

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОКИСНЫХ ПЛЕНОК**

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направлений «Электроника и микроэлектроника»  
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

Орликов, Леонид Николаевич

Моделирование условий формирования окисных пленок: методические указания к лабораторной работе для студентов направлений «Электроника и микроэлектроника» (специальность «Электронные приборы и устройства» / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2012. - 19 с.

Цель работы: испытать метод термического испарения для напыления нашей пленки, определить достоинства и недостатки данного напыления. В результате – напыление пленки ZnO.

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Электроника и микроэлектроника» (специальность «Электронные приборы и устройства») по курсу «Спец. вопросы технологии»

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОКИСНЫХ ПЛЕНОК

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направлений «Электроника и микроэлектроника»  
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

Разработчик  
д-р техн. наук, проф.каф.ЭП  
\_\_\_\_\_ Л.Н.Орликов  
\_\_\_\_\_ 2012 г

## Содержание

Цель работы.....	5
1 Введение .....	5
2 Теория .....	6
2.1 Свойства оксида цинка .....	6
2.2 Получение оксида цинка.....	6
2.3 Метод окисления ZnO .....	6
2.4 Модель окисления .....	7
2.5 Взаимодействие потока испаренных атомов в пролетном пространстве	11
2.6 Способы испарения .....	12
3. Экспериментальная часть .....	13
3.1 Описания метода термического испарения в вакууме .....	13
3.2 Рекомендованная последовательность операций.....	14
3.3 Эксперимент.....	14
3.4 Полученные ранее результаты .....	15
Контрольные вопросы.....	17
Список литературы.....	17

## Цель работы

Испытать метод термического испарения для напыления нашей пленки, определить достоинства и недостатки данного напыления. В результате – напыление пленки ZnO.

## 1 Введение

Оксид цинка входит в круг полупроводниковых материалов, которые в настоящий период наиболее интенсивно изучаются. Благодаря своим уникальным оптическим, акустическим и электрическим свойствам оксид цинка нашел применение при изготовлении прозрачных электродов в солнечных элементах, в газовых сенсорах, в варисторах, в устройствах генерации поверхностных акустических волн.

Будучи прозрачным в широкой области спектра, ZnO обладает высокой стойкостью к облучению, он податлив к химическому травлению и относительно дешев, что делает его привлекательным для применения в микроэлектронике. Благодаря некоторым достоинствам этого широкозонного полупроводника ( $E_G = 3.4$  эВ при  $T = 300\text{K}$ ) имеются перспективы его использования в коротковолновой и высокотемпературной оптоэлектронике, фото преобразователях и т.п. ZnO имеет большую энергию связи экситона (60 мэВ), что является рекордным для твердотельных бинарных полупроводников (для сравнения энергия связи экситона в GaN - 25 мэВ, в ZnSe - 20 мэВ).

Большая энергия связи экситонов ZnO и его сплавов особо привлекательны для создания излучающих устройств и фотоприемников УФ диапазона на основе ZnO.

В настоящее время металлопленочные элементы используются во многих электровакуумных и полупроводниковых приборах, интегральных схемах, в точных измерителях мощности, вентилях и фильтрах сверхвысоких частот.

На основе пленочной технологии изготавливаются термопары, тензометры, пленочные терморезисторы и многие другие приборы электронной техники. Тонкие пленки находят широкое применение в металлографических исследованиях, при нанесении оптических покрытий. В электровакуумном производстве широко применяются тонкие пленки при изготовлении приемных и передающих электроннолучевых приборов, фотоэлектронных умножителей, электрооптических преобразователей, приборов СВЧ. Они выполняют функции подложек фотокатодов, защитных и отражающих поверхностей, проводящих и резистивных покрытий, электростатических экранов и т. д.

## 2 Теория

### 2.1 Свойства оксида цинка

1. Белый, желтеющий при нагревании порошок, кристаллы при комнатной температуре бесцветны.

2. Температура плавления:

- при давлении 52 атмосферы — около 2000° С;
- при атмосферном давлении и 1950 °С;

3. Растворяется в:

- щелочах;
- водном растворе аммиака.

Оксид цинка обладает высокой стойкостью к облучению, податлив к химическому травлению и относительно дешев, что делает его привлекательным для применения в микроэлектронике.

Он нашел применение при изготовлении прозрачных электродов в солнечных элементах, в газовых сенсорах, в варисторах, в устройствах генерации поверхностных акустических волн.

