

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

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга
(РЭТЭМ)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий каф. РЭТЭМ
_____ В.И. Туев
« ____ » _____ 2017 г.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Учебно-методическое пособие для проведения практических занятий и
самостоятельной работы для бакалавров, обучающихся по направлению
подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»

Разработчики:
Ст. преподаватель каф. РЭТЭМ
_____ А.А. Иванов

Ассистент каф. РЭТЭМ
_____ Ю.В. Ряполова

Иванов А.А., Ряполова Ю.В. Физико-химические основы технологии электронных средств: учебно-методическое пособие для проведения практических занятий и самостоятельной работы бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2017. – 46 с.

В пособии рассмотрены типовые задачи по темам «Индексы граней кристаллов» и «Поверхностные процессы и явления», а также приведены варианты двух контрольных работ по всем основным разделам лекционного курса. Особое внимание уделяется методическим указаниям по выполнению тематических рефератов по всем основным темам курса.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1 ИНДЕКСЫ ГРАНЕЙ КРИСТАЛЛОВ	5
2 ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ	8
2.1 Поверхностное натяжение	8
2.2 Смачивание, адгезия	8
2.3 Адсорбция	9
3 ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ	13
3.1 Фоторезисты	13
3.2 Методы изготовления одно- и двусторонних печатных плат	14
3.3 Пайка монтажных соединений	14
Практическая работа №1	16
Практическая работа №2	18
Практическая работа №3	19
Практическая работа №4	21
Практическая работа №5	22
Практическая работа №6	23
4 Методические указания по выполнению тематических рефератов	26
4.1 Термовакuumный метод получения тонких пленок	28
4.2 Нанесение тонких пленок методом ионного распыления	30
4.3 Методы получения защитных диэлектрических пленок	32
4.4 Химические и электрохимические методы осаждения металлических пленок	34
4.5 Физико-химические основы процессов обработки поверхностей полупроводниковых пластин	35
4.6 Методы создания полупроводниковых структур с заданными свойствами	37
4.7 Литографические процессы	40
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	43

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебно-методическое пособие является приложением и дополнением к учебному пособию «Физико-химические основы технологии электронных средств», в котором изложен теоретический материал по основным темам лекционного курса.

В данном пособии дается краткое изложение теоретического материала и приводятся типовые задачи с подробным их решением по двум темам: «Индексы граней кристалла» и «Поверхностные процессы и явления». Затем помещены варианты двух контрольных работ.

В первую контрольную работу включены вопросы первых шести тем, связанных с рассмотрением механизма, принципов и основ физико-химических процессов, направленных на изменение свойств полупроводниковых материалов и их подготовку к формированию необходимых структур элементов полупроводниковых интегральных микросхем (особенности полупроводниковых материалов, поверхностные процессы и явления, основы и принципы легирования полупроводников, методы очистки поверхностей, ионно-плазменное и плазмохимическое травление, основы зарождения и роста пленок).

Во вторую контрольную работу включены вопросы остальных шести тем, связанных с изучением различных методов формирования тонких пленок и необходимых топологических структур (химические, электрохимические, термовакуумные, ионно-плазменные и плазмохимические методы формирования диэлектрических и металлических пленок, основы фото-, электроно-, рентгено- и ионолитографии).

Ответы на вопросы контрольных работ можно найти в учебном пособии. Для более полных ответов на эти вопросы можно воспользоваться рекомендованной литературой, список которой приведен в конце пособия [67].

Во вторую контрольную работу включены также тематические рефераты. Выполнение рефератов предполагает не только углубление теоретических знаний по какому-либо отдельному разделу курса, но также развитие навыков самостоятельной работы с книгами и творческого решения реальных инженерных задач. По каждой теме реферата предлагаются конкретное задание и перечень необходимой литературы.

1 ИНДЕКСЫ ГРАНЕЙ КРИСТАЛЛОВ

В микроэлектронике используются полупроводниковые материалы, главным образом в виде *монокристаллов*, в которых атомы пространственно упорядочены и образуют трехмерную периодическую структуру, называемую *кристаллической решеткой*.

