

Федеральное агентство по образованию

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Т. И. Данилина, И. А. Чистоедова

# **ТЕХНОЛОГИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МИКРОСХЕМ**

*Учебно-методическое пособие  
по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной  
работе для студентов специальности  
210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника»*

Томск 2007

Рецензент:

к.т.н., доцент кафедры физической электроники Смирнова К.И.

**Данилина Т.И., Чистоедова И.А.**

Технология тонкопленочных микросхем: Учебно-методическое пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 75 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника».

© Данилина Т.И., Чистоедова И.А., 2007

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	4
2. ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ	5
2.1. Расчет режимов напыления пленок методом термического испарения в вакууме	5
2.2. Расчет режимов напыления пленок сплавов методом термического испарения в вакууме	5
2.3. Расчет режимов напыления пленок методом ионно-плазменного распыления	8
2.4. Получение рисунка ИМС	8
2.5. Технология изготовления ФШ	11
2.6. Способы получения рисунка ИМС с использованием позитивных и негативных ФР, а также различных ФШ	11
2.7. Расчет технологической погрешности изготовления элементов ИМС	14
2.7.1 Тонкопленочные резисторы (ТПР)	14
2.7.2 Тонкопленочные конденсаторы (ТПК)	15
3. ДОМАШНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ	17
3.1. Индивидуальное задание № 1	17
3.2. Индивидуальное задание № 2	21
3.3. Индивидуальное задание № 3	29
4. АУДИТОРНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ	42
4.1. Контрольная работа № 1	42
4.2. Контрольная работа № 2	48
4.3. Контрольная работа № 3	53
5. КОЛЛОКВИУМ	56
6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ по разделу «ТЕРМИЧЕСКОЕ ИСПАРЕНИЕ В ВАКУУМЕ»	61
7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ по разделу «ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ»	66
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	69
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	71
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	72
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	73

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

Данное учебно-методическое пособие предназначено для самостоятельной работы студентов по дисциплине «Технология тонкопленочных микросхем». Содержит варианты индивидуальных заданий для аудиторных практических занятий, тестовые задания, варианты домашних индивидуальных заданий и варианты контрольных работ, проводимых в аудитории. Индивидуальные задания представляют собой комплексные задания по всем разделам лекционного курса с элементами самостоятельного поиска материала. В приложениях приведены справочные данные.

## 2. ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

### 2.1. Расчет режимов напыления пленок методом термического испарения в вакууме

1. Рассчитать скорость и время осаждения пленок. Сделать выводы о практической пригодности режимов. Принять: площади точечных испарителей  $S = 0,3 - 0,6 \text{ см}^2$ , площадь поверхностных испарителей  $S = 1 - 3 \text{ см}^2$ . Варианты заданий приведены в таблице 2.1.

2. Рассчитать разброс толщины пленки на стандартной подложке (60 x 48 мм). Рассчитать степень загрязнения пленок в центре и на краю стандартной подложки. Принять, что остаточная атмосфера – азот,  $p_r = 10^{-2} \text{ Па}$ ,  $T_r = 300 \text{ К}$ . Сделать выводы о практической пригодности режимов. Варианты заданий приведены в таблице 2.1.

### 2.2. Расчет режимов напыления пленок сплавов методом термического испарения в вакууме

При выполнении задания требуется представить графически закон Рауля, рассчитать давление насыщенного пара сплава, коэффициент испарения и состав пленок на подложке. Представить выводы и рекомендации по практической реализации метода получения сплава заданного состава.

1. Сплав - нихром: 80 % *Ni* и 20 % *Cr*. Температура испарения 1723 К. Для никеля:  $A = 11,67$ ;  $B = 20600$ ;  $f = 1$ . Для хрома:  $A = 12,0$ ;  $B = 17560$ ;  $f = 1$ .
2. Сплав - пермаллой: 85 % *Ni* и 15 % *Fe*. Температура испарения 1873 К. Для никеля:  $A = 11,67$ ;  $B = 20600$ ;  $f = 1$ . Для железа:  $A = 12,53$ ;  $B = 21960$ ;  $f = 1$ .

Таблица 2.1 - Варианты заданий по теме 2.1

Вариант	Материал	Плотность $\gamma$ , $\times 10^3$ $\text{кг}/\text{м}^3$	Масса, а.е.м.	Условная температура испарения, К	Коэффициенты		Тип испарителя	h, см	d, мм
					А	В			
1	Ag	10,49	107,868	1320	10,78	14090	Поверх.	12	0,5
2	Al	2,7	26,98154	1423	11,11	15630	Точеч.	14	0,5
3	Cu	8,96	63,546	1546	10,84	16580	Поверх.	13	1,0
4	Mo	10,2	95,94	2800	10,92	30310	Точеч.	12	0,1
5	Au	19,32	196,9665	1738	10,77	18520	Поверх.	10	0,6
6	Pt	21,5	195,09	2360	11,75	27500	Точеч.	10	0,6
7	Ti	4,52	47,9	1832	11,1	20110	Поверх.	10	0,2
8	W	19,3	183,85	3580	11,36	40260	Точеч.	13	0,1
9	Ni	8,9	58,71	1780	11,67	20600	Точеч.	15	0,2
10	Cr	7,19	51,996	1478	12,0	17560	Поверх.	15	0,05
11	Si	2,42	28,086	1615	12,32	19700	Поверх.	12	0,5
12	Ta	16,6	180,947	3340	12,12	40210	Точеч.	12	0,1
13	Ge	5,32	72,59	1520	10,12	15150	Поверх.	13	0,5
14	Cd	8,65	112,41	538	10,9	5800	Поверх.	14	0,1
15	Fe	7,86	55,847	1720	12,53	21960	Поверх.	12	0,5
16	Zn	6,5	65,38	616	11,06	6740	Поверх.	14	0,3

3. Сплав золото (88 %) – германий (12 %). Температура испарения 1520 К. Для золота:  $A = 10,77$ ;  $B = 18520$ ;  $f = 1$ . Для германия:  $A = 10,12$ ;  $B = 15150$ ;  $f = 1$ .
4. Сплав хром (50 %) – германий (50 %). Температура испарения 1580 К. Для хрома:  $A = 12,0$ ;  $B = 17560$ ;  $f = 1$ . Для германия:  $A = 12,12$ ;  $B = 15150$ ;  $f = 1$ .
5. Сплав - нихром: 80 %  $Ni$  и 20 %  $Cr$ . Температура испарения 1573 К. Для никеля:  $A = 11,67$ ;  $B = 20600$ ;  $f = 1$ . Для хрома:  $A = 12,0$ ;  $B = 17560$ ;  $f = 1$ .
6. Сплав - нихром: 80 %  $Ni$  и 20 %  $Cr$ . Температура испарения 1373 К. Для никеля:  $A = 11,67$ ;  $B = 20600$ ;  $M = 58,7$ ;  $f = 0,9$ . Для хрома:  $A = 12,0$ ;  $B = 17560$ ;  $M = 52$ ;  $f = 0,8$ .
7. Сплав: серебро (80 %) – германий (20 %). Температура испарения 1000 К. Для серебра:  $A = 10,78$ ;  $B = 14090$ ;  $f = 1$ . Для германия:  $A = 10,12$ ;  $B = 15150$ ;  $f = 1$ .
8. Сплав: золото (50 %) – никель (50 %). Температура испарения 1000 К. Для золота:  $A = 10,77$ ;  $B = 18520$ ;  $f = 1$ . Для никеля:  $A = 11,67$ ;  $B = 20600$ ;  $f = 1$ .
9. Сплав – нихром: (80 %)  $Ni$  – (20 %)  $Cr$ . Температуры испарения 1473 и 1723 К. Для никеля:  $A = 11,67$ ;  $B = 20600$ ;  $M = 58,7$ ;  $f = 1$ . Для хрома:  $A = 12,0$ ;  $B = 17560$ ;  $M = 52$ ;  $f = 1$ .
10. Сплавы - нихрома: 80 %  $Ni$  и 20 %  $Cr$  и 30 %  $Cr$  и 70 %  $Ni$ . Температура испарения 2073 К. Для никеля:  $A = 11,67$ ;  $B = 20600$ ;  $f = 1$ . Для хрома:  $A = 12,0$ ;  $B = 17560$ ;  $f = 1$ .
11. Сплав: золото (80 %) – кадмий (20 %). Температура испарения 1300 К. Для золота:  $A = 10,77$ ;  $B = 18520$ ;  $f = 1$ . Для кадмия:  $A = 10,9$ ;  $B = 5800$ ;  $f = 1$ .
12. Сплав - пермаллой: 85 %  $Ni$  и 15 %  $Fe$ . Температура испарения 1873 К. Для никеля:  $A = 11,67$ ;  $B = 20600$ ;  $M = 58,7$  и двух значениях  $f = 1$  и  $f = 0,97$ . Для железа:  $A = 12,53$ ;  $B = 21960$ ;  $M = 55,8$  и двух соответственно значениях  $f = 1$  и  $f = 0,52$ .
13. Сплав - нихром: 80 %  $Ni$  и 20 %  $Cr$ . Температура испарения 1668 К. Для никеля:  $A = 11,67$ ;  $B = 20600$ ;  $f = 1$ . Для хрома:  $A = 12,0$ ;  $B = 17560$ ;  $f = 1$ .

### **2.3. Расчет режимов напыления пленок методом ионно-плазменного распыления**

1. Определить тип столкновений и рассчитать коэффициент распыления по теории Пиза и теории Зигмунда. Сравнить полученные результаты с экспериментальными данными из литературы. Варианты заданий приведены в таблице 2.2.

2. Рассчитать скорость осаждения и время напыления пленок. Сравнить с термическим испарением. Сделать анализ практической пригодности полученных результатов по времени осаждения пленок. Предложить практическую реализацию метода получения пленок. Варианты заданий приведены в таблице 2.2. Принять: расстояние от мишени до подложки  $h = 5 - 7$  см.

### **2.4. Получение рисунка ИМС**

1. Выбрать способ экспонирования для получения заданного размера элемента. Варианты заданий приведены в таблице 2.3.

2. Рассчитать режимы нанесения фоторезиста, экспонирования и проявления (метод контактной фотолитографии). Выбрать и обосновать толщину ФР. Представить профиль травления при изотропном (ЖХТ) и анизотропном (ионное травление) процессах травления. Рассчитать выход годных кристаллов в процессе фотолитографии. Рассчитать производительность нанесения ФР. Определить требуемую степень анизотропии, чтобы погрешность изготовления элемента не превышала заданную величину.



Таблица 2.2 - Варианты заданий по теме 2.3

№	Ион	Мишень	Энергия иона E, кэВ	Плот- ность тока Миш-ени j, А/м <sup>2</sup>	Тол- щина пленки d, мкм	Диаметр мишени d <sub>м</sub> , мм	Размер под- ложки, мм
1	Ag	магний	2	10	0,1	100	Ø100
2	O <sub>2</sub>	алюмин	5	15	0,5	150	Ø70
3	N <sub>2</sub>	кремний	10	10	0,5	100	Ø70
4	Ag	титан	30	5	0,2	150	Ø100
5	Ag	ванадий	5	10	0,2	100	60x48
6	Ag	медь	10	5	1,0	150	Ø200
7	O <sub>2</sub>	ниобий	7	10	0,2	100	Ø100
8	Ag	молибд	15	5	0,2	80	60x48
9	Ag	серебро	60	4	0,5	70	Ø 70
10	O <sub>2</sub>	тантал	4	10	0,2	120	Ø 100
11	Ag	вольфр	15	1	0,2	60	Ø 70
12	Ag	платина	1	5	0,5	60	60x48
13	Ag	золото	2	10	0,5	70	Ø 100
14	O <sub>2</sub>	кремний	5	3	0,7	100	Ø 200
15	O <sub>2</sub>	титан	8	8	0,3	150	60x48
16	Ag	ниобий	2	2	0,3	100	Ø 150
17	Ag	тантал	1	5	0,4	120	Ø 150
18	Ag	кремний	1	5	1,0	100	60x48
19	N <sub>2</sub>	тантал	10	10	0,1	120	60x48
20	N <sub>2</sub>	алюмин.	1	3	0,8	150	Ø 110
21	H <sub>2</sub>	медь	1	5	0,7	150	Ø 110
22	Hg	медь	10	5	1,2	150	Ø 200
23	Ag	алюмин	5	10	0,9	150	Ø 100
24	Ag	кремний	100	5	0,9	100	Ø 150
25	Ag	золото	5	10	0,7	70	Ø 100
26	He	никель	10	5	0,3	90	60x48
27	Ag	платина	10	5	0,4	60	60x48
28	O <sub>2</sub>	медь	1	5	0,6	150	Ø 70
29	Ag	титан	5	10	0,1	150	Ø 120
30	Ag	молибд	5	10	0,15	80	Ø 70

Таблица 2.3 - Варианты заданий по теме 2.4

Вариант	$b_{\min}$ , мкм	Элемент	Тип ФР	Толщина рабочего слоя, $d_{\text{раб.сл.}}$ , мкм	Степень анизотропии, А	Размер кристалла, а x b, мм	Число ФЛ, n	$\delta b$ , %
1	0,13	линия	позит.	0,13	100	3 x 4	10	5
2	0,18	линия	позит.	0,18	90	3 x 3	6	5
3	0,2	линия	позит.	0,2	80	3 x 2	5	5
4	0,25	линия	негатив.	0,2	70	3 x 1	10	5
5	0,3	окно	позит.	0,25	60	2 x 2	8	5
6	0,35	окно	позит.	0,3	50	2 x 3	4	5
7	0,4	окно	негатив.	0,3	40	2 x 4	6	4
8	0,45	окно	негатив.	0,3	30	3 x 3	10	4
9	0,5	окно	негатив.	0,4	30	3 x 4	8	3
10	0,6	окно	позит.	0,4	20	3 x 4	6	3
11	0,7	окно	позит.	0,4	20	3 x 1	7	2
12	0,8	окно	негатив.	0,5	10	2 x 1	5	2
13	0,85	окно	позит.	0,5	10	2 x 4	8	1
14	0,9	окно	негатив.	0,5	5	3 x 3	6	1
15	1	окно	позит.	0,5	5	2 x 1	6	1

## 2.5. Технология изготовления ФШ

1. Определить размеры платы (кристалла) для отдельной ИМС, если на стандартной подложке из ситалла (полупроводниковой пластине) одновременно формируются идентичные тонкопленочные схемы в указанном количестве. Варианты заданий приведены в таблице 2.4.