### 2.2 Получение оксида цинка

1. Природный минерал цинкит;

2. Сжиганием паров цинка в кислороде («французский процесс»);

3. Термическим разложением соединений:

- ацетата  $Zn(CH_3COO)_2$
- гидроксида  $Zn(OH)_2$
- карбоната  $ZnCO_3$
- нитрата  $Zn(NO_3)_2$

4. Окислительным обжигом сульфида  $ZnS$

5. Гидротермальный синтез - метод получения различных химических соединений и материалов с использованием физико-химических процессов в закрытых системах, протекающих в водных растворах при температурах выше 100 °С и давлениях выше 1 атм

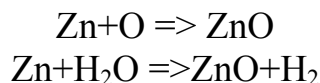
6. Извлечением из пылей и шламов металлургических комбинатов, особенно тех, что работают на металлоломе в качестве сырья (он содержит значительную долю оцинкованного железа).

7. Извлечением из тройной системы фазового равновесия «нитрат цинка-нитрат амина-вода» (с нитратом пиридина и хинолина размерность частиц порядка 5-10 нм до 75 %)

### 2.3 Метод окисления $ZnO$

Особенности роста пленки и кинетики окисления кремния определяются структурой и свойствами пленки  $2 SiO_2$ . Окисел обладает открытой пространственно-полимерной структурой с прочными связями  $\equiv Zn - O \equiv$ . Это

один из лучших диэлектриков с шириной запрещенной зоны более 8 эВ. Рост окисла происходит в атмосфере сухого кислорода или паров воды согласно реакциям



При этом происходит перераспределение валентных электронов между кремнием и кислородом и образуется ковалентная связь между атомами. Рост окисла сопровождается перемещением границы двух фаз  $\text{Zn} - \text{ZnO}$  в глубь полупроводника. Однако происходящее при этом расширение объема приводит к тому, что внешняя поверхность  $\text{ZnO}$  не совпадает с первоначальной поверхностью цинка (рисунок 2)

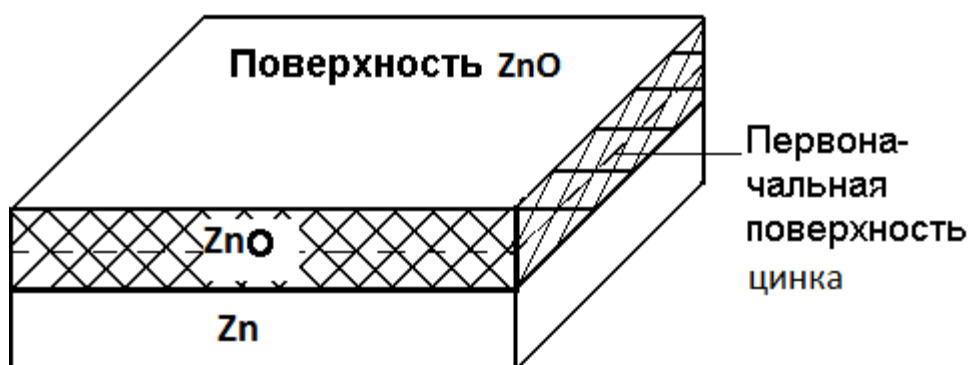


Рисунок 2.1 – Рост оксида цинка

Если учесть значение плотности и молекулярной массы  $\text{Zn}$  и  $\text{ZnO}$ , то рост пленки  $\text{ZnO}$  толщиной  $x$  происходит за счет цинка толщиной  $0,44x$ , т.е. можно считать, что толщина окисла примерно в два раза больше толщины поглощаемого им цинка

## 2.4 Модель окисления

Кинетика процесса окисления описывается моделью Дила и Гроува. Она применима для температурного диапазона 700-1300 оС, парциальных давлений  $2 \cdot 10^{-1}$  до  $1 \cdot 10^0$  Па (возможно, и для более высоких значений) и толщины окисных пленок 0,03-2 мкм в атмосфере, состоящей из кислорода и (или) паров воды. Процесс окисления состоит из двух этапов - массопереноса окислителя в растущем окисле и протекания химической реакции цинка с окислителем.

На рисунке 3 показана модель термического окисления, описываемая тремя потоками окислителя.

