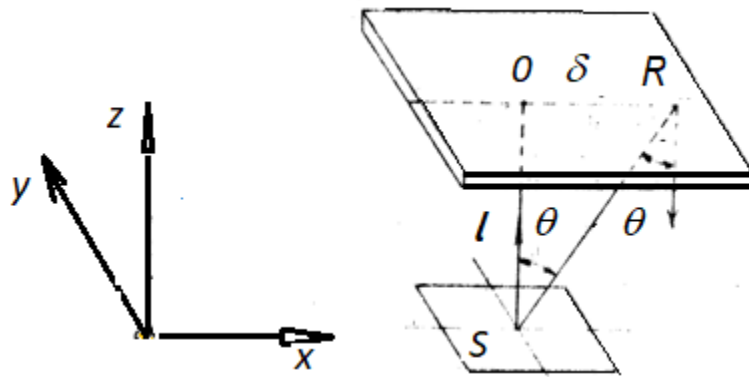


Рис. 8. Испарение с малой площадки S на параллельную ей плоскую поверхность.

Используя приведенные выражения, рассмотрим однородность толщины пленки по направлению x (рис. 8) для некоторых случаев взаимного расположения испарителя и поверхности подложки:

а) *Испарение из точечного источника на плоскую подложку*

Из (15) для данного случая следует, что

$$d = \frac{A\Gamma_e \cdot \cos\theta}{4\pi\rho} = \frac{A\Gamma_e \cdot l}{4\pi\rho r^2} = \frac{A\Gamma_e \cdot l}{4\pi\rho(l^2 + \delta^2)^{3/2}},$$

Толщина в точке O равна: $d_0 = \frac{A\Gamma_e}{4\pi\rho l^2}$, а отношение

$$\frac{d}{d_0} = \frac{l^3}{(l^2 + \delta^2)^{3/2}} = \frac{1}{(1 + (\delta/l)^2)^{3/2}}. \quad (19)$$

б) *Испарение с малой площадки на параллельную ей плоскую подложку*

Толщина пленки d в точке R, согласно (18), равна:

$$d = \frac{A\Gamma_e \cdot \cos^2\theta}{\pi\rho} = \frac{A\Gamma_e \cdot l^2}{\pi\rho r^4} = \frac{A\Gamma_e \cdot l^2}{\pi\rho(l^2 + \delta^2)^2}.$$

Толщина пленки под источником (точка O) равна:

$$d_0 = \frac{A\Gamma_e}{\pi\rho} \cdot \frac{1}{l^2},$$

так что отношение толщин в точках R и O будет:

$$\frac{d}{d_0} = \frac{l^2}{(l^2 + \delta^2)^2} = \frac{1}{(1 + (\delta/l)^2)^2}. \quad (20)$$

Зависимость d/d_0 от δ/l для случаев а) и б) приведена на рис. 9.