2. Рассчитать масштаб оригинала. Определить этапы изготовления рабочего ФШ и требуемое оборудование. Сформировать рисунок элемента. Варианты заданий приведены в таблице 2.4.

## 2.6. Способы получения рисунка ИМС с использованием позитивных и негативных ФР, а также различных ФШ

### Вариант 1

Когда можно получить путем травления рисунок резистора в виде полосы, расположенной в центре подложки:

- a) ФР – негатив, ФШ – негатив;
- b) ФР – позитив, ФШ – негатив;
- c) ФР – негатив, ФШ – позитив.

### Вариант 2

Когда можно вытравить окно в слое окиси кремния в центре подложки:

- a) ФР – негатив, ФШ – позитив;
- b) ФР – позитив, ФШ – позитив;
- c) ФР – позитив, ФШ – негатив.

### Вариант 3

В каком случае можно получить контакты к полоске резистора методом обратной ФР-маски:

- a) ФР – позитив, ФШ – позитив;
- b) ФР – негатив, ФШ – негатив;
- c) ФР – негатив, ФШ – позитив.

Таблица 2.4 - Варианты заданий по теме 2.5

Вар-т	Элемент	Ширина элемента, мкм	Точность, %	Вид ИМС	Метод получения рисунка	Размер подложки, мм	Число схем
1	проводник	30	1	полупров.	прямая	Ø100	500
2	резистор	200	2	пленочная	обратная	60x48	30
3	зазор	10	2	полупров.	прямая	Ø150	800
4	проводник	50	2	полупров.	обратная	Ø100	400
5	резистор	300	1	пленочная	прямая	60x48	60
6	резистор	50	4	пленочная	обратная	60x48	36
7	проводник	20	1	полупров.	прямая	Ø100	300
8	зазор	10	1	полупров.	прямая	Ø150	700
9	резистор	400	1	пленочная	обратная	60x48	40
10	проводник	200	3	полупров.	обратная	Ø150	2000
11	резистор	100	2	пленочная	прямая	60x48	32
12	проводник	50	1	полупров.	обратная	Ø150	1500
13	зазор	10	1	пленочная	прямая	60x48	30
14	зазор	100	2	полупров.	прямая	Ø150	800
15	проводник	150	2	полупров.	прямая	Ø125	500

## Вариант 4

В каком случае можно получить путем травления резистор в виде полоски, расположенной в центре подложки:

- a) ФР – позитив, ФШ – негатив;
- b) ФР – позитив, ФШ – позитив;
- c) ФР – негатив, ФШ – позитив.

## Вариант 5

Какой необходимо выбрать ФР и ФШ для получения методом обратной ФР – маски полоски резистора, расположенной в центре подложки:

- a) ФР – негатив, ФШ – позитив;
- b) ФР – позитив, ФШ – позитив;
- c) ФР – негатив, ФШ – негатив.

## Вариант 6

Когда можно вытравить окно в слое окиси кремния в центре подложки:

- a) ФР – негатив, ФШ – негатив;
- b) ФР – негатив, ФШ – позитив;
- c) ФР – позитив, ФШ – негатив.

## Вариант 7

Когда можно получить контакты к полоске резистора методом обратной ФР – маски:

- a) ФР – позитив, ФШ – негатив;
- b) ФР – позитив, ФШ – позитив;
- c) ФР – негатив, ФШ – негатив.

## Вариант 8

В каком случае методом обратной ФР – маски можно изготовить в виде полоски, расположенной в центре подложки:

- a) ФР – негатив, ФШ – негатив;
- b) ФР – позитив, ФШ – позитив;
- c) ФР – позитив, ФШ – негатив.

**Вариант 9**

При изготовлении монометаллического трафарета получим квадратное отверстие в центре, если:

- a) ФР – позитив, ФШ – негатив;
- b) ФР – позитив, ФШ – позитив;
- c) ФР – негатив, ФШ – позитив.

**Вариант 10**

Какое необходимо выбрать сочетание ФР и ФШ для получения отверстия в центре трафарета:

- a) ФР – негатив, ФШ – позитив;
- b) ФР – негатив, ФШ – негатив;
- c) ФР – позитив, ФШ – негатив.

**Вариант 11**

При изготовлении комбинированного трафарета получим отверстие в центре, если:

- a) ФР – негатив, ФШ – негатив;
- b) ФР – негатив, ФШ – позитив;
- c) ФР – позитив, ФШ – негатив.

## **2.7. Расчет технологической погрешности изготовления элементов ИМС**

### **2.7.1 Тонкопленочные резисторы (ТПР)**

1. Выбрать материал и способы изготовления тонкопленочных резисторов с заданным сопротивлением и коэффициентом формы.

2. Рассчитать погрешность изготовления геометрии резистора, рисунок которого получен методом прямой контактной маски.

3. Рассчитать погрешность изготовления геометрии резистора, рисунок которого получен с помощью свободной маски.

4. Выбрать материалы контактов и разработать техпроцесс.

Варианты заданий приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Варианты заданий по теме 2.7.1

Вариант	R, Ом	l, мкм	b, мкм	K <sub>ф</sub>
1	200	60	30	
2	1000	200	40	
3	1000	100	50	
4	800	180	60	
5	1200	210	70	
6	1400			2
7	2500			2
8	3000			2
9	2000			20
10	3000			10
11	5000	120	30	
12	10000	240	60	
13	15000			20
14	20000	200	50	
15	25000			10

### 2.7.2 Тонкопленочные конденсаторы (ТПК)

1. Выбрать материалы и способы изготовления ТПК заданной емкости. Рассчитать толщину диэлектрика. Выбрать материалы диэлектрика и обкладок. Рассчитать геометрические размеры обкладок. Предложить способы получения пленок и разработать техпроцесс. Варианты заданий приведены в таблице 2.7.

2. Рассчитать и построить на одном графике зависимости удельной емкости и рабочего напряжения от толщины диэлектрика  $\varepsilon = 1 - 100$  и  $E_{пр} = 10^5 - 10^7$  В/см. Выбрать минимальную толщину диэлектрика SiO с обкладками из Al и Ag.

3. Рассчитать и построить на одном графике зависимость удельной емкости и рабочего напряжения от толщины

диэлектрика для конденсатора Al – SiO – Al. Выбрать минимальную толщину диэлектрика для  $U_{\text{раб}} = 10 \text{ В}$ .

Таблица 2.7 - Варианты заданий по теме 2.7.2

Вариант	Удельная емкость, $C_0, \text{ пФ/см}^2$	$U_{\text{раб}}, \text{ В}$	$E_{\text{пр}}, \text{ В/см}$	Коэффициент запаса, $K_z$
1	70000	15	$1 \cdot 10^6$	3
2	32000	20	$1 \cdot 10^6$	3
3	85000	15	$8 \cdot 10^5$	2
4	30000	25	$1,5 \cdot 10^6$	4
5	55000	20	$7 \cdot 10^6$	2
6	60000	20	$2 \cdot 10^6$	4
7	8000	60	$2 \cdot 10^6$	2
8	16500	50	$6 \cdot 10^6$	4
9	100000	15	$2 \cdot 10^6$	3
10	17000	20	$1,5 \cdot 10^6$	4
11	6500	20	$1,5 \cdot 10^6$	4
12	65000	15	$2 \cdot 10^6$	3
13	2000	15	$1,8 \cdot 10^6$	3
14	4000	20	$4 \cdot 10^6$	3
15	15000	20	$1 \cdot 10^6$	3



### 3. ДОМАШНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

#### 3.1. Индивидуальное задание № 1

##### Вариант 1

Сравнить процесс распыления и испарения вольфрама и алюминия. Какие можно сделать практические и теоретические выводы из полученных результатов?

##### Вариант 2

Предлагается получить пленку кермета, состоящего из 50 % монооксида кремния и 50 % хрома. Рассмотреть стехиометрию этих пленок в зависимости от способов осаждения.

##### Вариант 3

Напылить пленку рения на подложку 60x48 мм с разбросом удельного сопротивления 5 %. Предложить конкретные способы напыления, рассчитать режимы напыления.

##### Вариант 4

Предлагается получить пленку сернистого кадмия (CdS) двумя методами: термическим испарением и высокочастотным распылением. Объяснить механизм испарения CdS, рассчитать скорости испарения отдельных компонент соединения и ответить на вопрос, каким способом при испарении получить пленки CdS стехиометрического состава? Объяснить механизм высокочастотного распыления мишени из CdS, рассчитать отношение потока серы к потоку кадмия при распылении. На основе полученных результатов рекомендовать способ получения пленок CdS.

##### Вариант 5

Предлагается получить пленки тантала и окиси тантала ( $Ta_2O_5$ ), используя катодное распыление. Рассчитать режимы напыления и определить время напыления структуры Ta –  $Ta_2O_5$  - Ta со следующими толщинами: Ta – 0,2 мкм,  $Ta_2O_5$  - 0,5 мкм.

## Вариант 6

Исследовать зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов для различных комбинаций ион – атом мишени. Материал мишени – Ta, Cu, Ag. Ион – криптон. Энергия – 25 кэВ.

## Вариант 7

Требуется изготовить тонкопленочную индуктивность на основе пленочной системы хром – медь – золото с суммарной толщиной 3 мкм. Рассчитать требуемые размеры мишени, энергию и плотность тока ионов, чтобы время напыления не превышало 10 мин.

## Вариант 8

Исследовать зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов для различных комбинаций ион – атом мишени. Материал мишени – Cu. Ионы:  $Ne^+$   $E = 28$  кэВ,  $Ne^+$   $E = 14$  кэВ.

## Вариант 9

Исследовать влияние энергии ионов на коэффициент распыления в широком диапазоне энергий от  $E_{пор}$  до  $E_{max}$  для легких (He) и тяжелых (Ag) ионов. Мишень – Cu.

## Вариант 10

Исследовать влияние массы бомбардирующей частицы на коэффициент распыления при  $E=const$ .

## Вариант 11

Исследовать влияние материала мишени на коэффициент распыления (легкоплавкие Si и тугоплавкие Ta материалы). Сравнить с испарением.

## Вариант 12

Рассмотреть угловое распределение испаренных и распыленных атомов из монокристаллических мишеней. Испаритель взять реальной конфигурации.

## Вариант 13

Рассчитать время напыления пленки меди толщиной 10 мкм методом катодного распыления в зависимости от геометрии устройства распыления.

## Вариант 14

Исследовать зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов для различных комбинаций ион – атом мишени. Материал мишени – Cu, ионы – He, Ne, Ar, энергия – 8 кэВ.

## Вариант 15

Рассчитать время напыления пленки золота толщиной 1 мкм методом катодного распыления в зависимости от энергии и плотности тока ионов аргона.

## Вариант 16

Исследовать зависимость коэффициента распыления от типа столкновений при распылении меди ионами аргона.

## Вариант 17

Предлагается получить пленку ZnS двумя способами: испарением и катодным распылением. Рассчитать стехиометрию пленок ZnS, получаемых этими методами.

## Вариант 18

Ионно-плазменное распыление как метод получения пленок. Выбрать энергию для эффективного распыления золота ионами аргона.