1) Массоперенос окислителя через внешнюю границу растущего окисла  $\text{ZnO}$  из газовой фазы (поток  $F_1$ )

$$F_1 = h (C^* - C_0) \quad (2.1)$$

где  $h$  - коэффициент переноса окисляющих частиц через внешнюю

границу окисла;  $C^*$  и  $C_0$  концентрации окисляющих частиц вне окисла и вблизи поверхности внутри окисла в любой момент времени окисления  $t$ ;

2) диффузия окисляющих частиц через окисел к границе  $ZnO - Zn$  (поток  $F_2$ )

$$F_2 = D \frac{C_0 - C_i}{x} \quad (2.2)$$

где  $D$  - коэффициент диффузии окисляющих частиц;  $C_i$  - концентрация окислителя на границе  $ZnO - Zn$ ;

3) химическая реакция взаимодействия окислителя с кремнием (поток  $F_3$ )

$$F_3 = k \cdot C_i \quad (2.3)$$

где  $k$  - константа скорости поверхностной химической реакции окисления кремния. В условиях установившегося равновесия имеет место равенство потоков ( $F_1 = F_2 = F_3$ )

$$h(C^* - C_0) = D \frac{C_0 - C_i}{x} = k \cdot C_i \quad (2.4)$$

из которого можно определить значения концентрации окисляющих частиц  $C_i$  и  $C_0$

$$C_i = \frac{C^*}{\frac{k}{h} + \frac{kx}{D} + 1} \quad (2.5)$$

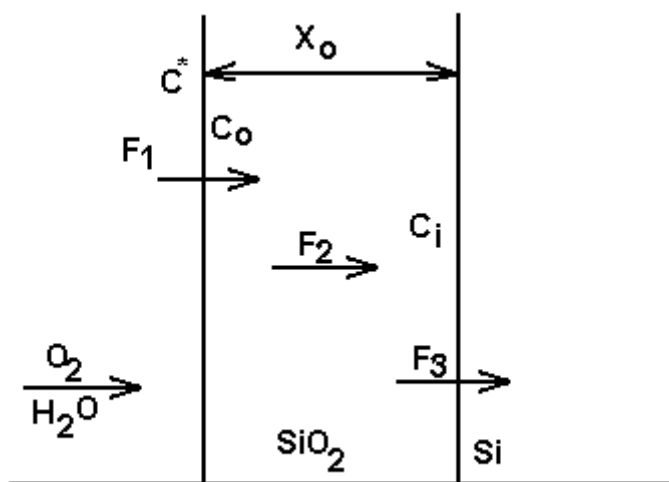


Рисунок 2.2 – Модель термического окисления

$$C_0 = \frac{C^* \left(1 + \frac{kx}{D}\right)}{1 + \frac{k}{h} + \frac{kx}{D}} \quad (2.6)$$

Анализ уравнений (2.5) и (2.6) показывает, что возможны два предельных случая, когда коэффициент диффузии либо слишком мал, либо



очень велик. Когда коэффициент диффузии мал,  $C_i \rightarrow 0$ , а  $C_0 \rightarrow C^*$ . В этом случае говорят, что реакция идет при диффузионном контроле, т.е. лимитирующей является диффузионная стадия протекания реакции. Вследствие малого  $D$  поток окислителя через окисел мал по сравнению с потоком, соответствующим реакции на границе  $Zn - ZnO$ . Следовательно, скорость реакции зависит от доставки окислителя к границе раздела фаз, а не от скорости его взаимодействия с цинком на этой границе.

Во втором предельном случае, когда коэффициент диффузии велик,  $C_i = C_0 = \frac{C^*}{1 + \frac{k}{h}}$ . Можно сказать, что реакция идет при кинетическом контроле, т.е. лимитирующей стадией является кинетическая стадия протекания самой реакции. Большое количество окислителя достигает границы раздела  $ZnO - Zn$ , и скорость окисления контролируется константой скорости реакции  $k$  и концентрацией  $C_i = C_0$ .

Для расчета скорости окисления необходимо определить число молекул окислителя  $N$ , входящих в единичный объем окисного слоя. В термически выращенном окисле содержится  $2,2 \times 10^{22}$  молекул/см<sup>3</sup>, а для создания одной молекулы  $ZnO$  требуется одна молекула кислорода или две молекулы воды. Следовательно, при выращивании пленки в сухом кислороде  $N$  должно быть равно  $2,2 \times 10^{22}$ , а при выращивании в парах воды - вдвое больше. Тогда поток  $F_1 = F_2 = F_3$  можно представить как произведение числа молекул окислителя  $N$  на скорость роста пленки  $\frac{dx}{dt}$

$$N \cdot \frac{dx}{dt} = k \cdot C_i = \frac{k \cdot C^*}{\frac{k}{h} + \frac{kx}{D} + 1} \quad (2.7)$$