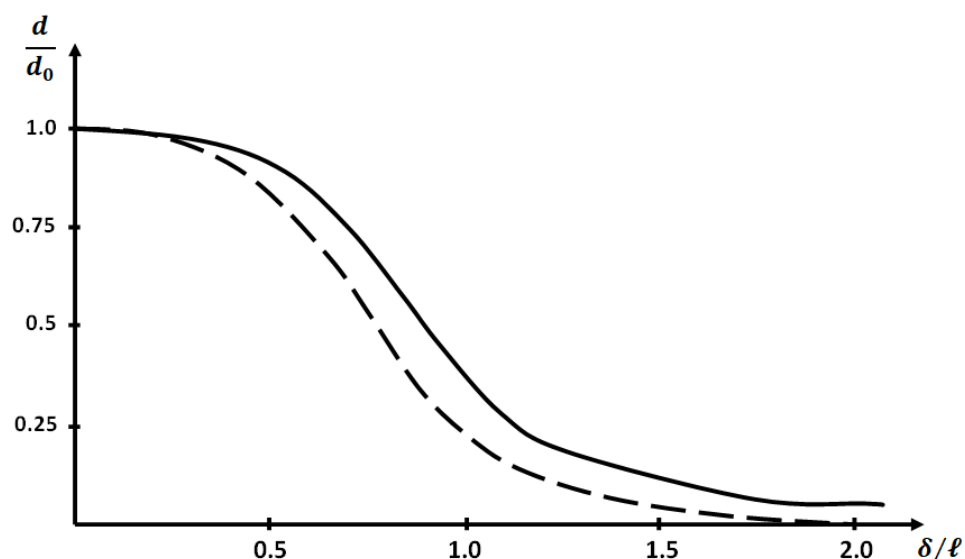


Рис. 9. Распределение толщины пленки на плоской поверхности в случае испарения из точечного (сплошная линия) и из источника с малой площадью (пунктирная линия).

Для *точечного источника* однородные пленки по толщине будут формироваться на *внутренней поверхности сферы*, если источник находится в ее *центре*. Для случая *поверхностного источника* пленка будет однородна по толщине на *внутренней поверхности сферы*, если источник представляет собой *часть поверхности этой сферы*. Это было показано на основании законов косинусов Кнудсенем [4]. Рассмотрим плоскость, проходящую через источник S , точку P поверхности сферы с центром O (рис. 10 а).

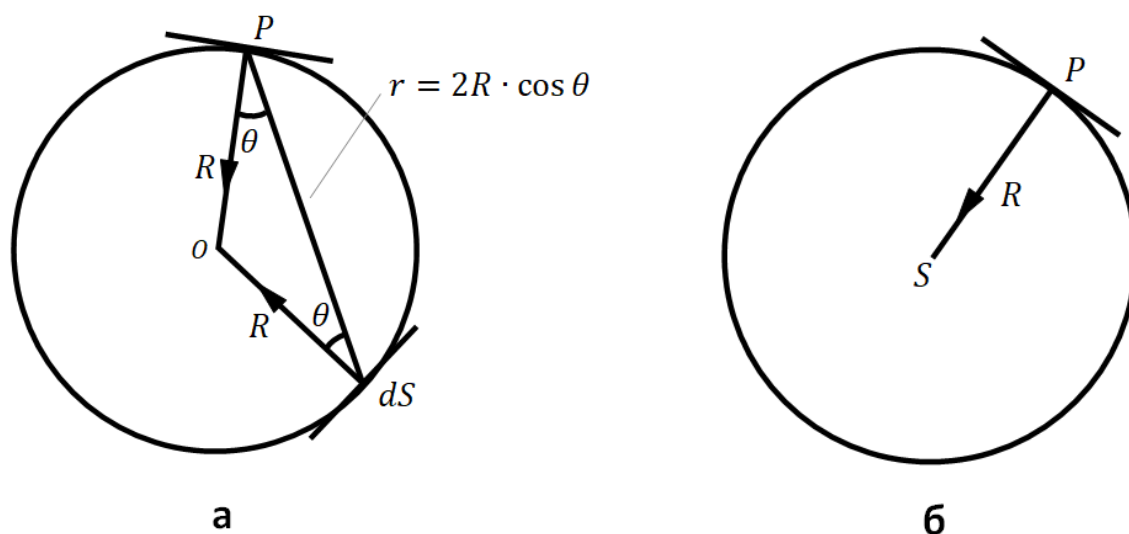


Рис. 10. Испарение на внутреннюю поверхность сферы: а – с поверхностного источника dS , расположенного на сфере; б – из точечного источника, находящегося в центре сферы.

Из (18) толщина в точке P равна:

$$d = \frac{A\Gamma_e}{\pi\rho} \cdot \frac{\cos^2\theta}{r^2},$$

но $r = 2R \cdot \cos\theta$, следовательно, $d = \frac{A\Gamma_e}{4\pi\rho} \cdot \frac{1}{R^2}$. (21)

Таким образом, толщина не зависит от угла θ и, так как $R = \text{const}$, такое расположение дает однородное распределение по толщине.

