

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАПЫЛЕНИЯ  
ПЛЕНОК И ПЛЕНОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

И.С. Лискер

В настоящее время тонкие пленки различных материалов (металлов, полупроводников и диэлектриков) нашли широкое применение в различных областях науки и техники (физика твердого тела, радиоэлектроника, вычислительная техника и т.д.). Среди известных способов их получения методы испарения в вакууме являются наиболее распространенными [1]. Общая последовательность их получения вне зависимости от метода имеет поэтапно следующий вид. Исходное вещество помещается в камеру (испаритель), геометрическая конфигурация которой в зависимости от условий работы может быть самой различной. Затем испаритель приводится в состояние, при котором происходит испарение исходного вещества (первый этап). Часть вещества из источника испарения 1 (рис. 1), переведенного в парообразное состояние, в виде облака молекул пара 2 на пути к подложке 3 (второй этап) находится некоторое время в вакууме. И, наконец, достигнув подложки (третий этап), конденсируется и образует на ней пленку 4.

Рассматриваемый технологический процесс можно представить в виде некоторой динамической системы получения пленок (С.П.П.), основная цель которой заключается в образовании на подложке пленок с заданными геометриче-

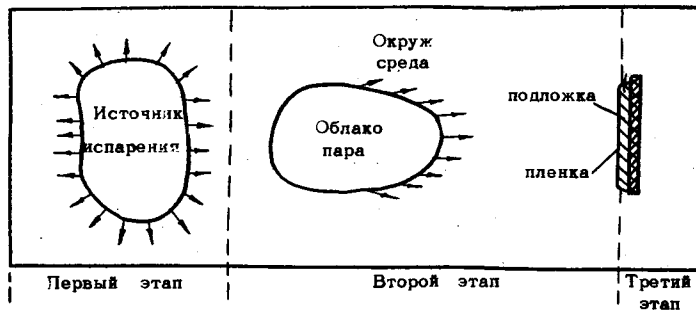


Рис. 1. Структурная схема методов термического испарения.

скими, структурными и физическими свойствами. Эти свойства, определяемые первичными параметрами, зависят от большого количества самых различных факторов внешнего и внутреннего воздействий (как основных, без которых невозможно получить пленки, так и нежелательных, паразитных факторов, препятствующих выполнению этой задачи). К их числу относятся: а) дифференциальные факторы, определяемые параметрами испарителя и условиями получения пара; б) факторы, определяемые параметрами пара в полете; в) состояние и свойства остаточных газов вакуумной камеры и, наконец, г) факторы, определяющие условия образования и свойства пленок на подложке.

В целом первичные параметры будут функционально зависеть от факторов внешнего и внутреннего воздействий.

Поскольку все эти факторы не поддаются всестороннему контролю и управлению, постольку "поведение" (в смысле выполнения основной цели) С.П.П. трудно предсказуемо, т.е. аналогично "поведению" сложной вероятностной системы [2,3]. Именно этим обстоятельством и определяются исключительные трудности получения идентичных по своим свойствам и совершенных по структуре пленок и пленочных приборов. Эта трудность усугубляется еще и тем, что практически не удастся за время испарения провести измерение и управление указанными технологическими факторами в процессе работы С.П.П.

Изложенные соображения показывают, что для преобразования существующего процесса напыления, обладающего, по существ-

ву, неограниченным разнообразием, в динамическую систему получения пленок, поведение которой может быть в значительной мере детерминировано, требуется выполнить по крайней мере три условия:

- 1) максимально уменьшить общее количество дифференциальных факторов внешнего и внутреннего воздействий до физически необходимой величины.
- 2) измерять и контролировать выделенные факторы в процессе проведения технологического эксперимента;
- 3) осуществлять программирование операций технологического эксперимента до начала его проведения и управление ими в процессе проведения.