## Вариант 19

Рассчитать скорость распыления мишени из ванадия легкими ( $\text{He}^+$ ) и тяжелыми (Xe) ионами с энергией 2 кэВ. Каким образом зависимость скорости распыления от  $M^{1/2}$  подтверждает импульсную теорию ионного распыления?

## Вариант 20

Рассчитать время напыления структуры Ta – Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Au методом катодного распыления. Толщины пленок 0,5 мкм.

## Вариант 21

Рассчитать скорость распыления мишени из магния и платины ионами аргона с различной энергией. Сравнить с испарением.

## Вариант 22

Требуется получить пленку кремния, легированную углеродом от 10 до 50 % путем распыления из одной составной мишени при различных степенях легирования.

## Вариант 23

Для получения пленки из силицида молибдена MoSi используется распыление из двух мишеней. Рассчитать соотношение площадей мишеней для получения пленок стехиометрического состава.

## Вариант 24

Требуется получить оптическое покрытие  $TiO_2$  толщиной 0,2 мкм методом реактивного катодного распыления. Рассчитать время напыления.

## Вариант 25

Предлагается получить пленку силицида платины PtSi путем распыления из двух мишеней одинаковой площади. Рассчитать скорость одинаковой площади. Рассчитать скорость распыления этих мишеней для получения пленок стехиометрического состава.

## Вариант 26

Рассмотреть угловое распределение для поликристаллической и монокристаллической мишеней из меди ионами аргона.

## Вариант 27

Обосновать выбор технологии напыления пленок вольфрама с разбросом толщины пленки на подложке  $60 \times 48 \text{ мм}^2$  не более 5 %. Каким образом обеспечить требуемую скорость конденсации, чтобы время напыления пленки толщиной 0,03

мкм не превышало 1-2 мин?  $T = 3500 - 4000 \text{ K}$ .  $M = 183,8$ ;  $A = 9,24$ ;  $B = 40260$ ;  $\gamma = 19,3 \text{ г/см}^3$ .

#### Вариант 28

Изложить проблему получения резистивных пленок стехиометрического состава на основе керметов. Показать возможность получения пленок состава: 50 % SiO : 50 % Cr путем испарения из отдельных источников.

#### Вариант 29

Обосновать выбор способа испарения для получения пленки SiO толщиной 0,1 мкм на площади 125x125 мм с разбросом не более 5 %. Рассчитать требуемые технологические параметры:  $M_{\text{SiO}} = 44$ ;  $\gamma = 2,15 \text{ г/см}^3$ ;  $p_s = 1,33 \text{ Па}$ .

#### Вариант 30

Изложить проблему получения пленок сплава пермаллоя стехиометрического состава: 85 % Ni – 15 % Fe. При температуре испарения 1873 К для Ni  $p_s = 4,7 \text{ Па}$ , для железа  $p_s = 6,4 \text{ Па}$ . При температуре 2273 К для никеля  $p_s = 404,6 \text{ Па}$ , для железа  $p_s = 739,2 \text{ Па}$

#### Вариант 31

Оценить роль давления остаточных газов при получении пленок кремния методом термического испарения в вакууме.

#### Вариант 32

Обосновать технологию получения пленок CdS стехиометрического состава, используя следующие методы: непосредственное испарение из одного испарителя, из двух испарителей и «взрывное испарение».

### 3.2. Индивидуальное задание № 2

#### Вариант 1

Основные виды и причины брака при фотолитографии. Исследовать зависимость выхода годных кристаллов после 5

литографических процессов от толщины слоя резиста, если каждая пластина содержит 150 кристаллов, каждый кристалл имеет активную площадь  $0,2 \text{ см}^2$ .

#### Вариант 2

Описать технологический процесс фотолитографии. Производительность оборудования. Необходимо выбрать толщину резиста, исходя из следующих данных:

- минимальный размер элемента топологии составляет 1,5 мкм;
- в течение каждого дня должны быть полностью обработаны 2000 пластин (при работе в три смены, т.е. в течение 20 ч/день).

#### Вариант 3

Представить технологический процесс формирования ИМС, состоящей из пяти топологических слоев. Изложить проблемы совмещения и экспонирования. Определить допуск на размеры элементов, если минимальный размер элементов составляет 2 мкм. Определить величину допуска совмещения.

#### Вариант 4

Представить схему установки проекционной литографии без изменения масштаба переноса изображения. Достоинства и недостатки. Установить взаимосвязь между разрешающей способностью и глубиной резкости для проекционного объектива с различной числовой апертурой NA.

#### Вариант 5

Представить когерентную и некогерентную проекционные системы экспонирования. Рассчитать минимальную ширину линии, которая может быть передана этими системами в зависимости от длины волны излучения и апертуры объектива.

#### Вариант 6

Представить схему установки проекционной литографии. Объяснить, что означает «функция модуляции

передачи» (ФМП) для проекционной системы экспонирования. Рассчитать зависимость ФМП для некогерентной системы экспонирования от частоты решетки. Используя полученные результаты, оценить разрешающую способность когерентных и некогерентных систем экспонирования.  $\lambda = 400$  нм;  $NA = 0,35$ .

#### Вариант 7

Технологический процесс фотолитографии. Представить формирование изображения с помощью фотошаблона, в центре которого имеется светлое поле в виде длинной светлой полосы шириной  $b$ . Рассчитать распределение интенсивности света, прошедшего через указанный фотошаблон в системе экспонирования с зазором  $h$ . Объяснить, к чему приведут дифракционные явления для позитивного резиста.  $\lambda = 400$  нм,  $h = 40$  мкм,  $b = 2$  мкм.

#### Вариант 8

Представить схему экспонирования с зазором. Рассмотреть формирование изображения рисунка шаблона в виде двух светлых полосок  $b_{\max}$  и малой  $b_{\min}$  ширины. Рассчитать распределение интенсивности света, прошедшего через указанный шаблон. Сделать соответствующие выводы.  $b_{\max} = 4$  мкм,  $b_{\min} = 0,8$  мкм,  $\lambda = 400$  нм.

#### Вариант 9

Представить технологический процесс изготовления фотошаблона с помощью оптического генератора изображения (микрофотонаборной установки). Рассчитать погрешность изготовления эталонного фотошаблона.

#### Вариант 10

Рассчитать погрешность изготовления эталонного фотошаблона для полупроводниковой ИМС с помощью генератора изображений. Размеры элементов: 1; 5 и 10 мкм.

## Вариант 11

Представить технологический процесс изготовления фотошаблона на фотонаборной установке. Рассмотреть дифракционные явления при получении изображения решетки, состоящей из одинаковых параллельных полос шириной  $b$ , расположенные на равных расстояниях  $a$  друг от друга.  $\lambda = 400$  нм,  $b = a = 2$  мкм,  $N = 4$ .

## Вариант 12

Представить схему установки экспонирования с зазором. Рассчитать деградацию края изображения темной полосы при экспонировании с различной величиной зазора  $h$ . Объяснить, к каким нежелательным эффектам могут привести осцилляции интенсивности света как в области тени, так и в области светлых участков позитивного резиста.

## Вариант 13

Представить когерентную и некогерентную проекционные системы экспонирования. Объяснить принцип подавления осцилляций интенсивности света в области изображения для частично когерентных систем освещения в установках проекционного экспонирования. Рассчитать оптимальный угол освещения и размер источника освещения.  $\lambda = 400$  нм,  $h = 10$  мкм,  $L = 20$  см.

## Вариант 14

Основные параметры фоторезиста. Процесс поглощения света негативным фоторезистом. Рассчитать разницу между размером окна в фотошаблоне и размером получаемого изображения при экспонировании с зазором  $h = 40$  мкм. Энергия экспонирования –  $100$  мДж/см<sup>2</sup>.

## Вариант 15

Описать технологический процесс фотолитографии. Представить различные способы нанесения фоторезиста. Рассчитать зависимость толщины слоя резиста от скорости



вращения центрифуги  $\omega$  при различной вязкости резиста  $\nu$ .  $\nu = 0,04-0,06 \text{ мм}^2/\text{с}$ ;  $\omega = 1500-8000 \text{ об/мин}$ .

#### Вариант 16

Технологический процесс фотолитографии. Механизм проявления позитивного фоторезиста. Взаимосвязь между временем экспонирования и проявления при разных толщинах фоторезиста.

#### Вариант 17

Представить схемы установок контактной печати, печати с зазором и проекционной литографии. Для этих случаев показать профили распределения интенсивности света и рассчитать точность воспроизведения изображения линии шириной 2 мкм.

#### Вариант 18

Рассмотреть эффекты геометрической оптики и интерференционные эффекты при экспонировании позитивного фоторезиста. Изложить пути уменьшения влияния этих эффектов на разрешающую способность литографического процесса.

#### Вариант 19

Каким образом влияет толщина слоя фоторезиста, его равномерность и наличие нижележащего технологического рельефа на качество переноса изображения при проекционной фотолитографии? Исследовать влияние этих факторов в диапазоне толщин фоторезиста 0,5-3 мкм при разных значениях  $b_{\min}$  (0,5 мкм и 2,5 мкм).

#### Вариант 20

Рассмотреть методы получения рисунка в технологии ИМС. Представить на качественном уровне профили краев элементов при селективном травлении через маски. Рассчитать зависимость требуемой селективности травления от толщины

пленки для различных профилей краев элементов маски  $\theta$  для случаев изотропного и анизотропного травления.  $\theta = 60^\circ, 90^\circ$ .

#### Вариант 21

Исследовать влияние экспонирования и проявления на разрешающую способность негативных и позитивных фоторезистов.

#### Вариант 22

Выбрать конкретное оборудование для изготовления фотошаблона полупроводниковых ИМС, содержащей элементы с размерами 1 мкм. Точность – 1 %. Диаметр подложки – 100 мм. Число схем – 500.

#### Вариант 23

Рассчитать время изготовления эталонного фотошаблона на фотоповторителе. Диаметр подложки – 100 мм. Число схем – 500.

#### Вариант 24

Рассчитать точность воспроизведения элементов в маске (трафарете) при химическом травлении, приняв  $b_{\min} = 10$  мкм и  $b_{\min} = 50$  мкм.

#### Вариант 25

Процесс химического травления пленки  $\text{SiO}_2$ . Моделирование профиля травления при изотропном химическом травлении при различных временах травления.

#### Вариант 26

Технология изготовления свободных масок: одно-, двух- и трехслойных. Определить минимальные размеры окон и перегородок, которые можно получить с помощью этих масок.

#### Вариант 27

Рассчитать погрешность изготовления эталонного фотошаблона для полупроводниковой ИМС по оптико-

механическому методу (трехступенчатый метод). Размеры элементов: 1, 10, 50 мкм. Точность – 1 %.

#### Вариант 28

Рассчитать погрешность изготовления эталонного фотошаблона для полупроводниковой ИМС по оптико-механическому методу (двухступенчатый метод). Размеры элементов: 1, 10, 50 мкм. Точность – 1 %.

#### Вариант 29

Рассчитать погрешность изготовления эталонного фотошаблона для пленочной ИМС по оптико-механическому методу. Размеры элементов: 30, 60 мкм. Точность – 1 %.

#### Вариант 30

Технология изготовления рабочего фотошаблона с покрытием из хрома. Достоинства и недостатки. Рассчитать погрешность их изготовления, если в эталонном ФШ получены размеры элементов: 0,3; 1,0 мкм.

#### Вариант 31

Технология изготовления цветного ФШ. Достоинства и недостатки. Рассчитать погрешность изготовления, если в эталонном ФШ получены размеры элементов 1, 10 мкм.

#### Вариант 32

Рассчитать погрешность изготовления рабочего фотошаблона для полупроводниковой ИМС с использованием генератора изображений. Размеры элементов: 1, 10, 50 мкм.

#### Вариант 33

Исследовать возможность получения минимального размера  $b_{\min} = 0,13$  мкм с помощью проекционной фотолинтографии с некогерентным источником освещения.

#### Вариант 34

Рассчитать разрешающую способность проекционной фотолинтографии для когерентной и некогерентной систем освещения.

## Вариант 35

Рассчитать дифракционное перераспределение интенсивности света для узкого  $b_{\min} = 0,13$  мкм и широкого  $b_{\min} = 1$  мкм окна в проекционной фотолитографии.

## Вариант 36

Рассчитать требуемую степень анизотропии при травлении пленки рабочего материала толщиной 0,5 мкм при получении размера  $b_{\min} = 0,2$  мкм.

## Вариант 37

Рассчитать минимальное расстояние между линиями шириной 0,5 мкм в пленке толщиной 0,5 мкм, если пленка травится изотропно  $A=1$  и анизотропно  $A=10$ .

## Вариант 38

Рассмотреть оптические эффекты при фотолитографии, обусловленные расходимостью пучка света. Рассчитать возможность получения минимального размера  $b_{\min} = 0,7$  мкм и  $b_{\min} = 0,13$  мкм.