В случае точечного источника однородная по толщине пленка на внутренней поверхности сферы получится при его расположении в центре сферы и толщина по-прежнему запишется в виде (21).

4. КОНДЕНСАЦИЯ ПАРОВ НА ПОДЛОЖКЕ

Конденсация паров зависит от температуры подложки и плотности молекулярного пучка. Приближаясь к подложке, частицы попадают в поле сил притяжения ее поверхностных атомов. Вместе с тем, на очень близком расстоянии на частицы вещества действуют и силы отталкивания. Испаренные атомы (молекулы), достигшие подложки, могут мгновенно отразиться от нее (упругое столкновение), адсорбироваться и через некоторое время вновь отразиться (реиспарение), а также адсорбироваться и после кратковременной миграции по поверхности (поверхностной диффузии) могут остаться на ней, конденсироваться. Если энергия связи частиц пара с атомами подложки больше средней энергии атомов подложки, они конденсируются или, в противном случае, – отражаются от нее.

Температура подложки, выше которой все частицы пара ПОМ отражаются от ее поверхности, и образования пленки не происходит, называется *критической температурой*. Она зависит от физико-химических свойств материала подложки и состояния ее поверхности. *Наименьшая плотность*, при которой частицы пара ПОМ конденсируются на подложке при данной ее температуре, называется *критической плотностью* парового потока. В результате поверхностной диффузии происходит «нахождение»

осаждаемыми молекулами (атомами) мест, соответствующих минимуму свободной энергии системы «частица – подложка», и могут образовываться зародыши новой фазы. Рост зародышей происходит в результате присоединения новых частиц, мигрирующих по поверхности или попадающих на зародыш непосредственно из пространства.

Размер зародыша, при котором он обладает минимальной устойчивостью, называют *критическим*. Зародыш критического размера при удалении даже одной частицы распадается и, наоборот, при добавлении ее становится устойчивым. При росте и объединении зародышей образуются «островковые» структуры, а затем сплошная пленка.

Конденсация вещества на подложке определяется коэффициентом конденсации (аккомодации):

$$a_k = n_k/n_0, \quad (22)$$

где n_0 – количество атомов или молекул, достигших поверхности в единицу времени; n_k – количество адсорбированных на подложке частиц.

Температурой подложки определяется взаимодействие ее поверхности с остаточными (в вакуумной камере) газами (O_2 , H_2 , N_2 , CO_2 и др.), а также интенсивность химического взаимодействия данных газов и материала пленки. При повышении температуры улучшается десорбция, уменьшается газонасыщение, и создаются условия термодинамического равновесия. Обычный интервал используемых температур подложки при получении тонких пленок в вакууме лежит в пределах $20 \div 400$ °С.

5. ОБ ИЗМЕРЕНИИ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Толщина напыляемого слоя относится к основным характеристикам материалов практически любого класса и их методов получения в рамках пленочной технологии. Точное измерение толщины пленки представляет определенные методические трудности, так как плотность, электрическое сопротивление, оптические и другие свойства пленок и массивных образцов

отличаются. Измерение толщины пленок возможно как после, так и в процессе (in situ) их напыления.

Последние методики в настоящее время являются весьма распространенными, и большинство современных вакуумных установок напыления оснащены соответствующими контролирующими системами. К ним относятся фотометрический метод и метод кварцевого резонатора.

Фотометрический метод контроля толщины используется как для непрозрачных, так и для прозрачных в видимом диапазоне света пленок. Суть его сводится к измерению коэффициента пропускания (или отражения) напыляемой пленки на специальный контрольный образец (свидетель, спутник). Понятно, что для непрозрачных пленок данный метод контроля приемлем для малых толщин. Для прозрачных пленок этот метод весьма эффективен, но требует использования монохроматического света, поскольку здесь используется явление интерференции. Подробное описание данного метода представлено в работе [15].

Для измерения толщины пленки из любого материала в процессе осаждения используют метод кварцевого резонатора. Частота колебаний кварцевого кристалла f с массой M линейно меняется с изменением массы осаждаемого материала m .