Важнейшим параметром кристаллической решетки является *постоянная* решетки (a), представляющая собой расстояние между двумя соседними атомами вдоль одного из направлений решетки. Полупроводниковые кристаллы обладают *анизотропией*, т.е. неодинаковыми механическими и электрофизическими свойствами в различных кристаллографических направлениях.

Для определения положения кристаллографических плоскостей и направлений пользуются индексами граней или *индексами Миллера*.

Рассмотрим несколько типовых примеров определения индексов Миллера для заданных кристаллографических плоскостей.

Пример 1.

Определить индексы Миллера для кристаллографической плоскости, показанной на рис. 1.1

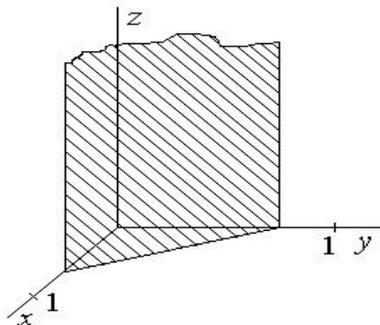


Рис. 1.1 — Кристаллографическая плоскость

Решение.

Данная плоскость параллельна оси z и пересекает координатные оси x и y в точках $1/2$ и $2/3$ соответственно. Таким образом, координаты плоскости (индексы Вайсса) имеют значение соответственно $1/2, 2/3, \infty$. Чтобы определить индексы Миллера, определяем величины, обратные индексам Вайсса. В данном случае получим $2/1, 3/2, 0$. Чтобы исключить дроби, умножим величины на 2 и получим $4, 3, 0$. Таким образом, индексы Миллера данной плоскости будут (430) .

Пример 2.

Изобразить в кубической решетке кристаллографические плоскости и направления, имеющие индексы Миллера (102) и (201) .

Решение.

Определим индексы Вейсса (координаты плоскостей) как величины, обратные заданным индексам Миллера: $1, \infty, 1/2$ и $1/2, \infty, 1$. По данным точкам построим соответствующие плоскости в кубической элементарной ячейке (рис. 1.2).

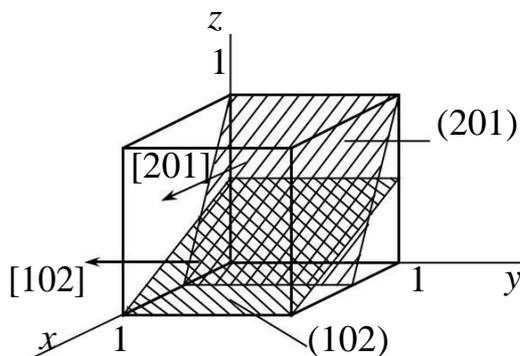


Рис. 1.2 — Кристаллографические плоскости (102) и (201) в кубической элементарной ячейке

Кристаллографические направления представляют собой перпендикуляры к данным плоскостям, имеют такие же индексы Миллера, что и плоскости, но заключены в квадратные скобки.

Пример 3.

Определить индексы Миллера плоскости, показанной на рис. 1.3.

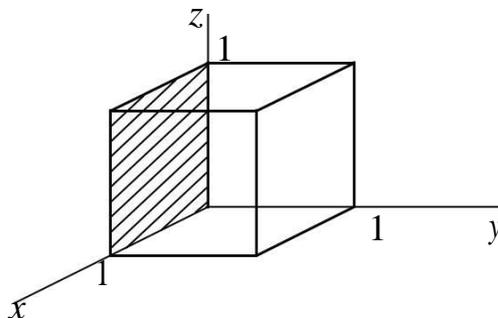


Рис. 1.3 — Кристаллическая грань

Решение.

Грань кубической элементарной ячейки, противоположная и параллельная указанной, пересекает ось y в точке 1 и параллельна осям x и z . Поэтому индексы Вейсса этой грани будут $\infty, 1, \infty$. Индексы Миллера этой грани будут обратны индексам Вейсса, т.е. (010). Поскольку все параллельные плоскости имеют одинаковые индексы Миллера, то обозначенная на рис. 1.3 грань будет иметь те же индексы Миллера (010).

Пример 4.

Какие индексы Миллера имеет кристаллическая грань, показанная на рис. 1.4?