## Вариант 39-44

Рассчитать погрешность изготовления рабочего фотошаблона по оптико-механическому методу для полупроводниковой ИМС.

Вариант	39	40	41	42	43	44
$b_{\min}$ , мкм	1	3	5	7	9	15
Требуемая точность $\delta b$ , %	10	8	6	4	2	1

## Вариант 45-50

Рассчитать погрешность изготовления рабочего фотошаблона с помощью генератора изображения для полупроводниковой ИМС.

Вариант	45	46	47	48	49	50
$b_{\min}$ , мкм	5	10	15	20	25	30

### Вариант 51-58

Выбрать способ изготовления фотошаблона, если необходимо получить заданный размер  $b_{\min}$  с указанной точностью.

Вариант	51	52	53	54	55	56	57	58
$b_{\min}$ , мкм	1	5	10	15	20	25	30	35
Требуемая точность $\delta b$ , %	1	1	1	1	1	1	1	1
Размер кристалла (подложки), мм	3x3	3x2,5	3x2	3x3	8x10	10x12	6x10	15x12

### Вариант 59

Необходимо получить СБИС с размерами элементов менее 1 мкм. Обосновать выбор метода экспонирования. Представить эту систему экспонирования и выбрать параметры.

## 3.3. Индивидуальное задание № 3

### Вариант 1

Разработать технологический процесс изготовления фрагмента тонкопленочной ИМС, состоящего из резисторов из титана и проводников из золота. Предложить способы получения пленок и рассчитать время их напыления.

### Вариант 2

Разработать техмаршрут изготовления резистивной матрицы на основе пленок молибдена и тантала. Проводники – золото. Предложить способы получения пленок и рассчитать время их напыления.

### Вариант 3

Представить техпроцесс изготовления RC-схемы. Резисторы – тантал, проводники – золото; конденсатор: тантал – окись тантала – золото. Предложить способы получения пленок.

Рассчитать время напыления пленок золота методом ионно-плазменного распыления.

#### Вариант 4

Разработать техпроцесс изготовления резистивной матрицы. Резисторы – вольфрам и ванадий; проводники – алюминий. Предложить способы получения пленок и рассчитать время напыления вольфрама.

#### Вариант 5

Разработать техпроцесс RC-схемы, состоящей из резисторов на основе пленок хрома и конденсаторов алюминий – моноокись кремния – алюминий. Предложить способы получения пленок и рассчитать время напыления хрома.

#### Вариант 6

Разработать техмаршрут изготовления резистивной матрицы, содержащей резисторы двух групп:

- первая группа – хром;
- вторая группа – кермет, проводники – алюминий.

Предложить способы получения пленок и рассчитать время напыления алюминия.

#### Вариант 7

Представить процесс изготовления резистивной матрицы на основе пленок хрома и трехслойных проводников: хром – медь – никель. Предложить способы получения пленок и рассчитать время напыления проводников.

#### Вариант 8

Разработать техпроцесс изготовления фрагмента тонкопленочной ИМС, состоящей из хрома – меди – никеля. Предложить способы получения пленок и рассчитать время напыления проводников.

### Вариант 9

Разработать техпроцесс изготовления резистивной матрицы. Резисторы – тантал; проводники – золото. Технология получения пленок. Рассчитать время напыления пленок тантала методом ионно-плазменного распыления.

### Вариант 10

Представить техпроцесс изготовления РС-схемы. Резисторы – хром, проводники: хром – медь – никель. Конденсаторы алюминий – моноокись кремния – алюминий. Технология получения пленок. Рассчитать время напыления пленок хрома.

### Вариант 11

Разработать техпроцесс изготовления фрагмента тонкопленочной ИМС, состоящего из резисторов двух групп:

- первая группа – из кермета;
- вторая группа – из нихрома, проводники – нихром – медь - никель.

Технология получения пленок. Рассчитать время напыления пленок нихрома.

### Вариант 12

Разработать техпроцесс изготовления фрагмента ИМС, состоящего из резисторов на основе пленок вольфрама и конденсаторов алюминий – моноокись кремния – алюминий. Технология получения пленок. Рассчитать время напыления пленок вольфрама методом ионно-плазменного распыления.

### Вариант 13

Разработать техпроцесс изготовления фрагмента ИМС, состоящего из резисторов на основе пленок рения и конденсаторов: алюминий – окись алюминия – алюминий, проводники - алюминий. Технология получения пленок. Рассчитать время напыления пленок рения методом ионно-плазменного распыления.

## Вариант 14

Разработать техпроцесс изготовления фрагмента ИМС, состоящего из резисторов на основе пленок хрома и индуктивностей на основе пленок меди. Технология получения пленок. Рассчитать время напыления пленок меди.

## Вариант 15

Разработать техпроцесс изготовления фрагмента ИМС, состоящего из резисторов - тантал и конденсаторов: тантал – окись тантала – золото. Технология получения пленок. Рассчитать время напыления пленок тантала.

## Вариант 16

Разработать техмаршрут изготовления фрагмента ИМС, состоящего из конденсаторов двух типов:

- первый тип: алюминий – боросиликатное стекло - алюминий;
- второй тип: алюминий –  $Al_2O_3$  - алюминий.

Технология получения пленок. Рассчитать время напыления пленок алюминия.

## Вариант 17

Разработать техмаршрут изготовления резистивной матрицы. Резисторы – кермет, проводники – ванадий – алюминий. Технология получения пленок. Рассчитать время напыления пленок кермета.

## Вариант 18

Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок высокоомных сплавов РС и конденсаторов – алюминий – окись алюминия – алюминий. Технология получения пленок. Рассчитать время напыления пленок алюминия.

## Вариант 19

Разработать техпроцесс изготовления фрагмента ИМС, состоящего из резисторов на основе пленок титана и



конденсаторов: титан – окись титана – золото. Технология получения пленок. Рассчитать время напыления пленок титана.

#### Вариант 20

Представить техпроцесс изготовления резистивной матрицы. Резисторы – тантал, проводник – золото, защита резисторов – окись тантала. Технология получения пленок тантала ионно-плазменным распылением.

#### Вариант 21

Разработать техпроцесс изготовления резистивной матрицы, состоящего из резисторов двух групп: из нихрома и кермета. Для резисторов из нихрома контактные площадки из алюминия. Для резисторов из кермета контактные площадки трехслойные: ванадий – медь – алюминий. Проводники – алюминий. Рассчитать время напыления нихрома.

#### Вариант 22

Разработать техпроцесс изготовления RC-схемы, состоящей из резисторов на основе пленок титана и конденсаторов: титан – окись титана – золото. Защита резисторов – окись тантала. Рассчитать время напыления пленок золота.

#### Вариант 23

Разработать техмаршрут изготовления схемы, состоящей из резисторов на основе пленок хрома и индуктивностей на основе пленок меди. Проводники и контактные площадки трехслойные: хром – медь – никель. Рассчитать время напыления пленок меди.

#### Вариант 24

Разработать техмаршрут изготовления схемы, состоящей из конденсаторов: алюминий – SiO – алюминий и индуктивностей на основе пленок алюминия и меди. Рассчитать время напыления пленок алюминия.

## Вариант 25

Разработать техмаршрут изготовления RC-схемы, состоящей из резисторов на основе пленок тантала и конденсаторов на основе структуры: Ta – Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Au. Все пленки получить методом ионно-плазменного распыления. Рассчитать время напыления пленок тантала и золота.

## Вариант 26

Разработать техмаршрут изготовления RC-схемы, состоящей из резисторов на основе пленок титана и конденсаторов: нижняя обкладка - титан, диэлектрик – окись титана, верхняя обкладка - алюминий. Рассчитать время напыления пленок титана.

## Вариант 27

Разработать техпроцесс изготовления RC-схемы, состоящей из резисторов на основе пленок сплава РС и конденсаторов: Al – боросиликатное стекло – Al. Рассчитать время напыления пленки алюминия.

## Вариант 28

Разработать техпроцесс изготовления фрагмента тонкопленочных ИМС, состоящего из резисторов на основе пленок нихрома. Выбрать материал для проводников и контактных площадок. Предложить способы получения пленок и рассчитать время напыления пленок нихрома.

## Вариант 29

Напылить пленку меди толщиной 2 мкм. Определить температуру испарения и конфигурацию устройства испарения, чтобы время напыления не превышало 5 мин.

## Вариант 30

Рассчитать время напыления 15-слоеного зеркала из чередующихся слоев окиси титана и двуокиси кремния (SiO<sub>2</sub>). Каждый слой имеет толщину, соответствующую  $\lambda/4$  ( $\lambda = 550$  нм).

## Вариант 31

Рассчитать режимы напыления пленок алюминия толщиной 1 мкм для изготовления зеркала диаметром 500 мм.

## Вариант 32

Оценить возможность получения пленок молибдена с разбросом толщины по подложке 60x48 мм в 3 % для реальных условий испарения.

## Вариант 33

Разработать техмаршрут изготовления фрагмента ИМС, состоящего из резисторов на основе пленок хрома и трехслойной металлизации хром – медь – никель. Предложить способы получения пленок и рассчитать время напыления металлизации.

## Вариант 34

Рассмотреть изготовление отражающего покрытия на основе пленок ZnS и германия, нанесенных на пленку алюминия (Al – Ge – ZnS). Предложить способы напыления пленок. Рассчитать время напыления этого покрытия.

## Вариант 35

Рассмотреть время напыления оптической пленочной системы, состоящей из отражающей пленки алюминия толщиной 1 мкм и защитного покрытия из MgF<sub>2</sub> толщиной 0,03 мкм. Предложить способы напыления пленок.

## Вариант 36

Разработать техмаршрут изготовления фрагмента ИМС, состоящего из резисторов двух групп:

- первая группа – из сплава РС – 3710;
- вторая группа – из хрома; проводники: хром – медь – никель.

Технология получения пленок. Рассчитать время напыления пленок хрома.

## Вариант 37

Напылить пленку платины толщиной 0,5 мкм. Определить требуемую температуру испарения при выбранном типе испарителя и расстоянии от испарителя до подложки, чтобы время не превышало 2 мин.

## Вариант 38

Разработать техпроцесс изготовления фрагмента ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок ванадия и индуктивностей: ванадий – медь – никель. Предложить способы получения пленок и рассчитать время напыления пленок ванадия.

## Вариант 39

Выбрать материалы и способы изготовления тонкопленочных конденсаторов с емкостью 100 пФ и рабочим напряжением 15 В.

## Вариант 40

Выбрать материалы и способы изготовления тонкопленочных резисторов с сопротивлением 200 Ом и 20 кОм.

## Вариант 41

Определить толщину диэлектрика и минимальную площадь конденсатора емкостью 200 пФ. Рабочее напряжение – 20 В. Материалы: диэлектрик – окись алюминия; обкладки – алюминий. Обосновать способы получения пленок и определить время напыления пленок.

## Вариант 42

Требуется изготовить тонкопленочную индуктивность на основе пленочной системы: хром – медь – золото с суммарной толщиной 6 мкм. Предложить способы напыления пленок. Рассчитать время напыления пленок.

## Вариант 43

Рассчитать геометрию резисторов с сопротивлением 0,5 кОм и конденсаторов с емкостью 100 пФ, входящих в ИМС. Выбрать материалы и способы напыления пленок.

## Вариант 44

Разработать техмаршрут изготовления гибридной интегральной схемы СВЧ диапазона с распределенными параметрами, содержащей резисторы с  $\rho_s = 100 - 300 \text{ Ом}/\square$ . Рассчитать время напыления пленок.

## Вариант 45

Разработать техмаршрут изготовления ГИС СВЧ, содержащей резисторы и конденсаторы. Рассчитать время напыления пленок. Представить сборочные операции.

## Вариант 46

Разработать техмаршрут изготовления ГИС СВЧ, содержащей высокоомные резисторы  $\rho_s = 500 \text{ Ом}/\square$ . Рассчитать время напыления пленок. Представить сборочные операции.

## Вариант 47

Разработать техмаршрут изготовления тонкопленочного транзистора на CdS. Выбрать методы получения пленок, рассчитать время напыления.

## Вариант 48

Изготовление отражающих покрытий для вакуумного УФ излучения на основе пленок алюминия. Рассчитать время напыления пленок и коэффициент отражения в зависимости от толщины пленок. Сравнить с пленками золота и платины.

## Вариант 49

Изготовление отражающих покрытий в области вакуумного ультрафиолета на основе пленочных систем, увеличивающих отражение. Выбор материалов и способов их напыления. Рассчитать время напыления пленок.

## Вариант 50

Разработать техмаршрут изготовления ГИС СВЧ, содержащей резисторы  $\rho_s = 100 \text{ Ом}/\square$  и  $\rho_s = 500 \text{ Ом}/\square$ . Выбрать материалы, технологию их получения и рассчитать время напыления пленок.