Решим это дифференциальное уравнение, предположив, что окисел мог присутствовать на поверхности кремния вследствие предварительных этапов окисления в ходе технологического процесса или его рост мог происходить под воздействием окружающей атмосферы. Это означает, что  $0 \leq x \leq x_0$  при  $t = 0$ . Решение уравнения (2.7) выглядит следующим образом:

$$x^2 + \frac{2D}{k} \left(1 + \frac{k}{h}\right) x = \frac{2DC^*t}{N_1} + x_0^2 + \frac{2D}{k} \left(1 + \frac{k}{h}\right) x_0 \quad (2.8)$$

Обозначим:

$$\frac{2D}{k} \left(1 + \frac{k}{h}\right) = A, \quad \frac{2DC^*t}{N_1} = B, \quad \tau = \frac{x_0^2 + A \cdot x_0}{B}$$

Тогда уравнение 2.8 примет вид:

$$X^2 + AX - B(t + \tau) = 0 \quad (2.9)$$

Величина  $t$  соответствует сдвигу по временной оси, который учитывает наличие первоначального окисла толщиной  $x_0$ . Решение квадратного уравнения (2.9) для  $x$  как функция времени запишется

$$x = \frac{A}{2} \left[ \sqrt{\left(1 + \frac{t + \tau}{\frac{A^2}{4B}}\right)} - 1 \right] \quad (2.10)$$

Анализ уравнения (2.10) можно провести, задав два значения времени. Один из предельных случаев имеет место при большом времени окисления, т.е. когда  $t \gg \tau$

$$x^2 = Bt \quad (2.11)$$

Уравнение (2.11) представляет собой параболический закон, где  $B$  - параболическая константа скорости окисления. Другой предельный случай имеет место при очень коротком времени окисления, т.е. когда справедливо соотношение  $(t + \tau) \ll A^2 / 4B$

$$x = \frac{B}{A} (t + \tau) \quad (2.12)$$

Уравнение (2.12) представляет собой линейный закон, где  $B / A$  - линейная константа скорости окисления, определяемая выражением

$$\frac{B}{A} = \frac{kh}{k+h} \cdot \frac{C^*}{N_1}$$

реакции окисления с диффузионным и кинетическим контролем. Достаточно простая модель окисления Дила и Гроува обеспечивает хорошее совпадение теоретических результатов с экспериментальными данными для окисления во влажном и сухом кислороде. Эксперименты проводились при окислении в очищенном сухом кислороде (содержание паров воды меньше  $5 \times 10^{-4} \%$ ) и во влажном кислороде (парциальное давление паров воды  $85 \times 10^3$  Па). Учитывая основные уравнения, описывающие процесс роста окисла (2.11) и (2.12), Дил и Гроув получили значения констант  $A$  и  $B$  для процессов окисления в сухом и влажном кислороде, приведенные в табл. 2.1 и 2.2. При окислении во влажном кислороде не наблюдается сдвига по временной оси, т.е. при  $t = 0$  толщина окисла  $x_0 = 0$  и, соответственно,  $\tau = 0$

Таблица 2.1 - Константы скорости окисления цинка в сухом кислороде

Температура окисления, °С	A, мкм	Параболическая константа скорости окисления B, мкм <sup>2</sup> /ч	Линейная константа скорости окисления B/A, мкм/ч	$\tau$ , ч
1200	0,040	0,045	1,12	0,027
1110	0,090	0,027	0,30	0,076
1000	0,165	0,0117	0,071	0,37
920	0,235	0,0049	0,0208	1,40
800	0,370	0,0011	0,0030	9
700	.....	.....	0,00026	81

Таблица 2.2 - Константы скорости окисления цинка во влажном кислороде

Температура окисления, °С	A, мкм	Параболическая константа скорости окисления B, мкм <sup>2</sup> /ч	Линейная константа скорости окисления B/A, мкм/ч	$\tau$ , Ч
1200	0,05	0,720	14,40	0
1110	0,11	0,510	4,64	0
1000	0,226	0,287	1,27	0
920	0,50	0,203	0,406	0

При окислении в сухом кислороде при  $t = 0$  толщина окисла  $x_0$  примерно равна 0,025 мкм, поэтому при расчетах следует учитывать величину  $\tau$ .