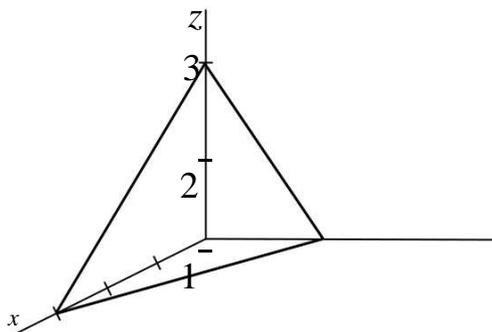


Рис. 1.4 — Кристаллическая грань

Решение.

Индексы Вейсса данной грани будут 3, 2, 3. Чтобы определить индексы Миллера, определим величины, обратные индексам Вейсса: $1/3$, $1/2$, $1/3$. Приведем их к общему знаменателю $2/6$, $3/6$, $2/6$. Числители этих дробей определяют индексы Миллера (2, 3, 2).

2 ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

2.1 Поверхностное натяжение

Состояния поверхностных атомов отличаются от состояния атомов, расположенных во внутренних слоях вещества. Их взаимодействия не уравновешены, связи не насыщены, и запас их свободной энергии больше, чем у атомов внутри объема. Таким образом, на поверхности твердого тела возникает избыток свободной энергии. Часть этой энергии, затрачиваемой на создание поверхности, является удельной поверхностной энергией Гиббса и называется *поверхностным натяжением* (σ_s).

Поверхностное натяжение зависит от таких параметров состояния, как температура, давление, концентрация, от технологических факторов (чистота, шероховатость поверхности и т.п.).

2.2 Смачивание, адгезия

При взаимодействии поверхностей твердой и жидкой фаз наблюдается явление, называемое *смачиванием*.

Степень смачивания определяет форму капли жидкости на твердой поверхности. Мерой смачивания служит контактный угол φ между смачиваемой поверхностью и поверхностью жидкости [67].

При этом условии равновесия соприкасающихся фаз описывается уравнением:

$$\sigma_{\text{ТВ-П}} = \sigma_{\text{ТВ-Ж}} + \sigma_{\text{Ж-П}} \cdot \cos \varphi,$$

где $\sigma_{\text{ТВ-П}}$, $\sigma_{\text{ТВ-Ж}}$, $\sigma_{\text{Ж-П}}$ — поверхностные натяжения на границе фаз, соответственно твердое тело — пар, твердое тело — жидкость, жидкость — пар. Отсюда

$$\cos \varphi = \frac{\sigma_{\text{ТВ-П}} + \sigma_{\text{ТВ-Ж}}}{\sigma_{\text{Ж-П}}}$$

Чем меньше φ , тем лучше жидкость смачивает поверхность твердого тела.

В узком цилиндрическом капилляре (или плоской щели) радиусом (размером) r_k уровень смачивающей жидкости выше, чем в сообщающемся с ним широком сосуде на высоту капиллярного подъема жидкости:

$$h = \frac{2\sigma * \cos\varphi}{r_k * \rho * g}$$

где ρ — плотность жидкости;
 g — ускорение сил тяжести.

Если соприкасаются две поверхности твердого тела, то вводится аналогичное смачиванию понятие *адгезии* как явления и меры взаимодействия двух (и более) поверхностей твердых тел. Адгезия измеряется силой отрыва одной поверхности от другой.

2.3 Адсорбция

Взаимодействие поверхности твердого тела с газовой фазой или разбавленными растворами вызывает концентрирование веществ (компонентов) на поверхности и в приповерхностном слое, т.е. концентрация газа или компонента раствора на поверхности твердого тела возрастает. Такое явление называется *адсорбцией*.

Зависимость между величиной адсорбции и давлением газа при постоянной температуре выражается уравнением *изотермы адсорбции Лэнгмюра*.

$$C_{\text{адс}} = \frac{K \cdot p}{1 + K \cdot p},$$

где $C_{\text{адс}}$ — количество газа, адсорбированного 1 г адсорбента или 1 см² его поверхности;

K — постоянная, зависящая от природы адсорбента и адсорбируемого вещества;

p — давление газа.

С увеличением температуры адсорбирующая способность поверхности снижается.