## Вариант 51

Изготовить тонкопленочные конденсаторы: нижняя обкладка – тантал, диэлектрик – окись тантала, верхняя обкладка – золото. Емкость конденсатора 330 пФ, рабочее напряжение 30 В. Выбрать толщину диэлектрика и рассчитать активную площадь конденсатора. Обосновать выбор способов напыления всех пленок и определить время напыления. Поэтапная технология.

## Вариант 52

Разработать тонкопленочный конденсатор емкостью 50 пФ на частоту 1 ГГц и рабочее напряжение 20 В. Выбрать материал подложки. Рассмотреть параметры ТПК с однослойным диэлектриком  $\text{SiO}_2$  и двухслойным, состоящим из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Выбрать толщины диэлектрических пленок. Определить активную площадь конденсатора. Обосновать выбор толщины обкладок из различных материалов, исходя из условия, чтобы потери в ТПК были обусловлены в основном вкладом от диэлектрика. Поэтапная технология изготовления ТПК.

## Вариант 53

Разработать техпроцесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок нитрида тантала и конденсаторов с диэлектриком – окись тантала. Выбрать материалы для обкладок, проводников и контактных площадок. Рассчитать режимы напыления всех пленок. Поэтапная технология.

## Вариант 54

Изготовить резистивную матрицу на основе пленок тантала с точностью 5 %. Изложить проблемы воспроизводимости параметров пленок. Рассчитать технологические погрешности и предложить пути их уменьшения.

## Вариант 55

Выбрать материалы для тонкопленочных резисторов с сопротивлением 1 кОм и коэффициентом формы не более 100. рассчитать режимы напыления пленок и технологические погрешности для различных способов получения рисунка.

## Вариант 56

Разработать техпроцесс изготовления тонкопленочной схемы, состоящей из резисторов на основе пленок кермета ( $\text{SiO} - 50\%$ ,  $\text{Cr} - 50\%$ ) и конденсаторов алюминий – моноокись кремния – алюминий. Выбрать способы получения рисунка и рассчитать режимы напыления и технологические погрешности.

## Вариант 57

Изготовить тонкопленочный конденсатор (ТПК) емкостью 100 пФ на основе пленок  $\text{SiO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Выбрать материалы обкладок. Рассчитать режимы напыления пленок и технологические погрешности изготовления ТПК.

## Вариант 58

Разработать техпроцесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок нихрома и конденсаторов с диэлектриком – окись алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Выбрать материалы для обкладок, проводников и контактных площадок. Рекомендовать методы напыления. Рассчитать режимы напыления всех пленок.

## Вариант 59

Изготовить тонкопленочные конденсаторы емкостью 100 пФ, рабочее напряжение 15 В на основе пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

выбрать материалы обкладок. Рассчитать режимы напыления. Изложить поэтапную технологию.

#### Вариант 60

Разработать технологию получения резисторов на основе пленок вольфрама и многокомпонентных сплавов РС методом катодного распыления. Рассмотреть проблемы воспроизводимости параметров пленок. Рассчитать режимы напыления и технологические погрешности.

#### Вариант 61

Разработать тонкопленочный конденсатор емкостью 500 пФ с рабочим напряжением 50 В с диэлектриком  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ . Выбрать толщину диэлектрика и рассчитать активную площадь конденсатора. Выбрать материалы обкладок. Рассчитать режимы напыления пленок. Изложить поэтапную технологию для всех конденсаторов.

#### Вариант 62

Разработать техпроцесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок вольфрама и конденсаторов с диэлектриком  $\text{SiO}_2$ . Выбрать материалы для обкладок, проводников и контактных площадок. Рекомендовать методы напыления. Рассчитать режимы напыления всех пленок.

#### Вариант 63

Рассчитать погрешности изготовления тонкопленочных резисторов на основе пленок хрома с номиналом 1 кОм. Методы получения рисунка – контактные и свободные маски.

#### Вариант 64

Изготовить тонкопленочные резисторы на основе пленок вольфрама с номиналом 1 кОм с точностью 1 %. Рассчитать требуемые параметры напыления геометрию устройства напыления.



## Вариант 65

Разработать поэтапную технологию изготовления тонкопленочной индуктивности. Рассчитать время изготовления индуктивности.

## Вариант 66

Разработать поэтапную технологию изготовления ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок нихрома и конденсаторов с диэлектриком SiO. Выбрать материалы обкладок, проводников и контактных площадок. Рассчитать режимы напыления пленок.

## Вариант 67

Для изготовления тонкопленочного конденсатора (ТПК) рассчитать и построить на одном графике зависимости удельной емкости и рабочего напряжения от толщины диэлектрика в диапазоне  $\varepsilon = 1 - 1000$  и  $E_{пр} = 10^5 - 10^7$  В/см. Рассчитать минимальную площадь конденсатора, если в качестве диэлектрика взять SiO, а в качестве обкладок – Al. Предложить способы испарения SiO, Al и режимы напыления. Как изменится площадь ТПК, если в качестве диэлектрика взять TiO<sub>2</sub> или оставить SiO, но заменить алюминий на серебро. Емкость ТПК 100 пФ.

## Вариант 68

Сравнить геометрию тонкопленочного резистора на 100 кОм с использованием двух материалов: нитрида тантала и кермета SiO+Cr (50:50). Рекомендовать режимы осаждения этих пленок. Представить поэтапную технологию.

## Вариант 69

Изготовить резистивную матрицу на основе пленок сплава РС-3710 с точностью 10 %. Способ получения – свободные маски. Рассчитать режимы напыления пленок и геометрию устройства.

## Вариант 70

Разработать технологию изготовления прозрачного ФШ с размерами элементов 0,1; 0,3; 1,0 мкм. Рассчитать

погрешность изготовления ФШ, если точность изготовления элементов должна составлять 1 %.

#### 4. АУДИТОРНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

##### 4.1. Контрольная работа № 1

Вариант 1

1. Что определяет давление насыщенных паров металлов при термическом испарении в вакууме?
2. Модель ионного распыления. Какая минимальная энергия необходима для распыления?
3. Рассчитать скорость испарения алюминия при температуре выше условной на 10 %. Для алюминия:  $A = 11,11$ ;  $B = 15630$ ;  $M=27$ ;  $T_{\text{усл}}=1423$  К.
4. Представить зависимость коэффициента распыления от энергии иона в диапазоне 50-150 эВ для мишени из меди при бомбардировке ионами аргона, если при  $E = 50$  эВ  $S = 0,05$  атом/ион.

Вариант 2

1. Чем определяется количество вещества, испаренного в угол  $d\omega$  для точечного испарителя?
2. Зависимость коэффициента распыления от энергии для легких и тяжелых ионов.
3. Рассчитать время напыления пленок меди толщиной 1 мкм в центре подложки. Медь испаряется из поверхностного испарителя площадью  $1 \text{ см}^2$ . Расстояние от испарителя до подложки 10 см, скорость испарения  $7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ . Плотность меди  $\gamma = 8,96 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .
4. Представить зависимость  $S$  от  $E$  в диапазоне от пороговой до 200 эВ. Мишень – тантал, ион – аргон.  $S = 0,01$  при  $E = 50$  эВ;  $S = 0,1$  при  $E = 100$  эВ;  $S = 0,4$  при  $E = 200$  эВ.  $M_1 = 40$ ,  $M_2 = 181$ ;  $E_{\text{суб}} = 8,7$  эВ.

## Вариант 3

1. Как зависит скорость конденсации при термическом испарении от расстояния испаритель-подложка?
2. Получение пленок из тугоплавких металлов ионно-плазменным распылением. Скорость распыления.
3. Для получения чистых пленок германия необходимо, чтобы степень загрязнения не превышала 0,001. Рассчитать требуемый для выполнения этого условия поток испаренных молекул, если  $\cos \varphi = \cos \theta = 1$ ,  $h = 7$  см,  $S_{\text{и}} = 1,5$  см<sup>2</sup>. Давление остаточных газов в рабочем объеме  $10^{-3}$  Па. Для азота:  $M = 14,01$ ;  $T = 300$  К.
4. Рассчитать зависимость  $S$  от угла падения ионов на мишень  $\varphi$  в диапазоне  $0-50^\circ$ , если  $S_0 = 1,2$ .

## Вариант 4

1. Чему равно давление насыщенных паров при испарении двухкомпонентных сплавов?
2. Модель ионного распыления. Какой атом из каскада смещенных способен стать распыленным?
3. Сравнить возможность получения методом термического испарения в вакууме пленок следующих металлов: галлий ( $T_{\text{пл}} = 300$  К;  $T_{\text{и}} = 1405$  К), алюминий ( $T_{\text{пл}} = 906$  К;  $T_{\text{и}} = 1490$  К), тантал ( $T_{\text{пл}} = 3080$  К;  $T_{\text{и}} = 3300$  К).
4. Рассчитать скорость распыления мишени из кремния.  $S = 1,45$ ;  $j = 10$  А/м<sup>2</sup>;  $N_0 = 5 \cdot 10^{28}$  атом/м<sup>3</sup>.

## Вариант 5

1. Как изменится время напыления с увеличением температуры испарения?
2. Модель ионного распыления. Коэффициент распыления с увеличением температуры мишени увеличивается, уменьшается или не изменяется?
3. Выберите тип (конструкцию) испарителя для испарения алюминия и вольфрама при условной температуре испарения.  $T_{\text{Al}} = 1490$  К;  $T_{\text{W}} = 3500$  К.

4. Объяснить механизм получения пленок двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) методом реактивного катодного распыления. Рассчитать скорость распыления при условиях:  $S = 2$ ;  $j = 5 \text{ A/m}^2$ ;  $N_0 = 5 \cdot 10^{28} \text{ атом/м}^3$ .

#### Вариант 6

1. Рассмотреть процесс испарения путем нагрева ускоренными электронами.
2. Скорость осаждения пленок при ионно-плазменном распылении. Параметры, с помощью которых можно управлять временем напыления пленок.
3. Определить расстояние от испарителя до подложки с разбросом толщины пленки по подложке размером  $60 \times 48 \text{ мм}^2$  не более 10 %. Испаритель - поверхностный.
4. Объяснить влияние массы бомбардирующих ионов на распыление согласно импульсной теории распыления. Оценить возможность распыления вещества электронами.

#### Вариант 7

1. В каком случае рекомендуется метод «взрывного» испарения и почему?
2. Сравнить термическое испарение с ионно-плазменным распылением на примере получения пленок тантала.
3. При каком давлении газа в рабочем объеме скорость конденсации золота уменьшится в 2 раза. Расстояние от подложки до испарителя 10 см. Для золота:  $A = 10,77$ ;  $B = 18520$ ,  $T_{\text{и}} = 1738 \text{ K}$ .
4. Объяснить механизм получения пленок  $\text{ZnS}$  стехиометрического состава путем распыления из мишени. Сравнить с испарением.

#### Вариант 8

1. Чем определяется количество вещества, испаренного в угол  $d\varpi$  для поверхностного испарителя?

2. Модель ионного распыления. Энергия распыленных атомов по сравнению с энергией испаренных атомов больше, равна или меньше?
3. Рассчитать скорость испарения алюминия при температуре выше условной на 20 %. Для алюминия:  $A = 11,11$ ;  $B = 15630$ ;  $M=27$ ;  $T_{\text{усл}}=1423$  К.
4. Рассчитать пороговую энергию для распыления мишени из вольфрама ионами аргона ( $M_1 = 40$ ) и гелия ( $M_1 = 4$ ) с одинаковой энергией.  $E_{\text{суб}} = 8,76$  эВ;  $M_2 = 183,8$ .

#### Вариант 9

1. Объяснить зависимость скорости испарения от температуры испарения.
2. Модель ионного распыления. Типы столкновений.
3. Рассчитать время напыления пленок меди толщиной 0,5 мкм в центре подложки. Медь испаряется из поверхностного испарителя площадью  $1 \text{ см}^2$ . Расстояние от испарителя до подложки 10 см, скорость испарения  $2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ . Плотность меди  $\gamma = 8,96 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .
4. Рассчитать скорость распыления мишени из алюминия ионами аргона при  $S = 1,75$ ;  $j = 10 \text{ А/м}^2$ ;  $N_0 = 6 \cdot 10^{28} \text{ атом/м}^3$ .

#### Вариант 10

1. Особенности испарения соединения  $CdS$ .
2. Что такое коэффициент распыления и его зависимость от угла падения ионов?
3. Определить необходимое расстояние от точечного испарителя до подложки с разбросом толщины пленки по подложке  $60 \times 48 \text{ мм}^2$  не более 10 %.
4. Объяснить механизм получения пленок нитрида тантала методом реактивного катодного распыления. Рассчитать время напыления пленок толщиной 0,1 мкм при следующих условиях:  $S = 1,5$ ;  $j = 7 \text{ А/м}^2$ ;  $N_0 = 5,52 \cdot 10^{28} \text{ атом/м}^3$ . Принять, что скорость конденсации равна скорости распыления.