## 2.5 Взаимодействие потока испаренных атомов в пролетном пространстве

Схема испарения представлена на рисунке 2.3

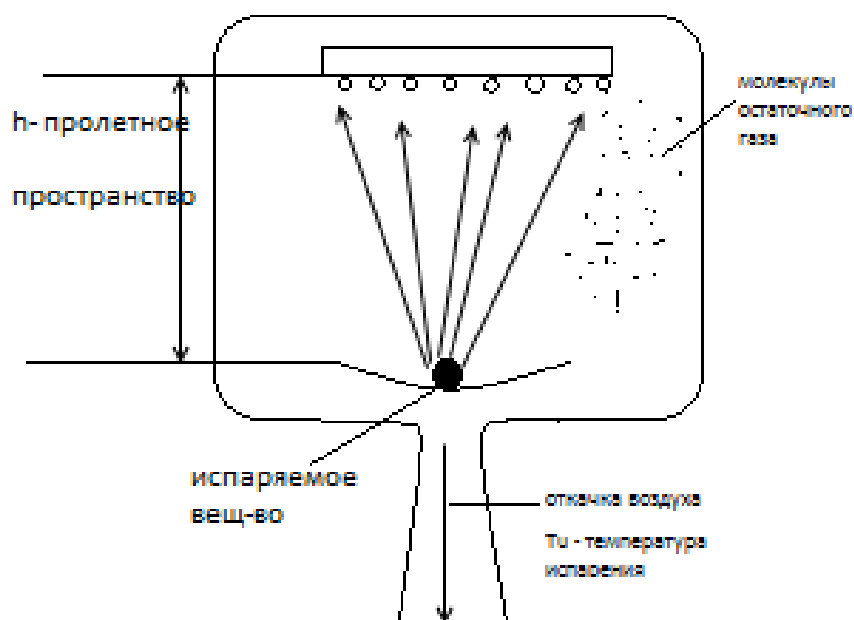


Рисунок 2.3 – Процессы в пролетном пространстве

Условия испарения:

- 1) Достаточно интенсивное испарение материала;
- 2) Направленный молекулярный поток к подложке;

### 3) Конденсация пара на подложке;

В пролетном пространстве должны быть созданы условия для образования атомарного потока. Тогда траектории атомов будут прямолинейны, рассеяния не будет, тень за маской на подложке будет четкой и для атомарного потока станут справедливы законы геометрической оптики Ламберта. Эти условия будут выполняться, если длина свободного пробега молекул газа в технологической камере будет превышать расстояние между испарителем и подложкой. Если принять расстояние между испарителем и подложкой 10-20 см, то рабочее давление газа в камере распыления должно быть ниже  $10^{-2}$  Па.

## 2.6 Способы испарения

Существующие испарители можно разделить на две группы: испарители с непосредственным нагревом и испарители с косвенным нагревом. Испарителями с непосредственным нагревом называются такие испарители, в которых ток пропускается непосредственно через испаряемый материал.

Такой метод испарения может быть применен только для проволочных или ленточных материалов, температура испарения которых ниже температуры плавления. Преимущество метода испарения с непосредственным нагревом заключается в том, что при этом отсутствуют элементы подогревателя, способные загрязнить наносимую тонкую пленку.

При испарении с косвенным нагревом предусматриваются специальные подогреватели, при помощи которых испаряемое вещество нагревается до температуры, соответствующей температуре испарения. Выбор материала подогревателей определяется в основном следующими основными требованиями:

1) давление насыщенных паров материала подогревателя должно быть пренебрежимо малым при рабочих температурах испарения;

2) испаряемый материал в расплавленном состоянии должен хорошо смачивать материал подогревателя, обеспечивая таким образом хороший тепловой контакт;

3) не должно происходить никаких химических реакций между материалом подогревателя и испаряемым металлом, а также не должны образовываться сплавы между этими веществами. Образование сплавов может привести к загрязнению и разрушению подогревателя.

### 3. Экспериментальная часть

#### 3.1 Описание метода термического испарения в вакууме

Суть метода заключается в нагреве вещества до температуры испарения, его испарении и последующей конденсации в вакууме на подложке. Получение пленок возможно только при низких давлениях в вакуумных установках. Схема установки показана на рисунке 3.1.