Часто для практических расчетов зависимость количества вещества, адсорбированного 1 г адсорбента, от равновесной концентрации при постоянной температуре выражается *уравнением Фрейндлиха*:

$$C_{\text{адс}} = \frac{x}{m} a C^{\frac{1}{n}}$$

где x — количество адсорбированного вещества, г; m — количество адсорбента, г;

C — концентрация раствора при достижении равновесия; a и n — постоянные величины, определяемые опытным путем. Рассмотрим несколько типичных примеров по оценке проявления поверхностных процессов и явлений.

Пример 1.

Стеариновая кислота массой 0,106 мг покрывает поверхность воды площадью 500 см². Зная молекулярный вес (284) и плотность (0,85 г/см³) стеариновой кислоты, вычислить площадь поперечного сечения одной молекулы a и толщину пленки d .

Решение.

Определим общее число молекул, находящихся в 0,106 мг стеариновой кислоты (N). Для этого составим пропорцию:

$$\begin{array}{l} 1 \text{ моль (284 г)} \text{ — } N_A \text{ (6,02} \cdot 10^{23} \text{ молекул) } m \\ (0,106 \cdot 10^{-3} \text{ г)} \text{ — } x \text{ (молекул)} \end{array}$$

$$x = \frac{m \cdot N_A}{M} = \frac{0,106 \cdot 10^{-3} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{284} = 2,24 \cdot 10^{17}$$

Общая площадь, занимаемая пленкой, равна площади поперечного сечения одной молекулы, умноженной на количество молекул.

$$S = 500 = a x.$$

$$\text{Отсюда } a = \frac{500}{x} = \frac{500 \text{ см}^2}{2,24 \cdot 10^{17}} = 22,3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2 \text{ (или } 22 \text{ \AA}^2)$$

Объем, занимаемый пленкой:

$$V = S \cdot d = \frac{m}{\rho},$$

где S — общая площадь пленки; d — толщина пленки;
 m — масса кислоты;
 ρ — плотность кислоты.

$$\text{Отсюда } d = \frac{m}{\rho \cdot S} = \frac{0,106 \cdot 10^{-3}}{0,85 \cdot 500} = 25 \cdot 10^{-8} \text{ см (или } 25 \text{ \AA)}.$$

Ответ: Площадь поперечного сечения одной молекулы 22 \AA^2 , толщина пленки 25 \AA .

Пример 2.

Ацетон с плотностью $0,79 \text{ г/см}^3$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ поднимается на высоту $2,56 \text{ см}$ в капилляре с радиусом $0,0235 \text{ см}$. Чему равно поверхностное натяжение при этой температуре?

Решение.

Схема процесса представлена на рис. 7.4 б (учебное пособие). В установившемся состоянии вес столба ацетона в капилляре F_1 равен силе поверхностного натяжения F_2 .

$$F_1 = \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \rho \cdot g; F_2 = \pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos \varphi,$$

где h — высота подъема жидкости в капилляре; ρ — плотность ацетона;
 g — ускорение силы тяжести (981 см/с^2); σ — поверхностное натяжение;
 r — радиус капилляра;
 φ — контактный угол.

Принимаем $\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$. Приравнявая $F_1 = F_2$, находим σ .

$$\sigma = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \rho \cdot g}{2 \pi r} = \frac{r \cdot h \cdot \rho \cdot g}{2}.$$

$$\sigma = \frac{2,35 \cdot 10^{-2} \text{ см} \cdot 2,56 \text{ см} \cdot 0,79 \text{ г/см}^3 \cdot 981 \text{ см/с}^2}{2} = 2,33 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}.$$

Поверхностное натяжение ацетона равно $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$.

Пример 3.

Вычислить площадь поверхности катализатора, если для образования монослоя на нем должно адсорбироваться $103 \text{ см}^3/\text{г}$ азота (объем приведен к 700 мм рт. ст. и 0°C). Адсорбция измеряется при 155°C . Эффективная площадь, занимаемая молекулой азота на поверхности при этой температуре, равна $16,2 \text{ \AA}^2$.

Решение.