С этой целью в данной работе обосновывается возможность уменьшения количества факторов, определяющих параметры испарения и потока пара в полете. Оценка роли дифференциальных факторов образования пленок на подложках представляет собой самостоятельное исследование, которое будет рассмотрено нами в последующих работах.

Проиллюстрируем сказанное на примере получения пленок методом термического испарения в вакууме. Существующие термические испарители конструктивно отличаются между собой площадью отверстия  $S_{от}$  для выхода пара и площадью испаряющей поверхности  $S$ . В соответствии с этим в испарителях (рис. 2, а), у

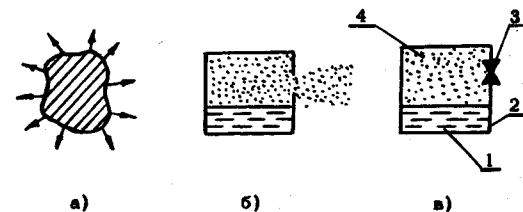


Рис. 2. Типы термических испарителей: "а" и "б" - открытые непрерывного действия при испарениях в телесном угле  $360^\circ$  и  $< 180^\circ$ , соответственно, "в" - закрытый, дискретного действия.

которых  $S_{от} \approx S$ , диаграмма направленности потока пара есть сфера с телесным углом в  $360^\circ$ , а в случае, когда  $S_{от} < S$ , она становится направленной (рис. 2.б).

Общим свойством этих испарителей является: а) непрерывность испарения пара в окружа-

ю щ у ю с р е д у , начиная с момента нагрева исходного вещества. Применение на пути движения пара заслонок, сопел, экранов, диафрагм и т.п. не меняет этого положения, поскольку они прерывают поток пара, уже вылетевшего из испарителя; б) не сохранение давления насыщенного пара над поверхностью испаряемого вещества, соответствующего теоретическому значению его величины при данной температуре испарителя как до начала, так и в процессе напыления; в) непрерывность напыления при получении пленок заданной толщины.

Заслонки и экраны на пути движения пара, выполняя роль селектора, могут регулировать во времени массу (и соответственно толщину) конденсирующегося на подложке пара лишь через значительное время после того, как испаритель будет нагрет до заданной температуры и скорость испарения станет постоянной.

Отметим, что эти же особенности характерны и для большинства известных в настоящее время [4] способов получения пленок из паровой фазы (катодное распыление, методы транспортных реакций, плазменные методы, методы электрического взрыва и т.п.).

Здесь неконтролируемыми параметрами являются: истинная температура, при которой происходит испарение исходного вещества, агрегатный состав пара, давление пара над расплавом, начальное распределение молекул по энергиям и скоростям и т.п. Неконтролируемыми параметрами пара в полете являются: плотность облака пара, его температура, характеристики лучистого теплообмена, энергия и скорость летящих в направлении подложки молекул, реиспарение пара со стенок и взаимные столкновения с остаточными газами вакуумной камеры и т.п. Перечисленные факторы вносят также значительную неопределенность и в установление интервала времени напыления пленок заданной толщины, зависящего от них сложным образом.

Указанные трудности могут быть устранены, если термическое испарение производить из закрытого источника дискретным образом [5,6]. Суть этого способа заключается в том, что исходное вещество I помещают в камеру 2 (рис. 2,в), герметично закрывают затвором 3, нагревают до температуры, при которой устанавливается соответствующее ей давление насыщенного пара 4 исходного вещества, открывают камеру на некоторый фикси-

рованный промежуток времени, в течение которого из нее выбрасывается определенное количество пара в направлении подложки и получают на ней пленку заданной толщины. Если масса выпускаемого пара много меньше массы пара, заключенного внутри замкнутого объема испарителя, то при данной температуре испарителя  $T_u$  за время открытия затвора  $\Delta \tau_u$  давление паров в камере практически не изменится. При этом общее число факторов, относящихся к испарителю, сводится к двум физически необходимым: температуре испарителя и длительности его пребывания в открытом состоянии. В этом случае давление насыщенного пара будет соответствовать его теоретическому значению при данном значении  $T_u$ , а масса вылетающего пара и соответственно толщина пленки на подложке определяться только значениями  $T_u$  и  $\Delta \tau_u$ . Подробное описание закрытых испарителей дискретного действия и особенности их молекулярно-кинетических характеристик даны в работах [7,8].