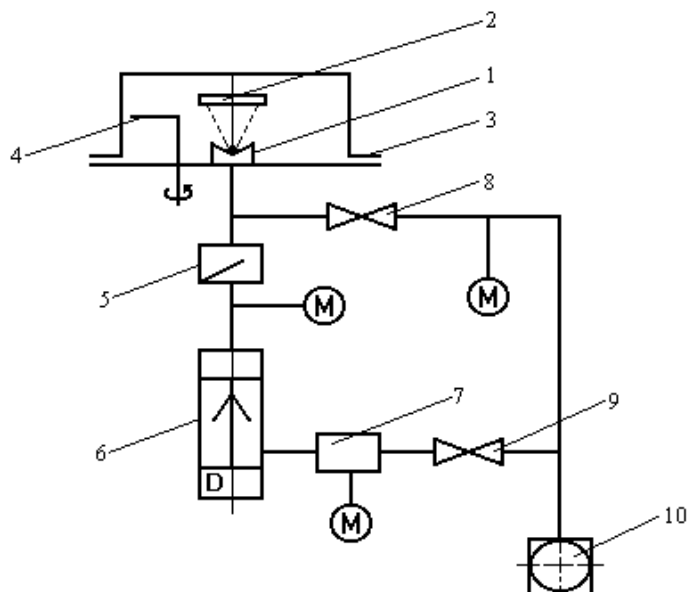


Рисунок 3.1 - Схема установки вакуумного напыления

1 - испаритель; 2 - подложка; 3 - рабочая камера; 4 - заслонка;  
5 - затвор; 6 - высоковакуумный насос; 7 - форбаллон;  
8,9 - вакуумные вентили; 10 - форвакуумный насос

В условиях высокого вакуума материал, помещенный в испаритель 1, разогревается и испаряется, в результате чего молекулы вещества движутся к подложке 2, где они конденсируются, образуя пленку. Процесс осуществляется внутри камеры 3, связанной с непрерывно работающей системой откачки воздуха. Вакуумная система состоит из высоковакуумного паромасляного насоса 6 и механического насоса 10. Подключение насосов к рабочей камере осуществляется с помощью вакуумных вентилях по основной и вспомогательной линиям откачки. Откачка рабочей камеры 3 производится через отверстие в рабочей плите установки. На входе паромасляного насоса 6 устанавливаются маслоотражатель и затвор 5, отделяющий входной патрубок насоса от рабочего объема. По основной линии откачка производится следующим образом: рабочая камера 3 - открытый затвор 5 - насос 6 - форбаллон 7 - открытый вентиль 9 - насос - 10, а по вспомогательной линии: камера 3 - открытый вентиль 8 - насос 10.

При этом клапан 9 должен быть закрыт. С помощью вспомогательной линии откачки в рабочей камере создается давление порядка 10 Па, необходимое для работы высоковакуумного насоса. Затем клапан 8 закрывают, открывают клапан 9 и затвор 5 и дальше производят откачку по основной линии, предварительно включив нагреватель паромасляного насоса.

Таким образом, для осуществления процесса термического испарения в вакууме необходимо обеспечить следующие основные условия: достаточно интенсивное испарение материала, направленный молекулярный поток к подложке и конденсацию пара на подложке.

### 3.2 Рекомендованная последовательность операций

1. Выбор техпаспорта;
2. Раскрой (наносим метки) стекла;
3. Напыление,  $R_{\square}=100\text{Ом}/\square$ ;
4. Определиться с промежуточным испарителем (чтобы было меньше загрязнений на напыленной пленке);
5. Поместить в борокамеру  $V=13\text{ см}^2$ ;
6. Условия: Время=2 часа, температура 300 градусов по цельсию, давление=13 атм
7. Провести визуальный анализ пленки (не должно быть «дорог»)
8. Полировка и снова напыление

### 3.3 Эксперимент

Проведите эксперименты:

- 1 Очистка от загрязнений. Стекла обрабатывались ацетоном, сама камера промывалась проточной водой, так же проводилась очистка цинка.
- 2 Полировка стекла.
- 3 Для окисления использовалась печь. Схема установки с печкой представлена на рисунке (установка ВУП-4)