## Вариант 11

1. Для каких целей рекомендуется метод термического испарения с помощью электронных испарителей?
2. Модель ионного распыления. В каком случае максимально передаваемая энергия от иона атомам мишени будет больше: для легких или тяжелых ионов?
3. Рассчитать время напыления пленок меди толщиной 0,2 мкм в центре подложки. Медь испаряется из поверхностного испарителя площадью 1 см<sup>2</sup>. Расстояние от испарителя до подложки 10 см, скорость испарения  $1 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>2</sup>·с. Плотность меди  $\gamma = 8,96 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.
4. Рассчитать скорость распыления мишени из тантала.  $S=1,48$ ;  $j=10$  А/м<sup>2</sup>;  $N_0 = 5,52 \cdot 10^{28}$  атом/м<sup>3</sup>.

## Вариант 12

1. Что нужно сделать, чтобы уменьшить время напыления пленки при термическом испарении?
2. Выбрать энергию для эффективного распыления мишени.
3. Можно ли получить резистивную пленку хрома с разбросом толщины пленки по подложке в 3 % при испарении из поверхностного и точечного испарителей при расстоянии  $h$  не более 25 см?
4. Представить зависимость  $S$  от  $E$  в диапазоне от пороговой энергии до 700 эВ для распыления молибдена ионами неона и ксенона, если  $S = 1,3$  для ксенона ( $M_{Xe} = 131,3$ ) и  $S = 0,5$  для неона ( $M_{Ne} = 20,18$ ). Объяснить характер зависимости при дальнейшем увеличении энергии.  $E_{суб} = 6,9$  эВ.

## Вариант 13

1. Почему при термическом испарении трудно получать пленки сложных соединений стехиометрического состава?
2. Представить механизм распыления. Определить тип столкновения при бомбардировке ионами с энергией 10 и 100 кэВ, если  $E_A=34,7$  кэВ и  $E_B=49098$  кэВ.

3. Рассчитать скорость испарения алюминия при температуре выше условной на 30 %. Для алюминия:  $A = 11,11$ ;  $B = 15630$ ;  $M=27$ ;  $T_{\text{усл}}=1423$  К.
4. Рассчитать скорость распыления мишени из алюминия.  $S=1,75$ ;  $j=10$  А/м<sup>2</sup>;  $N_0 = 6,04 \cdot 10^{28}$  атом/м<sup>3</sup>.

#### Вариант 14

1. Как надо выбрать температуру испарителя при «взрывном» методе испарения?
2. Модель распыления. Коэффициент распыления с увеличением температуры мишени увеличивается, уменьшается или не изменяется?
3. Изобразить графически закон Рауля при испарении сплава нихрома при температуре 1573 К. Для хрома:  $p_s = 0,24$  Па;  $f = 1$ . Для никеля:  $p_s = 0,033$  Па;  $f = 1$ . Определить общее давление пара сплава нихрома, содержащего 80 % Ni и 20 % Cr.
4. Сравнить среднюю энергию распыленных атомов со средней энергией испаренных атомов меди и сделать практические рекомендации.  $E_{\text{ср}}=5\text{эВ}$ ,  $T_{\text{и}} = 1546$  К.

#### Вариант 15

1. Как надо выбирать расстояние от испарителя до подложки при получении пленок стехиометрического состава двухкомпонентных соединений, если испарение ведется одновременно из двух испарителей?
2. Импульсная теория распыления. Возможно ли распыление вещества электронами средних энергий?
3. Необходимо получить пленку меди толщиной 2 мкм. Какова должна быть скорость конденсации меди, чтобы время напыления не превышала 5 минут?
4. Рассчитать пороговую энергию при распылении серебра ионами гелия ( $M_1=4$ ), аргона ( $M_1=40$ ) и ртути ( $M_1=200$ ).  $M_2=107,8$ ;  $E_{\text{суб}}=2,7\text{эВ}$ . Объяснить полученные результаты.

## 4.2. Контрольная работа № 2

### Вариант 1

1. Погрешности геометрии тонкопленочного резистора, рисунок которого получен с помощью контактной маски.
2. Рассчитать параметры проекционной системы для получения размера элемента  $b = 0,8$  мкм.
3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения резистора шириной 30 мкм с точностью 1 % для полупроводниковой ИМС?
4. Какое оборудование необходимо выбрать для получения эталонного ФШ для пленочной схемы, если увеличение оригинала M20:1?

### Вариант 2

1. Выбор материалов для тонкопленочных проводников и контактных площадок
2. Какую глубину резкости стремятся обеспечить в проекционных системах экспонирования? Выбрать числовую апертуру объектива для получения размера  $b = 1$  мкм,  $\lambda = 400$  нм.
3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения резистора в пленочной схеме шириной 200 мкм с точностью 1 %?
4. Какой масштаб оригинала можно выбрать, если имеется оборудование: координатограф с полем 750 x 750 мм и редуцирующая установка. Необходимо получить ФШ для пленочной схемы.

### Вариант 3

1. Удельное поверхностное сопротивление тонкопленочных резисторов.
2. Определить разрешающую способность для метода бесконтактного экспонирования, если  $\lambda = 436$  нм, а ширина зазора изменятся от 10 до 40 мкм.



3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения наименьшего зазора 10 мкм в полупроводниковой ИМС с точностью 2 %?
4. Какой масштаб оригинала можно выбрать, если необходимо получить ФШ полупроводниковой ИМС на редуцированной установке?

#### Вариант 4

1. Определить выход годных ИМС после пяти фотолитографических операций, если на каждой операции он составляет 90 %?
2. Какой минимальный размер линии может быть передан когерентной системой экспонирования для двух длин волн:  $\lambda_1 = 400$  нм,  $\lambda_2 = 200$  нм;  $NA = 0,25$ .
3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения резистора шириной 50 мкм в полупроводниковой ИМС с точностью 1 %?
4. Материалы для тонкопленочных резисторов.

#### Вариант 5

1. Рассчитать выход годных кристаллов для одной фотолитографической операции, если площадь кристалла  $0,2$  см<sup>2</sup>, а толщина резиста 1 мкм.
2. Какой масштаб оригинала выбрать для получения резистора в пленочной схеме шириной 200 мкм с точностью 1 %?
3. В каком случае можно получить контакты к полоске резистора методом обратной ФР-маски:
  - а) ФР-позитив, ФШ – позитив;
  - б) ФР – негатив; ФШ – негатив;
  - в) ФР – негатив; ФШ – позитив.
4. Какое оборудование необходимо выбрать для получения эталонного ФШ, если увеличение оригинала М10:1?

#### Вариант 6

1. Погрешность изготовления рабочего ФШ по оптико-механическому методу.

2. Объяснить, почему светочувствительность позитивных ФР выше, чем негативных.
3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения пленочного резистора шириной 50 мкм с точностью 1 %?
4. Какой масштаб оригинала можно выбрать, если необходимо получить ФШ полупроводниковой ИМС, имея координатограф с полем 1200 x 1200 мм, редуцирующую камеру и фотоповторитель.

#### Вариант 7

1. Параметры тонкопленочных конденсаторов.
2. Оценить величину зазора, при которой можно получить минимальный размер 0,7 мкм при  $\lambda = 365$  нм.
3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения резистора шириной 20 мкм с точностью 1 % для полупроводниковой ИМС?
4. Какое оборудование необходимо выбрать для получения эталонного ФШ, если увеличение оригинала М50:1?

#### Вариант 8

1. Определить выход годных кристаллов после шести литографических операций, если 10 % кристаллов будут дефектными в каждом процессе ФЛ.
2. Светочувствительность негативных и позитивных ФР.
3. Какой масштаб оригинала можно выбрать, если необходимо получить ФШ пленочной схемы на редуцирующей установке. Поле координатографа 1200 x 1200 мм?
4. Какой необходимо выбрать ФР и ФШ для получения методом обратной ФР-маски полосы резистора, расположенной в центре подложки:
  - а) ФР – негатив; ФШ – позитив;
  - б) ФР – позитив; ФШ – позитив;
  - в) ФР – негатив; ФШ – негатив.

## Вариант 9

1. Погрешность геометрии тонкопленочного резистора, рисунок которого получен с помощью свободной маски.
2. Каков должен быть процент выхода годных кристаллов на каждой литографической операции, если после 10 фотолитографий окажется годным 31 %?
3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения резистора шириной 20 мкм с точностью 2 % в пленочной ИМС?
4. Разрешающая способность фоторезистов.

## Вариант 10

1. Рассчитать плотность дефектов резиста от его толщины в диапазоне (0,2 – 3) мкм. Сделать выводы.
2. Бесконтактная фотолитография (ФЛ на микрозазоре). Рассчитать разрешающую способность при  $\lambda = 436$  нм при зазоре от 10 до 40 мкм.
3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения резистора шириной 100 мкм с точностью 1 % для пленочной схемы. Размер схемы: 12 x 15 мм.
4. Технология изготовления рабочих ФШ, если имеется эталонный ФШ.

## Вариант 11

1. Выбор материала диэлектрика для тонкопленочных конденсаторов. Выбор толщины диэлектрика.
2. Рассчитать минимальную ширину линии, которая может быть передана когерентной и некогерентной системами экспонирования.  $\lambda = 436$  нм,  $NA = 0,35$ .
3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения резистора шириной 100 мкм с точностью 2 % в пленочной схеме?
4. Техпроцесс изготовления рабочего ФШ, если масштаб оригинала M500:1.

## Вариант 12

1. Технология изготовления тонкопленочной индуктивности.
2. Выбрать  $NA$  и  $\lambda$  проекционной системы для получения размера  $0,8$  мкм, если  $\Delta f$  должно быть не менее  $6$  мкм.
3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения зазора  $20$  мкм с точностью  $1\%$  для полупроводниковой ИМС?
4. Модуляционная передаточная функция проекционных систем.

## Вариант 13

1. Какое оборудование необходимо выбрать для получения эталонного ФШ, если увеличение оригинала  $M_{20:1}$ ?
2. Какую глубину резкости стремятся обеспечить в проекционных системах экспонирования? Выбрать числовую апертуру объектива:  $\lambda = 400$  нм;  $NA = 0,17 - 0,45$ ;  $b_{\min} = 1$  мкм.
3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения резистора в пленочной схеме шириной  $50$  мкм с точностью  $1\%$ ?
4. Качество оптического изображения проекционной ФЛ (МПФ).

## Вариант 14

1. Технология изготовления трафаретов. Погрешности.
2. Бесконтактная фотолитография. Рассчитать разрешающую способность.
3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения резистора шириной  $100$  мкм с точностью  $1\%$  для пленочной схемы.
4. Когда можно получить контакты к полоске резистора методом обратной ФР-маски:
  - а) ФР – позитив; ФШ – негатив;
  - б) ФР – позитив; ФШ – позитив;
  - в) ФР – негатив; ФШ – негатив.

## Вариант 15

1. Схема переноса изображения при проекционной ФЛ.

2. Оценить величину зазора, при которой можно получить минимальный размер 1 мкм,  $\lambda = 365$  нм.
3. Какой масштаб оригинала выбрать для получения пленочного резистора шириной 75 мкм с точностью 1 %?
4. Технология изготовления комбинированного трафарета.

### 4.3. Контрольная работа № 3

#### Вариант 1

1. Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок нитрида тантала и конденсаторов с диэлектриком - окись тантала.
2. Требования по шероховатости к подложкам тонкопленочных ИМС.

#### Вариант 2

1. Выбрать материалы для тонкопленочных резисторов с сопротивлением 0,5 кОм. Рассчитать геометрию резисторов и погрешность изготовления.
2. Требования по ТКЛР к подложкам тонкопленочных ИМС.

#### Вариант 3

1. Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок гермета ( $\text{SiO} - 50\%$ ,  $\text{Cr} - 50\%$ ) и конденсаторов  $\text{Al} - \text{SiO} - \text{Al}$ .
2. Требования к термической стойкости подложных материалов для тонкопленочных схем.

#### Вариант 4

1. Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из индуктивности и конденсаторов  $\text{Al} - \text{SiO} - \text{Al}$ . Требуемые материалы выбрать самостоятельно.

2. Требования по теплопроводности к подложкам для тонкопленочных ИМС.

#### Вариант 5

1. Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из резисторов на основе вольфрама и конденсаторов  $\text{Al} - \text{ZrO}_2 - \text{Al}$ .
2. Как обеспечить адгезию пленок к подложкам?

#### Вариант 6

1. Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок кермета (50 %  $\text{SiO}$  + 50 %  $\text{Cr}$ ) и конденсаторов  $\text{Al} - \text{SiO} - \text{Al}$ .
2. Выбор материалов для контактных площадок.