Рассмотрим теперь вопрос о регулировании параметров пара в полете. Очевидно, что внутри замкнутого испарителя, являющегося изотермической камерой, поведение молекул пара (распределение по энергиям и скоростям) будет определяться только одним параметром — температурой испарителя. Поэтому после открытия затвора облаку пара, вылетающему в сторону подложки, естественно приписать в первый момент времени именно такое же распределение по энергиям и скоростям, как при температуре  $T_u$ . В дальнейшем за время полета это распределение изменится, поскольку имеют место изменение объема, занимаемого паром, теплообмен пара со стенками объема окружающей среды и взаимодействие с остаточными газами вакуумной камеры.

Регулирование теплообмена пара со стенками окружающей среды позволяет изменять его внутреннюю энергию, конденсировать или переохлаждать пар заданным образом еще до осаждения его на подложку. В самом деле, если температура стенок на всем протяжении паропровода, внутри которого движутся частицы, будет фиксированно изменяться и регулироваться, то вполне допустимо, что их энергия может быть при этом значительно, например, уменьшена. Из этого следует, например, такой важный вывод, как возможность регулирования процессов окисления в полете. Насколько нам известно, возможности программного регулирования теплообмена пара в полете еще не использовались для изучения и управления свойствами пленок. Аналитическое

решение вопроса о поведении облака пара в условиях регулирования его теплообмена в полете и связи его параметров с параметрами остаточного газа и параметрами пленки на подложке будет подробно рассмотрено нами в отдельной работе.

Большое значение имеет также вопрос о повышении производительности изготовления пленочных элементов и приборов. Производительность существующих установок невелика [9,10]. Так, известны установки, в вакуумных камерах которых помещают несколько подложек, размещенных либо в одной плоскости, либо во вращающемся диске револьверного типа [10]. Число подложек в них не превышает 1-2 десятков, а на подготовку вакуумной системы к следующему циклу напыления уходит много времени (до нескольких часов). Если учесть, что для получения элементов, состоящих из нескольких различных веществ, приходится иметь такое же количество отдельных вакуумных установок, в которые последовательно переносится одна и та же (или несколько) подложек, то становится совершенно ясной необходимость разработки новых устройств, свободных от указанных недостатков и позволяющих непрерывно в одной вакуумной камере получать элементы с заданным числом слоев в большом количестве и высокого качества.

Этому и другим требованиям, о которых говорилось выше, удовлетворяет модель динамической системы получения пленок, структурная схема которой (рис. 3) состоит из замкнутого тер-

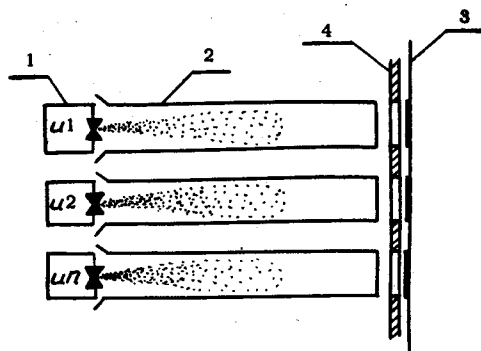


Рис.3. Модель динамической системы получения пленок: 1-закрытый испаритель дискретного действия, 2-тепловая труба, 3-ленточная подложка, 4-кассета с масками.

мического испарителя дискретного действия 1, полый трубы 2, температура  $T_{TP}(L)$  которой на всем ее протяжении  $L$  программно регулируется, подложки в виде непрерывно движущейся с заданной скоростью ленты 3 и неподвижной кассеты со сменными масками 4.