Сдвиг резонансной частоты

$$\Delta f = fm/M.$$

Зная плотность ρ и площадь S пленки, можно получить выражение для определения ее толщины:

$$d = \frac{m}{S \cdot \rho} \frac{\Delta f}{f}.$$

Выбор частоты зависит от диапазона измеряемых толщин пленок. Для тонких пленок и большой чувствительности используют высокие частоты. Чувствительность кварцевого резонатора оценивается как $m/\Delta f = 10^{-10}$ г/Гц. Применение радиотехнической аппаратуры при $f = 20$ МГц позволяет определить сдвиг $\Delta f = 20$ Гц, что дает возможность измерять приращение

массы порядка 10^{-9} г/см² или 0.01–0.1 нм толщины. Практически точность составляет 2–20 нм. Отметим, что данным методом с довольно высокой точностью можно контролировать скорость роста пленки.

Гравиметрический метод и метод интерферометрии относятся к наиболее часто используемым приемам измерения уже напыленной пленки.

Гравиметрический метод (или метод микровзвешивания) основан на точном взвешивании подложки до и после осаждения пленки. Толщина пленки

$$d = \frac{P_2 - P_1}{S \cdot \rho},$$

где P_1, P_2 – масса подложки без пленки и с ней, соответственно;

ρ – плотность пленки;

S – ее площадь.

Точность определения толщины пленки этим способом зависит, в первую очередь, от чувствительности весов и точности взвешивания, а также от точности определения площади пленки и ее плотности.

6. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Данный практикум имеет целью практическое освоение процессов получения тонких пленок методом испарения на установке вакуумного напыления типа ВУ-1А или ей подобной. По указанию преподавателя студенту предлагается экспериментально получить пленку-образец металла, аморфного диэлектрика или полупроводника заданной толщины и конкретным методом электронно-лучевого или резистивного испарения. Перед проведением эксперимента студент должен произвести необходимые расчеты, определиться с условиями и параметрами проведения процесса осаждения. После получения заданных пленок студент должен экспериментально определить толщину и ее однородность по поверхности пленки, определить среднюю плотность макродефектов, сделать соответствующие расчеты, оценить погрешности результатов измерений.

6.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1. Изучить устройство и принцип действия системы вакуумной откачки используемой установки нанесения тонких пленок.
2. Изучить устройство и принцип действия испарителей установки.
3. Освоить порядок выполнения технологических операций по напылению тонких пленок методом испарения на указанной установке. Испаряемый материал, тип подложки и метод испарения предлагается преподавателем индивидуально.
4. Рассчитать толщину полученной пленки по массе навески.
5. Оценить профиль толщины пленки при заданной геометрии потока паров.
6. Получить необходимую пленку. Измерить ее толщину, оценить скорость напыления. Измерить равномерность пленки по толщине. Экспериментально установить плотность микродефектов пленки. Проанализировать полученные данные. Оценить погрешности всех экспериментальных результатов.

6.2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Краткая характеристика методов получения пленок материалов микроэлектроники. Толстые и тонкие пленки.
2. Физические, химические и физико-химические методы получения пленок. Определения, примеры.
3. Физические методы получения тонких пленок испарением и распылением. Их сравнительная характеристика.
4. Общие особенности оборудования для получения пленок в вакууме.
5. Теоретические аспекты процессов испарения веществ в вакууме. Уравнение Герца-Кнудсена.
6. Применение законов термодинамики и кинетической теории газов для описания закономерностей испарения и конденсации для тонкопленочной технологии.
7. Коэффициенты испарения, конденсации и аккомодации.