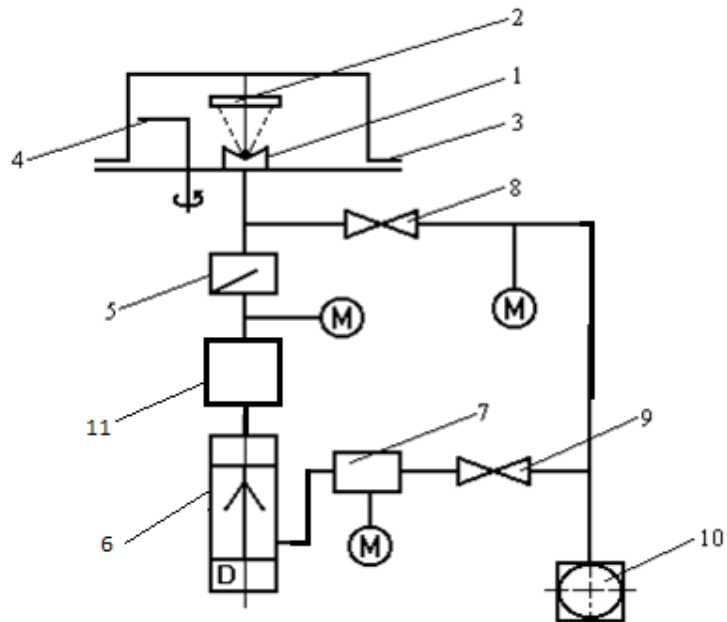


Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной установки с установленной печью.

1 - испаритель; 2 - подложка; 3 - рабочая камера; 4 - заслонка;  
 5 - затвор; 6 - высоковакуумный насос; 7 - форбаллон;  
 8,9 - вакуумные вентили; 10 - форвакуумный насос, 11-печка.

4 Выберите генератор пара (можно использовать вымоченный в воде кирпич), требуется частая смена генератора пара.

Проведите два вида эксперимента:

В 1-ом генератор пара кладите непосредственно на испаритель, во 2-ом – на нагреватель.

Проследите за полученными результатами, как происходит напыление? Какая получается пленка? Что необходимо сделать, чтобы устранить недостатки (если такие имеются) напыленной пленки?

### 3.4 Полученные ранее результаты

Сравнить полученные результаты с ранее полученными.

1. При испарении сопротивление  $\sim 0\text{М}/\text{квadrat}$ , при окислении -  $R \gg \sim 16\text{кОм}$  в течение 3 часов (график 2.4),  $300\text{ }^\circ\text{C}$
2. Цвет пленки изменялся от синего до белесого
3. При просмотре пленки под микроскопом видны пробелы при нанесении пленки, так называемые «дороги», так же видны пятна, неполное окисление металла. Это говорит о том, что пленка аморфная. Из этой пленки окислы не получить [ 1].

4. Массоперенос от расстояния- из графика 2.3 видно, что оптимальное расстояние для напыления пленки - 70 мм. Окисление связано с оптимальной толщиной пленки.