В том случае, когда требуется получать многослойные пленки, состоящие из нескольких химических компонент, закрытые испарители (1,2...n)

дискретного действия могут быть расположены параллельно движущейся ленте подложки и открываться одновременно на соответствующие промежутки времени. При этом в один и тот же момент времени, когда на первый участок ленточной подложки наносится первая компонента, а на следующий участок напыляется (на ранее помещенную в первом положении компоненту) вторая компонента, на третьем участке напыляется соответственно третья компонента и т.д. до нанесения последней  $n$ -ой компоненты.

В связи с малой длительностью процесса напыления в С.П.П., благодаря применению в ней закрытых термических испарителей дискретного действия и непрерывному движению ленточной подложки, длина которой может быть сколь угодно большой, представляется возможным во много раз по сравнению с известными установками повысить производительность и экономичность изготовления пленок.

Здесь, однако, следует подчеркнуть, что создание подложек в виде непрерывно движущейся ленты представляет значительные технические трудности. На их преодоление понадобятся не только известное время, но и пересмотр ряда установившихся требований, предъявляемых к подложкам обычного типа и напыленным на них пленкам и элементам.

Рассматриваемая модель динамической системы получения пленок позволяет выполнить и третье условие ее детерминированного поведения - программирование технологического эксперимента. В работе [11] нами была рассмотрена логическая структура физического эксперимента и введены соответствующие понятия. В равной степени это относится и к технологическому эксперименту, основная задача которого заключается в определении оптимальных количественных соотношений между некоторой группой факторов внешнего воздействия для изготовления объектов исследования с заданными структурными и физическими свойствами. В соответствии с этим описание программы технологического эксперимента будем характеризовать алгоритмом технологического исследования (А.Т.И.).

Для формализации процесса проведения технологического исследования перечислим вначале факторы внешнего воздействия, которыми мы можем управлять в описываемой модели С.П.П. Это:

- 1) температура закрытого испарителя дискретного действия -  $T_u$  ;
- 2) время пребывания испарителя в открытом состоянии (длительность импульса пара) -  $\Delta \tau_u$  ;

Т а б л и ц а I

АТИ качества работы закрытого испарителя дискретного действия									
Оператор вариации Ф.В.					Оператор регистрации С.И.П.				
Операция группировки Ф.В.		Операция воздействия			Операция группировки С.И.П.		Операция измерения		
Ступени	Группы Ф.В.	Абс. вел. Ф.В.	Напр. прилож.	Длит. возд. (сек)	Посл. регистрации	Группы С.И.П.	Масшт. изм. шкалы	Полярн. сигн.	Длит. регистрации (сек)
I.	$T_u$	$T_{u_1}$		До оконч. опыта	1.	$V_{Tu}$	10 мв	+	2
	$\Delta \tau_c$	$\Delta \tau_{c_1}$	-	$\Delta \tau_{c_1}$	2.	$V_{\Delta \tau_c}$	10 мв	+	2
	$\Delta \tau_u$	$\Delta \tau_{u_1}$	-	0					
	$n_{mj}$	$n_{m_1}$	-	-					
	$n_{nj}$	$n_{n_1}$	-	-					
	$T_{Tp}$	$T_{Tp_1}$		До оконч. опыта	3.	$V_{Tp}$	10 мв	+	2
2.	$T_u$	$T_{u_1}$		До оконч. опыта	5.	$V_{Tu}$	10 мв	+	2
	$\Delta \tau_c$	$\Delta \tau_{c_2}$	-	0	6.	$V_{\Delta \tau_c}$	10 мв	+	2
	$\Delta \tau_u$	$\Delta \tau_{u_2}$	-	$\Delta \tau_{\Delta_2}$					
	$n_{mj}$	$n_{m_1}$	-	-					
	$n_{nj}$	$n_{n_1}$	-	-					
	$T_{Tp}$	$T_{Tp_1}$		До оконч. опыта	7.	$V_{Tp}$	10 мв	+	2
	$T_{nmj}$	$T_{nm_1}$		До оконч. опыта	8.	$V_{nm}$	10 мв	+	2