8. Уравнение Ленгмюра для скорости испарения. Количество испаренного вещества. Свободное испарение и эффузия.
9. Особенности коэффициентов испарения, конденсации в подходах к экспериментам по испарению Ленгмюра.
10. Особенности испарения соединений.
11. Модель для испарения жидких сплавов. Закон Рауля.
12. Особенности «полукристаллического» положения атомов в модели Косселя-Странского в теории испарения.
13. Распределение потока испаряемых частиц по углам. Закон косинуса.
14. Распределения толщины пленки по поверхности подложки.
15. Условия «геометрии источник-подложка» для получения однородных по толщине пленок в случаях точечного и поверхностного источников.
16. Основные параметры тонких пленок и технологического контроля в тонкопленочной технологии.
17. Методы измерения толщины пленки «in situ» и «ex situ».
18. Характеристика методов создания топологии пленки в процессе и после напыления.
19. Способы создания пленок заданного профиля по толщине.

6.3 УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен носить аналитический характер и состоять из двух частей. Первая часть должна отражать краткие теоретические основы, позволившие получить и произвести анализ экспериментальных результатов, необходимые для проведения эксперимента оценки.

Вторая часть содержит описание результатов по экспериментальному получению образца, по измерениям его макроскопических свойств согласно заданию. Приводятся результаты анализа, оценки, обоснования и объяснения возможных отклонений от ожидаемых результатов. Студент так же должен дать рекомендации по улучшению проведения процесса напыления.

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Парфенов О.Д. *Технология микросхем*. – М.: Высшая школа, 1986. – 269 с.
2. Джоветт Ч.Е. *Технология тонких и толстых пленок для микроэлектроники*. – М.: Металлургия, 1980. – 110 с.
3. Курносков А.И., Юдин В.В. *Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем*. – М.: Высш.шк., 1986.– 368 с.
4. *Технология тонких пленок. Справочник* / Под ред. Л. Майселла, Р. Глэнга. – Т. 1. – М.: Сов. радио, 1977. – 662 с.
5. Холлэнд Л. *Нанесение тонких пленок в вакууме*. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 608 с.
6. Kuzmichev A. I., Tsybulsky L. Yu. Evaporators with Induction Heating and Their Applications / in book: *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials* /Ed. by S. Grundas.– InTech Publisher, 2011.–Chapter 13.– P.269-302. // www.intechopen.com
7. *Materials Science of Thin Films* / 2nd Edition by M. Ohrig.– Academic Press, 2001.– 794 p.
8. Gamaly E.G., A.V. Rode A.V., Luther-Davies B. Ultrafast ablation with high-pulse-rate lasers. Part I: Theoretical considerations // *J. Appl. Phys.* – 1999. – V. 85, N 8. – P. 4213-4221.
9. Rode A.V., Luther-Davies B., Gamaly E.G. Ultrafast ablation with high-pulse-rate lasers. Part II: Experiments on laser deposition of amorphous carbon films // *J. Appl.Phys.* – 1999. – V. 85, N 8. – P. 4222-4230
10. *Laser Ablation and its Applications* / Ed. by C. Phipps. – Springer Science, 2007. – 597 p.
11. Несмеянов Ан. Н. *Давление пара химических элементов*. М.: Изд-во АН СССР, 1961.– 396 с.
12. Universal Temperature Dependence of the Vapor Pressure of Chemical Elements /M. S. Arzhakov, N. A. Aleksandrova, A. E. Zhirnov, et al. // *Dokl. Phys. Chem.* – 2008. – V. 418, part 2.– P. 26–29.
13. Кнакке О., Странски I.N. The Mechanism of Evaporation. // *Prog. Metal Phys.* – 1956. – V.6. – P. 181-235. (перевод: Кнакке О., Странский И. Н. Механизм испарения // *Успехи физ. наук.*– 1959.– Т. LXVIII, вып. 2.– С.261-305).
14. Hirth J.P., Pound G.M. *Condensation and Evaporation. Nucleation and Growth Kinetics*. NY: Pergamon Press Ltd, 1963.– 193 p.
15. Глудкин О.П., Густов А.Е. *Устройства и методы фотометрического контроля в технологии производства ИС*. – М.: Радио и связь, 1981. – 112 с.

НАПЫЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ИСПАРЕНИЕМ В ВАКУУМЕ

Практикум

Авторы:

Ершов Алексей Валентинович
Нежданов Алексей Владимирович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»

603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.