#### Вариант 7

1. Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок рения и конденсаторов  $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}$ .
2. Требования к материалам диэлектрика для получения тонкопленочных конденсаторов с большой  $C_{\text{уд}}$ .

#### Вариант 8

1. Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок  $\text{TaN}$  и конденсаторов  $\text{Ta} - \text{Ta}_2\text{O}_5 - \text{Au}$ .
2. Как выбрать минимальную толщину диэлектрика для тонкопленочного конденсатора?

#### Вариант 9

1. Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из индуктивностей и резисторов на основе пленок хрома.
2. Как рассчитать погрешность резисторов, рисунок которых получен контактной маской?

## Вариант 10

1. Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок нихрома и конденсаторов Al – SiO – Al.
2. Как выбрать минимальную толщину диэлектрика для тонкопленочного конденсатора?

## Вариант 11

1. Выбрать материалы для тонкопленочных резисторов с сопротивлением 50 кОм. Рассчитать геометрию резисторов и погрешность изготовления.
2. Изложить подход к выбору материалов для обкладок конденсаторов.

## Вариант 12

1. Выбрать материалы и способы изготовления тонкопленочных конденсаторов емкостью 200 пФ. Рассчитать погрешность изготовления геометрии.
2. Выбор материалов для тонкопленочных индуктивностей.

## Вариант 13

1. Сравнить погрешность изготовления резисторов, рисунок которых получен методом контактных и свободных масок.
2. Как влияет материал обкладок ТПК на параметры тонкопленочных ИМС?

## Вариант 14

1. Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из индуктивностей и резисторов на основе сплава РС-3710.
2. Как выбрать материал диэлектрической пленки и ее толщину для получения тонкопленочных конденсаторов с большой  $C_{уд}$ .

## Вариант 15

1. Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок кермета и конденсаторов  $Al - TiO_2 - Al$ .
2. Требования по шероховатости к подложкам для толстопленочных ИМС.

#### Вариант 16

1. Разработать техпроцесс изготовления ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок тантала и конденсаторов  $Ta - Ta_2O_5 - Ta$ .
2. Выбор материалов адгезионных слоев.

### 5. КОЛЛОКВИУМ

Приведенные ниже варианты заданий предназначены для проведения коллоквиума и экзамена.

#### Вариант 1

1. Погрешности геометрии тонкопленочного резистора, рисунок которого получен с помощью контактной маски.
2. Что определяет давление насыщенных паров металлов при термическом испарении в вакууме?
3. Модель ионного распыления. Какая минимальная энергия необходима для распыления?
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок  $Ta$ , контактов  $Au$ , конденсаторов  $Ta - Ta_2O_5 - Au$ .

#### Вариант 2

1. Выбор материалов для тонкопленочных проводников и контактных площадок.
2. Чем определяется количество вещества, испаренного  $d\varpi$  в угол для точечного испарителя?



3. Зависимость коэффициента распыления от энергии для легких и тяжелых ионов.
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок Ta, индуктивностей на основе пленок Cu и контактов Cu – Ni.

#### Вариант 3

1. Удельное поверхностное сопротивление тонкопленочных резисторов.
2. Как зависит скорость конденсации при термическом испарении от расстояния испаритель – подложка?
3. Получение пленок из тугоплавких металлов ионно-плазменным распылением. Скорость распыления.
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок сплава РС-3710, индуктивностей на основе пленок Cu и контактов Al.

#### Вариант 4

1. Материалы для тонкопленочных резисторов.
2. Чему равно давление насыщенных паров при испарении двухкомпонентных сплавов?
3. Модель ионного распыления. Какой атом из каскада смещенных способен стать распыленным?
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок вольфрама, индуктивностей на основе пленок Al и контактов Al.

#### Вариант 5

1. Параметры тонкопленочных конденсаторов.
2. Как изменится время напыления с увеличением температуры испарения?
3. Модель ионного распыления. Коэффициент распыления с увеличением температуры мишени увеличивается, уменьшается или не изменяется?

4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок Cr, контактов Al, конденсаторов Al – SiO – Al.

#### Вариант 6

1. Выбор материала диэлектрика для тонкопленочных конденсаторов. Выбор толщина диэлектрика.
2. Рассчитать распределение толщины пленки на стандартной подложке (60x48 мм). Испаритель – поверхностный,  $h = 10$  см.
3. Скорость осаждения пленок при ионно-плазменном распылении. Параметры, с помощью которых можно управлять временем напыления пленок.
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок Re, контактов Al, конденсаторов Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Al.

#### Вариант 7

1. Технология изготовления трафаретов. Погрешности.
2. В каком случае рекомендуется метод «взрывного» испарения и почему?
3. Сравнить термическое испарение с ионно-плазменным распылением на примере получения пленок тантала.
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок Cr+SiO, конденсаторов с диэлектриком SiO.

#### Вариант 8

1. Тонкопленочные резисторы. Выбрать материал и способ изготовления резистора с сопротивлением 1 МОм и коэффициентом формы  $K_{\phi} = 10$ .
2. Чем определяется количество вещества, испаренного в угол  $d\varpi$  для поверхностного испарителя?

3. Модель ионного распыления. Энергия распыленных атомов по сравнению с энергией испаренных атомов больше, равна или меньше?
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок Ta и конденсаторов Ta – Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Al.

#### Вариант 9

1. Тонкопленочные индуктивности. Материалы и способы получения.
2. Объяснить зависимость скорости испарения от температуры испарения.
3. Модель ионного распыления. Типы столкновений.
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок Ta, индуктивностей на основе пленок меди.

#### Вариант 10

1. Тонкопленочные конденсаторы (ТПК) Al – SiO – Al емкостью 60 пФ. Рассчитать удельную емкость и площадь ТПК.
2. Особенности испарения соединений CdS.
3. Что такое коэффициент распыления и его зависимость от угла падения ионов?
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок сплава РС-3710, индуктивностей на основе пленок Cu и контактов Cr – Cu – Ni.

#### Вариант 11

1. Тонкопленочные конденсаторы. Выбор материала обкладок. Как зависит удельная емкость от материала обкладок?
2. Для каких целей рекомендуется метод термического испарения с помощью электронных испарителей.

3. Модель ионного распыления. В каком случае максимально передаваемая энергия от иона атомам мишени будет больше: для легких или тяжелых ионов?
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок W, индуктивностей на основе пленок Cu и контактов из Al.

#### Вариант 12

1. Погрешности геометрии тонкопленочного резистора шириной 100 мкм, рисунок которого получен с помощью контактной маски.
2. Что нужно сделать, чтобы уменьшить время напыления пленки при термическом испарении?
3. Выбрать энергию для эффективного распыления мишени.
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок сплава МЛТ и конденсаторов Al – SiO – Al.

#### Вариант 13

1. Тонкопленочные конденсаторы (ТПК) Ta – Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Au емкостью 200 пФ. Рассчитать удельную емкость и площадь ТПК.
2. Почему при термическом испарении трудно получать пленки сложных соединений стехиометрического состава?
3. Представить механизм распыления. Определить тип столкновений при бомбардировке ионами с энергией 10 и 100 кэВ, если E<sub>A</sub> = 34,7 кэВ и E<sub>B</sub> = 49098 кэВ.
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок кермета и конденсаторов с диэлектриком SiO.

## Вариант 14

1. Выбрать минимальную толщину диэлектрика для конденсаторов Al – SiO – Al, Al – Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Al, Al – TiO<sub>2</sub> – Al на рабочее напряжение 20 В.
2. Как надо выбрать температуру испарителя при «взрывном» методе испарения?
3. Модель распыления. Коэффициент распыления с увеличением температуры мишени увеличивается, уменьшается или не изменяется?
4. Разработать технологический процесс изготовления тонкопленочной ИМС, состоящей из резисторов на основе пленок нихрома и конденсаторов Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Al.

## Вариант 15

1. Обосновать выбор материала контактов, если в состав ИМС входят индуктивности.
2. Напылить пленку с разбросом толщины по подложке (60x48 мм) не более 5 %. Испаритель точечный. Определить необходимое расстояние  $h$ .
3. Импульсная теория распыления. Возможно ли распыление вещества электронами средних энергий.
4. Когда можно получить контакты к полоске резистора методом обратной ФР-маски:
  - a) ФР – позитив, ФШ – негатив;
  - b) ФР – позитив, ФШ – позитив;
  - c) ФР – негатив, ФШ – негатив.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ по разделу «ТЕРМИЧЕСКОЕ ИСПАРЕНИЕ В ВАКУУМЕ»

## Вариант 1

1. Рассмотреть способность веществ к испарению.
2. Рассчитать скорость испарения серебра при различных температурах, включая условную температуру испарения.

3. Выбрать требуемую температуру испарения, чтобы время напыления пленки серебра толщиной 0,5 мкм не превышало 50 сек.  $h = 7$  см;  $S_{\text{и}} = 0,5$  см<sup>2</sup>.

#### Вариант 2

1. Термическое испарение тугоплавких металлов.
2. Рассчитать скорость испарения вольфрама при условной температуре испарения.
3. Определить необходимое расстояние от испарителя до подложки с разбросом толщины пленки по подложке 60x48 мм<sup>2</sup> не более 10 %. Испаритель точечный.  $S_{\text{и}} = 1$  см<sup>2</sup>.

#### Вариант 3

1. Термическое испарение окислов. Особенности испарения SiO.
2. Рассчитать скорость испарения монооксида кремния (SiO) при условной температуре 1298 К и 1523 К. Что даст испарение с добавкой O<sub>2</sub>.
3. Определить время напыления пленки SiO толщиной 0,5 мкм:  $h = 10$  см;  $S_{\text{и}} = 1$  см<sup>2</sup>;  $\gamma = 2,15$  г/см<sup>3</sup>.

#### Вариант 4

1. Термическое испарение сплавов.
2. Изобразить графически закон Рауля при испарении сплава нихрома при температуре 1573 К.
3. Рассчитать состав пленок нихрома при испарении стандартного сплава нихрома 80 % Ni и 20 % Cr при температуре 1573 К.

#### Вариант 5

1. Термическое испарение керметов, состоящих из двух компонентов: SiO и Cr.
2. Представить схему испарения кермета из отдельных испарителей для SiO и Cr. Испарители расположены симметрично относительно центра подложки на расстоянии 1 см от него:  $h = 10$  см.

3. Рассчитать распределение конденсата по подложке от каждого испарителя и оценить размер подложки, где состав пленки кермета будет 50 % SiO и 50 % Cr.

#### Вариант 6

1. Термическое испарение алюминия.
2. Рассчитать скорость испарения алюминия при разных температурах, включая условную температуру испарения.
3. Определить требуемую температуру испарения, чтобы время напыления пленки алюминия толщиной 0,5 мкм не превышало 60 сек.  $h = 10$  см,  $S_{\text{и}} = 0,5$  см<sup>2</sup>.

#### Вариант 7

1. Проблемы получения сверхчистых пленок при термическом испарении.
2. Рассчитать требуемый поток испаренных частиц, достигающих подложки, при напылении пленок кремния со степенью загрязнения 0,001 при давлении остаточных газов в рабочем объеме  $10^{-3}$  Па.
3. Определить рабочую температуру испарения кремния, необходимую для получения заданных пленок кремния  $h = 7$  см,  $S_{\text{и}} = 1,5$  см<sup>2</sup>.

#### Вариант 8

1. Термическое испарение меди при температурах 1546, 1690, 1890 К.
2. Рассчитать скорость конденсации пленки меди толщиной 2 мкм, чтобы время напыления не превышало 5 мин.
3. Рассчитать требуемую скорость испарения при различных  $h$  и двух значениях  $S_{\text{и}} = 1$  см<sup>2</sup> и 3 см<sup>2</sup>. Рекомендовать  $h$  и  $S_{\text{и}}$ .

#### Вариант 9

1. Термическое испарение золота.

2. Рассчитать требуемое давление остаточных газов для обеспечения молекулярного потока испаряемых атомов золота.  $h = 15$  см. Для воздуха  $\sigma = 3,7 \cdot 10^{-10}$  м;  $T = 300$  К.
3. Рассчитать скорость конденсации золота при  $T = 1748$  К. Испаритель поверхностный.  $S_{и} = 1$  см<sup>2</sup>. При каком давлении газа скорость конденсации золота уменьшится?

#### Вариант 10

1. Термическое испарение сплавов.
2. Рассчитать скорость испарения сплава нихрома (80 % Ni, 20 % Cr) при температуре 1723 К.
3. Рассчитать отношение компонентов сплава в потоке пара. Как изменится коэффициент испарения при температурах 1273, 1573 и 1723 К. Какую температуру следует рекомендовать для непосредственного (согласованного) испарения сплава нихрома?