Определим число молекул азота, находящихся в объеме 103 см^3 при нормальных условиях. Для этого составим пропорцию:

1 моль ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ молекул) — $22,4 \text{ л}$ ($22,4 \cdot 10^3 \text{ см}^3$) x
молекул — 103 см^3

$$x = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 103}{22,4 \cdot 10^3} = 2,76 \cdot 10^{21} \text{ молекул.}$$

Общая площадь, занимаемая молекулами азота, составит:

$$S = x \cdot a,$$

где a — площадь, занимаемая одной молекулой азота.

$$S = 2,76 \cdot 10^{21} \cdot 16,2 = 4,48 \cdot 10^{22} \text{ \AA}^2 = 4,48 \cdot 10^2 \text{ м}^2.$$

Пример 4.

Вычисление теплоты адсорбции.

Теплотой адсорбции называют количество теплоты, выделяемое при поглощении 1 моль вещества поверхностью адсорбента. При поглощении мелкоизмельченным железом (опилками) $42,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ аммиака выделяется $177,8 \text{ кДж}$ теплоты.

Рассчитать теплоту адсорбции аммиака на железных опилках.

Решение.

Молярная масса аммиака NH_3 составляет 17 г/моль . Составим пропорцию:

при поглощении $42,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг NH}_3$ — $177,8 \text{ кДж}$ при
поглощении $17 \cdot 10^{-3} \text{ кг NH}_3$ — $x \text{ кДж}$

$$x = \frac{17 \cdot 10^{-3} \cdot 177,8}{42,5 \cdot 10^{-3}} = 71,1 \text{ кДж.}$$

Теплота адсорбции NH_3 на железных опилках равна $71,1 \text{ кДж/моль}$.

Пример 5.

Площадь поверхности 1 см^3 активированного угля равна 1600 м^2 . Какой объем аммиака могут адсорбировать $25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ активированного угля, если принять, что вся поверхность полностью покрыта мономолекулярным слоем аммиака. Условно можно считать, что

поперечное сечение молекулы NH_3 представляет собой квадрат с длиной стороны $2 \cdot 10^{-10}$ м и что при полном заполнении поверхности соседние молекулы касаются друг друга.

Решение.

Определим общее число молекул аммиака, способных поместиться на развитой поверхности 1 см^3 активированного угля S :

$$N_1 = \frac{S}{S_{\mu}},$$

где S_{μ} — площадь, занимаемая одной молекулой.

$$S_{\mu} = a^2 = (2 \cdot 10^{-10})^2 = 4 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2;$$

$$N_1 = \frac{1600}{4 \cdot 10^{-20}} = 4 \cdot 10^{22} \text{ (молекул)}.$$

Соответственно 25 см^3 ($25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$) активизированного угля смогут адсорбировать $N_2 = 25 \cdot 4 \cdot 10^{22} = 10^{24}$ (молекул).

Составим пропорцию:

Если при нормальных условиях 1 моль аммиака, включающий $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ молекул, занимает объем $22,4 \text{ л}$, то 10^{24} молекул займут объем $x \text{ л}$.

Таким образом, $6,02 \cdot 10^{23} — 22,4$

$10^{24} — x$

$$\text{Отсюда } x = \frac{22,4 \cdot 10^{24}}{6,02 \cdot 10^{23}} = 37,2 \text{ л}.$$

Может быть адсорбировано $37,2 \text{ л}$ аммиака.

3 ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Под печатной платой (ПП) понимают соединение из изоляционного основания и сконструированных металлических слоев, которые служат для электромонтажа элементов и узлов, а также в большинстве случаев и для их механического крепления. Система электрических соединений в виде участков металлического покрытия, используемая вместо объемных проводников, называется печатным монтажом.

В зависимости от числа нанесенных печатных проводящих слоев ПП разделяются на одно-, двусторонние и многослойные.

В качестве исходного материала для оснований печатных плат используют листовой одно- или двусторонний фольгированный стеклотекстолит или гетинакс, серийно выпускаемый электротехнической промышленностью. Фольгирование осуществляется созданием механически прочной связи поверхности медной или алюминиевой фольги с поверхностью листового диэлектрика с помощью склеивания полимеризующих веществ (клеев) под действием нагрева и давления (для бумаги — фенольная смола, для стеклоткани — эпоксидная).

Электрическая характеристика фольгированных оснований зависит от трех факторов: изоляционного основания, фольги и клея, которым фольга приклеена к основанию.