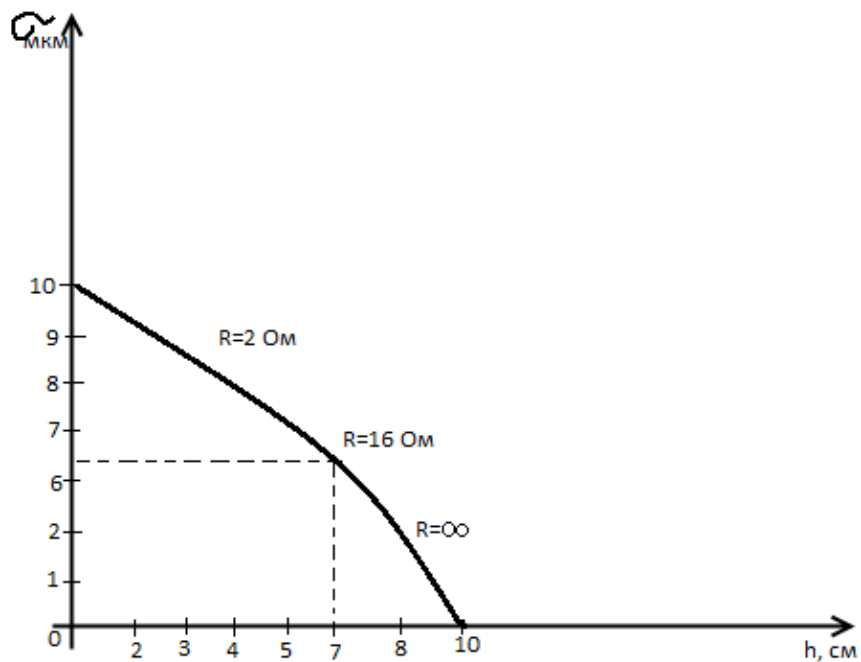


Рисунок 3.3 – График зависимости массопереноса от расстояния

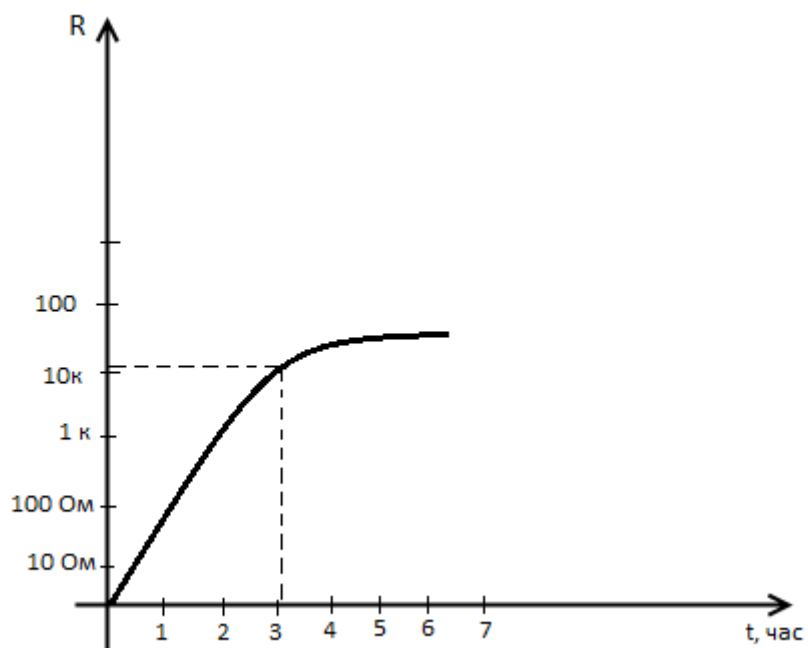


Рисунок 3.4 – График зависимости сопротивления от времени



### **3.4. Содержание отчета**

3.4.1. В отчете представляется задание и материалы, подтверждающие его выполнение.

3.4.2. Графические материалы должны содержать схему установки с назначением всех элементов и их основными характеристиками, экспериментальные зависимости и их сравнение с теоретическими и расчетными. Варианты вакуумных вводов и соединений.

3.4.3. Расчетные материалы должны содержать расчет проводимости трассы, расчет скорости откачки объема, расчет времени откачки, расчет газовыделений с поверхности элементов системы, расчет потока из измерений изменения давления во времени, расчет согласования откачных средств.

3.4.4. Пояснительные записи должны содержать алгоритм включения и выключения установки, основной перечень аварийных ситуаций и методов их устранения.

3.4.5. Вывода по работе, включая сведения по диапазону работы датчиков, насосов.

3.4.6. Список использованной литературы.

3.4.7. Приложения могут содержать распечатку расчетов и графиков на ЭВМ, но обязательно иметь промежуточные и заключительные комментарии.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислить основные способы получения оксида цинка?
2. Какие основные свойства оксида цинка?
3. Нарисовать зависимость массопереноса от расстояния?
4. Описать метод термического испарения в вакууме.
5. Как будет изменяться время напыления пленки при уменьшение температуры?
6. Перечислите основные условия испарения (метод термического испарения)?

### **Список литературы**

1. Данилина Т.И. и др. Процессы микро- и нанотехнологии. Томск, 2005 - 300 с.
2. В.Н. Черняев. Физико-химические процессы в технологии РЭА: Учеб. для вузов – М.: Высш. Шк., 1987. - 376 с.

3. Глебов Г.Д.. Поглощение газов активными металлами. М.: Энергоиздат 1966. - 150с.
4. Г.Н. Абрамович. Прикладная Газовая динамика. М.: 1976, 808 с.
5. А.В. Васенков, А.Е. Беликов, Р.Г. Шарафутдинов, О.В. Кузнецов. Взаимодействие свободной струи газа низкой плотности с подложкой при осаждении плёнок \\ Микроэлектроника. 1995.Т.24.-№3. - С.163-165.
6. Г.Неллер. Задачи динамики разряженного газа в вакуумной технологии.//Динамика разряженных газов. / Сб под ред Ишлинского А.Ю. и Черного Г.Г. - М.: Мир, 1976. – С.195-206.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Моделирование условий формирования окисных пленок

Методические указания к лабораторной работе

Усл. печ. л. \_\_\_\_\_ Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40