#### Вариант 11

1. Термическое испарение окислов металлов.
2. Рассчитать скорость конденсации окисла  $Al_2O_3$  при испарении при условной температуре 2073 К:  $h = 10$  см, испаритель – поверхностный,  $S_{и} = 2$  см<sup>2</sup>.  $\gamma = 3,96$  г/см<sup>3</sup>.
3. Что даст испарение с добавкой кислорода (реактивное испарение). Рассчитать парциальное давление кислорода для обеспечения потока кислорода на подложку в 2 – 5 раз большего, чем поток испаряемых молекул, достигающих подложки.

#### Вариант 12

1. Скорость конденсации пленок на подложке для различных испарителей.
2. Рассчитать скорость конденсации пленок хрома при температуре 1670 К. испаритель поверхностный -  $S_{и} = 2$  см<sup>2</sup>, при различных  $h$ .
3. Можно ли получить резистивную пленку хрома с разбросом толщины пленки по подложке 3 % при



испарении из поверхностного и точечного испарителей при расстоянии  $h$  не более 20 см?

#### Вариант 13

1. Влияние давления остаточных газов на процесс термического испарения в вакууме.
2. Рассчитать скорость конденсации титана при следующих условиях:  $T = 1819$  К;  $h = 10$  см, поверхностный испаритель -  $S_{\text{и}} = 1,5$  см<sup>2</sup>.
3. Определить степень загрязнения пленок титана при давлении остаточных газов, соответствующих обеспечению молекулярного потока испаряемых атомов. Для воздуха  $\sigma = 3,7 \cdot 10^{-10}$  м;  $T = 300$  К.

#### Вариант 14

1. Термическое испарение сложных соединений (арсенида галлия).
2. Рассмотреть испарение арсенида галлия из отдельных испарителей. Рассчитать скорость испарения галлия при температуре 1280 К,  $p_s = 0,13$  Па и мышьяка при температуре 550 К,  $p_s = 1,33$  Па.
3. Рассчитать состав пленки на подложке. Дать конкретные рекомендации по получению пленок арсенида галлия стехиометрического состава.

#### Вариант 15

1. Термическое испарение молибдена.
2. Рассчитать скорость испарения молибдена при условной температуре.
3. можно ли получить пленку молибдена с разбросом толщины не более 3 % при испарении из точечного и поверхностного испарителей при расстоянии  $h$  не более 30 см? При выбранной геометрии определить время напыления пленки молибдена толщиной 0,3 мкм.

#### Вариант 16

1. Термическое испарение сплава нихрома (80 % Ni, 20 % Cr).

2. Рассчитать соотношение компонентов хрома и никеля в потоке испаряемого вещества при разных температурах 1573, 1723, 2273 К.
3. Определить содержание компонентов сплава в пленке в зависимости от температуры. Чему должно быть равно  $k$ , чтобы состав пленки соответствовал бы составу испаряемого вещества?

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ по разделу «ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ»

### Вариант 1

Объяснить механизм получения пленок двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) методом реактивного катодного распыления. Рассчитать время напыления пленок при следующих условиях:  $S = 2$ ,  $j = 5 \text{ А/м}^2$ .  $N_0 = 5 \cdot 10^{28} \text{ ат/м}^3$ .

### Вариант 2

Рассмотреть влияние угла падения ионов аргона на мишень из меди. Рассчитать зависимость коэффициента распыления от  $\varphi$ , если  $S_0 = 9$ .

### Вариант 3

Рассмотреть распыление мишени из вольфрама ионами аргона и гелия с одинаковой энергией. 10 кэВ. Сравнить коэффициенты распыления и сделать выводы.

### Вариант 4

Рассчитать скорость распыления мишени из алюминия ионами аргона, если  $S = 1,75$ ,  $j = 10 \text{ А/м}^2$ .  $N_0 = 6 \cdot 10^{28} \text{ ат/м}^3$ .

Исследовать зависимость скорости осаждения пленок алюминия на кремниевой пластине диаметром 76 мм при различных размерах мишени и расстоянии  $h$ .

## Вариант 5

Объяснить зависимость коэффициента распыления тантала от энергии ионов аргона и гелия в широком диапазоне энергий.

## Вариант 6

Механизм распыления по импульсной теории. Особенности распыления поликристаллической и монокристаллической мишеней.

## Вариант 7

Объяснить механизм получения пленок нитрида тантала методом реактивного катодного распыления. Рассчитать время напыления пленок при следующих условиях:  $S = 1,5$ ,  $j = 7 \text{ А/м}^2$ .

## Вариант 8

Объяснить влияние массы бомбардирующих ионов на распыление согласно импульсной теории. Возможно ли распыление вещества электронами?

## Вариант 9

Представить зависимость  $S$  от  $E$  в диапазоне от пороговой энергии до 700 эВ для распыления молибдена ионами неона и ксенона, если  $S = 1,3$  для ксенона и  $S = 0,5$  для неона. Объяснить характер зависимости при дальнейшем увеличении энергии.

## Вариант 10

Рассмотреть угловое распределение частиц при испарении, распылении из поликристаллических и монокристаллических мишеней.

## Вариант 11

Оценить среднюю энергию смещенных атомов по теории Пиза при бомбардировке мишени из меди ионами аргона. Сравнить с испарением. Каким образом полученные данные подтверждают импульсную теорию.

## Вариант 12

Объяснить механизм получения пленок стехиометрического состава пленок ZnS путем распыления из мишени. Сравнить с испарением.

## Вариант 13

Модель ионного распыления. Проанализировать зависимость пороговой энергии распыления различных металлов (Al, Ag, Pt, Nb, Ta) от их массы и энергии сублимации при бомбардировке ионами аргона.

## Вариант 14

Зависимость коэффициента распыления от энергии ионов при распылении меди ионами аргона. Как изменится характер зависимости  $S$  от  $E$ , если ее представить в виде зависимости  $S$  от скорости ионов?

## Вариант 15

Рассмотреть типы столкновений при распылении мишени из молибдена ионами Kr. Как изменятся типы столкновений, если распыление производить ионами гелия?

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. - М.: Высшая школа, 1986. -464с.
2. Парфенов О.Д. Технология микросхем. - М.: Высшая школа, 1986. -315с.
3. Радионов Ю.А. Литография в производстве интегральных микросхем. - Минск: Дизайн ПРО, 1998. -95с.
4. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн.: Учеб.пособие для ПТУ. Кн.8. Литографические процессы / В.В.Мартынов, Т.Е.Базарова. - М.: Высшая школа, 1990. -120с.
5. Гимпельсон В.Д., Радионов Ю.А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники. - М.: Машиностроение, 1976. -328с.
6. Данилина Т.И. Перспективные технологии производства СБИС. - Томск: ТМЦ ДО, 2000. -99с.
7. Технология тонких пленок. Справочник под ред. Л.Майссела, Р.Глэнга. - М.: Сов.радио, 1977. Т.1. -662с.
8. Данилина Т.И., Смирнов С.В. Ионно-плазменные технологии в производстве СБИС. - Томск: Томск. ун-т систем управления и радиоэлектроники. 2000. -140с.
9. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Ионное травление микроструктур. - М.; Сов.радио, 1979. -104с.
10. Бушминский И.П., Морозов Г.В. Технология гибридных интегральных схем СВЧ. – М., Высшая школа, 1980. – 285с.
11. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. – Л., Машиностроение. – 1977. – 264с.
12. Кокс Дж.Т., Хасс Г. Просветляющие покрытия для видимой и инфракрасной областей спектра. - Вкн.: Физика тонких пленок, М.: Мир, 1967. Т.2 - с. 186 – 253
13. Мадден Р.П. Изготовление и исследование отражающих покрытий для вакуумного ультрафиолетового излучения. Вкн.: Физика тонких пленок – М.: Мир. – 1967. Т.1 - с. 152 – 223.

14. Моро У. Микролитография: Принципы, методы, материалы: ч. 2 / У. Моро. – М.: Мир, 1990. – ISBN 5-03-001717-8.
15. Плешивцев Н. В. Катодное распыление / Н. В. Плешивцев. – М.: Атомиздат, 1968. – 343 с.
16. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник / З. Ю. Готра. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с. – ISBN 5-03-003432-3.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## Основные физические постоянные

Постоянные	Символ	Значение	Единицы СИ
Элементарный заряд	$e$	1,6	$10^{-19}$ Кл
Число Авогадро	$N_A$	6,02	$10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Масса покоя электрона	$m_e$	9,1	$10^{-31}$ кг
Постоянная Планка	$h$	6,62	$10^{-34}$ Дж·с
Атомная единица массы	$a.е.м.$	1,66	$10^{-27}$ кг
Газовая постоянная	$R$	8,3	Дж·моль <sup>-1</sup> град <sup>-1</sup>
Постоянная Больцмана	$k$	1,38	$10^{-23}$ Дж·град <sup>-1</sup>
Первый радиус Бора	$a_0$	5,29	$10^{-11}$ м
Диэлектрическая проницаемость вакуума	$\epsilon_0$	8,85	$10^{-12}$ Ф·м <sup>-1</sup>

## СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ИЗМЕРЕНИЯ

$$1 \text{ Дж} = 0,24 \text{ кал}; 1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 3,83 \cdot 10^{-20} \text{ кал}$$

$$1 \text{ м} = 10^{10} \text{ \AA} = 10^9 \text{ нм} = 10^6 \text{ мкм} = 10^3 \text{ мм} = 10^2 \text{ см}$$

$$\text{Заряд электрона } e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ СГС} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\text{Газовая постоянная } R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} =$$

$$1,987 \text{ кал} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$$

$$\text{Постоянная Больцмана } k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} = 8,63 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

Периоды	Ряды	Группы элементов											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII				
1	I	1 H 1,008									2 He 4,0		
2	II	3 Li 6,94	4 Be 9,01	5 B 10,81	6 C 12,0	7 N 14,01	8 O 16,0	9 F 19,0	10 Ne 20,18				
3	III	11 Na 23	12 Mg 24,30	13 Al 26,98	14 Si 28,09	15 P 30,97	16 S 32,06	17 Cl 35,45	18 Ar 40,0				
4	IV	19 K 39,10	20 Ca 40,08	21 Sc 44,96	22 Ti 47,90	23 V 50,94	24 Cr 52,0	25 Mn 54,9	26 Fe 55,8	27 Co 58,9	28 Ni 58,7		
	V	29 Cu 63,55	30 Zn 65,38	31 Ga 69,72	32 Ge 72,5	33 As 74,92	34 Se 79,0	35 Br 79,9	36 Kr 83,8				
5	VI	37 Rb 85,5	38 Sr 87,6	39 Y 88,9	40 Zr 91,2	41 Nb 92,9	42 Mo 96,0	43 Tc 98,9	44 Ru 101,0	45 Rh 102,9	46 Pd 106,4		
	VII	47 Ag 107,9	48 Cd 112,4	49 In 114,8	50 Sn 118,8	51 Sb 121,8	52 Te 127,6	53 I 126,9	54 Xe 131,3				
6	VIII	55 Cs 132,9	56 Ba 137,3	La-Lu	72 Hf 178,5	73 Ta 180,9	74 W 183,8	75 Re 186,2	76 Os 190,2	77 Ir 192,2	78 Pt 195,0		
	IX	79 Au 197	80 Hg 200,6	81 Tl 204,3	82 Pb 207,2	83 Bi 209,0	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)				
7	X	87 Fr (223)	88 Ra 226	Ac-(Lr)	104 Ku (261)	105 Ns (261)							



## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Параметры металлов и полупроводников

Материал	Плотность, $\gamma, \cdot 10^3,$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Атом- ная плот- ность $N_0, \cdot 10^{28},$ $\frac{\text{атом}}{\text{м}^3}$	Услов- ная темпера- тура испарен- ия, К	Коэффициенты		Эне-ргия сублимаци и, $E_{\text{суб.}}$ , ЭВ
				A	B	
Ag	10,49	5,85	1320	10,78	14090	2,7
Al	2,7	6,04	1423	11,11	15630	3,26
Cu	8,96	8,52	1546	10,84	16580	3,56
Mo	10,2	6,39	2800	10,92	30310	6,9
Au	19,32	5,90	1738	10,77	18520	3,92
Pt	21,5	6,61	2360	11,75	27500	5,56
Ti	4,52	5,66	1832	11,1	20110	4,34
W	19,3	6,09	3580	11,36	40260	8,76
Ni	8,9	9,03	1780	11,67	20600	4,41
Cr	7,19	7,64	1478	12,0	17560	3,68
Si	2,42	5,04	1615	12,32	19700	3,91
Ta	16,6	5,52	3340	12,12	40210	8,7
Ge	5,32	4,53	1520	10,12	15150	3,77
Cd	8,65		538	10,9	5800	
Fe	7,86	8,48	1720	12,53	21960	4,15
Zn	6,5		616	11,06	6740	
Be		12,3				3,48
Mg	1,74	4,31				1,59
Si	2,42	5,04				3,91
V	6,11	6,63				3,7
Mn	1,76	8,01				3,15
Nb	8,57	5,45				7,5