Требования к диэлектрику:

- 1) минимальная диэлектрическая проницаемость, чтобы не создавать значительных паразитных емкостей между печатными проводниками;
- 2) малые диэлектрические потери на высокой частоте, т. е. малый тангенс диэлектрических потерь в рабочем диапазоне частот;
- 3) необходимая диэлектрическая прочность;
- 4) большое удельное поверхностное и объемное сопротивление изоляции;
- 5) стабильные диэлектрические параметры в интервале рабочих температур;
- 6) хорошие механические свойства (сопротивляемость изгибу, ударная вязкость) и обрабатываемость сверлением, штамповкой и фрезерованием [67].

3.1 Фоторезисты

Фоторезистами называют светочувствительные составы, применяемые при производстве ПП всех видов, для получения рисунка ПП. Фоторезисты устойчивы к действию агрессивных химических факторов, и поэтому их применение не связано со специальными защитными мерами. Подразделяют фоторезисты на жидкие и сухие пленочные. Жидкие фоторезисты подразделяют на негативные и позитивные.

Негативные фоторезисты под действием излучения, вызывающего активацию фоторезиста, образуют защитные непрозрачные участки

поверхности, соответствующие по рельефу печатному монтажу. Под действием излучения такой фоторезист фотополимеризуется, и освещенные участки после проявления остаются на поверхности основания.

Позитивные фоторезисты под действием облучения образуют участки, которые, будучи экспонированными на поверхности ПП, разрушаются после обработки их соответствующими растворами.

3.2 Методы изготовления одно- и двусторонних печатных плат

Традиционно для изготовления одно- и двусторонних печатных плат (ПП) используют два вида технологии получения проводящего рисунка слоев ПП: на основе субтрактивных методов — негативного и позитивного; на основе аддитивного формирования — метод ПАФОС. По субтрактивной технологии рисунок ПП получают травлением медной фольги по защитному изображению в фоторезисте, нанесенном на поверхность фольгированного диэлектрика (негативный метод) или в металлорезисте, осажденном на поверхность гальванически сформированных проводников в рельефе фоторезиста, нанесенного на фольгированный диэлектрик (позитивный метод). При создании новых изделий ЭС рекомендуются следующие способы изготовления ПП:

- химический, основанный на травлении медной фольги с пробельных мест заготовки фольгированного диэлектрика;
- электрохимический, состоящий из процессов химической металлизации будущих проводников и контактных площадок (химическое меднение) и последующего увеличения их толщины гальваническим осаждением меди (электролитическое наращивание);
- комбинированный, представляющий собой комбинацию первых двух методов, причем дорожки изготавливаются химической технологией, а металлизация стенок отверстий — электрохимической. Комбинированный метод подразделяется на негативный и позитивный [67].

3.3 Пайка монтажных соединений

Пайка — процесс соединения металлических частей изделия с помощью специального сплава — припоя. Она несколько напоминает сварку металлов, но при сварке соединяемые детали нагреваются до плавления, а при пайке нагревают припой и детали только до температуры плавления припоя. Расплавленный припой затекает в зазоры между деталями изделия под действием капиллярных сил, и чем меньше зазор между соединяемыми поверхностями при пайке, тем лучше проникает в зазор припой под их действием. Для образования качественного паяного соединения необходимо, чтобы жидкий припой хорошо смачивал поверхность основного металла и обеспечивал хорошее прилипание, т. е. необходимо:

- 1) подготовить поверхности деталей;
- 2) активировать соединяемые металлы и припой;

3) обеспечить взаимодействие на границе «основной металл – жидкий припой»;

4) создать условия для кристаллизации жидкой металлической прослойки.

Подготовка включает удаление загрязнений органического и минерального происхождения, оксидных пленок (механическим или химическим способом), а в некоторых случаях также нанесение покрытий, улучшающих условия пайки или повышающих прочность и коррозионную стойкость паяных соединений.

Пайка монтажных соединений необходима для обеспечения механически прочного и надежного электрического контакта; выполняют ее мягкими оловянно-свинцовыми припоями.