3) время пребывания испарителя в закрытом состоянии (скважность импульсов пара)  $-\Delta \tau_c$ ;

4) суммарное время напыления объекта технологического исследования  $-\tau_u = \Delta \tau_u$ ;

5) количество и порядковый номер  $j$  химических компонент пленки (равное числу испарителей)  $-n_{xj}$ ;

6) количество и порядковый номер  $j$  масок в одном технологическом цикле  $-n_{mj}$ ;

7) температура трубы, внутри которой движется облако пара  $-T_{Tp}$ ;

8) температура подложек и масок  $-T_{nmj}$ .

Технологические исследования на основании [II] будем характеризовать операторами вариации факторов воздействия и регистрации.

Под технологическим циклом будем понимать совокупность ступеней (входящих в оператор вариации), необходимых для получения соответствующего объекта технологического исследования (например, пленки, пленочного многослойного элемента и т.п.) при фиксированных значениях факторов воздействия в пределах данного оператора вариации.

Общее число объектов технологического исследования будет определяться числом технологических циклов, регулярно повторяющихся во времени, а время проведения технологического эксперимента — суммарным временем единичных технологических циклов.

Таким образом, для разработки А.Т.И. необходимо составить оператор вариации факторов воздействия, оператор регистрации С.И.П. и определить общее число технологических циклов.

Проиллюстрируем сказанное на примере. Допустим, что требуется выяснить качество работы закрытого испарителя дискретного действия. Суть этого технологического исследования заключается в определении герметичности затвора, т.е. в определении нежелательного эффекта напыления на подложку паров исходного вещества при закрытом затворе испарителя. Соответствующий А.Т.И. представлен в таблице I.

Для определенности в табл. I операции измерения указаны при работе с регистрирующим прибором типа ЭИП-09 (шкала 10 мв) и быстродействие 1 сек), а все С.И.П. нормированы в электрической форме в шкале 10 мв.

Таким образом, технологический цикл приведенного А.Т.И.

состоит всего из двух ступеней. Реализация А.Т.И-Г производится с помощью соответствующих программно-управляющих блоков, которые предполагаются входящими в состав исполнительных устройств С.И.П.

#### Л и т е р а т у р а

1. Л. Холланд. Нанесение тонких пленок в вакууме. Госэнергоиздат, 1963.
2. В. М. Глушков. Введение в кибернетику. Из-во АН УССР, 1964.
3. С. Бир. Кибернетика и управление производством. Из-во "Наука", 1965.
4. Современная вакуумная техника. Сб. трудов И.И.Л., 1963.
5. И. С. Лискер. Системы автоматизированного физического и технологического исследования полупроводниковых материалов. - Тезисы доклада конф. по автометрии, 1965.
6. И. С. Лискер, Е. И. Черепов, В. М. Загоруйко. Устройство для дискретного термического испарения. Авторское свидетельство №201484 (1007181/21-9 от 10.У.65 г.).
7. И. С. Лискер, Е. И. Черепов. Закрытый термический испаритель дискретного действия. - Данный сборник, стр. 119-131.
8. Е. И. Черепов. О некоторых молекулярно-кинетических характеристиках термических испарителей. - Данный сборник, стр. 99-119.
9. С. J. Крам. Electr. Reliability and Microminiaturization. VI, (VII-IX), p. 245-249, 1962.
10. Радиозлектроника за рубежом, вып. II, 1962.
11. И. С. Лискер. Вариационные методы экспериментального исследования кинетических коэффициентов в полупроводниках. - Данный сборник, стр. 3-87.

Ленинградский агро-  
физический институт.

Поступила в редакцию  
6.X.1967 г.