Пайка представляет собой соединение монтажного проводника или вывода ЭРЭ с контактным элементом расплавленным металлом или сплавом (припоем), который, затвердевая, образует паяное соединение. В процессе пайки происходят взаимное растворение и диффузия основного металла и припоя, что обеспечивает после затвердевания припоя механическую прочность, герметичность, электропроводность и теплопроводность соединения, для взаимного проникновения припоя и основного металла температура нагрева спаиваемых деталей должна быть несколько выше температуры плавления припоя. В отличие, от сварки при пайке не происходит плавления основного металла соединяемых деталей, так как температура плавления припоя всегда ниже температуры плавления основного металла.

Структура паяного соединения включает следующие основные элементы: зону сплавления, диффузионные зоны, прикристаллизованные слои и основной металл. В зависимости от соотношения физико-химических свойств основного металла и припоя, а также режима и условий процесса пайки различают следующие виды спаев:

- бездиффузионный;
- раствородиффузионный;
- контактно-реакционный.

Пайка осуществляется при температурах ниже точек плавления соединяемых материалов и требует выполнения комплекса физико-химических и технологических условий:

- подготовка поверхности деталей;
- обезжиривание паяемых поверхностей;
- удаление окисных пленок;
- активация паяемых материалов и припоя;
- смачивание паяемых поверхностей расплавом припоя;
- взаимодействие на границе «материал – жидкий припой»;
- кристаллизация жидкой металлической прослойки.

Практическая работа №1

Вариант 1

1. Назвать и охарактеризовать основные этапы развития электроники.

2. Как проявляют себя поверхностные и объемные дефекты в полупроводниковых материалах?

3. Какие индексы Вейсса и Миллера имеет кристаллическая грань, показанная на рисунке 3.1?

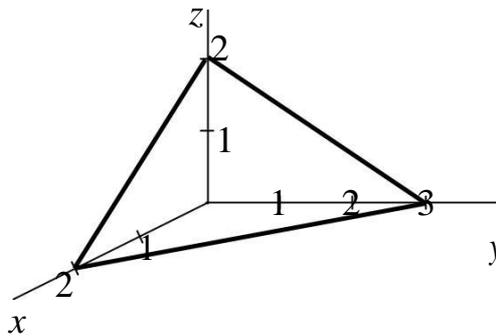


Рис. 3.1 — Кристаллическая грань

4. Чем объяснить различие свойств атомов, находящихся на поверхности и внутри твердого тела?

5. Вычислить площадь поверхности катализатора, если для образования монослоя на нем должно адсорбироваться $103 \text{ см}^3/\text{г}$ азота (объем приведен к 700 мм рт.ст. и 0°C). Адсорбция измеряется при -195°C . Эффективная площадь, занимаемая молекулой азота на поверхности при этой температуре, равна $16,2 \text{ \AA}^2$.

6. Назвать и охарактеризовать основные недостатки термодиффузионного легирования.

7. Пояснить сущность метода легирования ионной имплантацией.

8. Каков механизм очистки от загрязнений путем термообработки?

Вариант 2

1. Дать определение планарной технологии и охарактеризовать ее основные особенности. 15

2. Что такое линейные дислокации и как они влияют на электрическую проводимость полупроводников?

3. Какие индексы Миллера имеет кристаллическая плоскость в кубической решетке, показанной на рисунке 3.2?

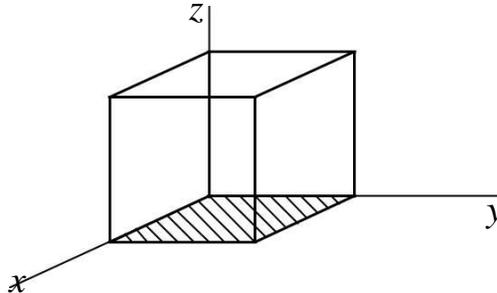


Рис. 3.2 — Кристаллическая плоскость

4. Чем определяются термодинамические параметры поверхности твердого тела?

5. Удельная поверхность активированного угля $400 \text{ м}^2/\text{г}$. Плотность метанола при 288 К $0,7958 \text{ г}/\text{см}^3$. Определить максимальное количество метанола, адсорбированное 1 г угля при 288 К , если спирт адсорбируется с образованием мономолекулярного слоя.

6. Объяснить суть двухстадийного процесса термодиффузии.

7. Назвать и обосновать достоинства и недостатки ионной имплантации.

8. Как обеспечивается очистка от загрязнений путем газового травления?

Вариант 3

1. В чем сущность механизма зарождения и роста пленок согласно теории Гиббса-Фальмера?

2. Какие плазмохимические реакции лежат в основе плазмохимического осаждения диэлектрических пленок?

3. В чем состоит сущность термовакuumного метода получения пленок?

4. Что такое литография? Назвать и охарактеризовать основные этапы проведения фотолитографии.

Вариант 4

1. Какие термодинамические условия определяют устойчивость сферического зародыша при формировании пленки?

2. В чем сущность процессов реактивного ионноплазменного осаждения диэлектрических пленок?

3. Назвать и охарактеризовать основные этапы термовакuumного осаждения пленок.

4. Назвать основные фотохимические законы и указать их применимость к процессам фотолитографии.

Практическая работа №2

Вариант 1

1. Перечислить и охарактеризовать основные виды интегральных микросхем.

2. Как наличие примесных дефектов влияет на проводимость полупроводников?

3. Алмаз имеет кубическую кристаллическую ячейку с $a = 3,56 \text{ \AA}$. Ячейка образована восемью атомами, имеющими координаты:

$$000, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}, \frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}, \frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}, \frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}, \frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}.$$

Сколько ближайших соседних атомов имеет каждый атом? Рассчитайте расстояние до каждого из этих соседних атомов.

4. Что такое поверхностное натяжение и от чего оно зависит?

5. Вычислите количество водорода (измеренного при стандартных условиях), которое адсорбируется 100 мл адсорбента, если его площадь поверхности 850 м², причем 95 % поверхности является активной. Диаметр молекулы водорода 0,92 Å. Адсорбированные молекулы касаются друг друга в плоскости так, что центры четырех соседних сфер расположены в углах квадрата.

6. Какие факторы и каким образом влияют на коэффициент диффузии?

7. Перечислить и обосновать основные процессы, возникающие при взаимодействии ионов с веществом.

8. Что такое анизотропность травления и как она проявляется?

Вариант 2

1. В чем особенности полупроводниковых ИМС?

2. Каковы основные виды и характерные особенности примесных дефектов?

3. Изобразить кристаллографические плоскости и направления 220 и 011 в кубической решетке.

4. Как температура влияет на поверхностное натяжение?

5. Поверхностное натяжение ртути при 25 °С равно 0,52 Н/м, ее плотность 13,5 г/см³. Ртуть не смачивает поверхность стекла. Определить относительное положение поверхностей ртути, если диаметр капилляра равен:

а) 0,5 мм;

б) 1,0 мм;

в) 1,5 мм.

6. Пояснить физический смысл коэффициента диффузии.

7. Обосновать основные механизмы потерь энергии ионов при их взаимодействии с веществом.

8. Каковы механизм и условия полирующего химического травления?

Вариант 3

1. Как свободная энергия образования зародыша зависит от его радиуса?

2. В чем сущность механизма плазмохимического осаждения диэлектрических пленок?

3. Какие факторы и как влияют на скорость испарения вещества в вакууме?

4. Назвать и охарактеризовать основные фотохимические реакции, протекающие в процессе экспонирования при фотолитографии.

Вариант 4

1. В чем особенности и отличия гетерогенного и гомогенного образования зародышей?

2. Каков механизм и каковы особенности химического осаждения пленок нитрида кремния?

3. Что такое давление насыщенного пара и как оно влияет на скорость испарения вещества в вакууме?

4. Назвать основные параметры и отметить особенности негативных и позитивных фоторезистов.

Практическая работа №3

Вариант 1

1. Изобразить структуры основных элементов ИМС, выполненных по планарной технологии (диод, резистор, транзистор, конденсатор).

2. В чем характерные особенности примесных точечных дефектов?

3. Кремний имеет кубическую кристаллическую ячейку с $a = 5,42 \text{ \AA}$. Ячейка образована восемью атомами, имеющими координаты:

$$000, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}, \frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}, \frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}, \frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}, \frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$$

Сколько ближайших соседних атомов имеет каждый атом? Рассчитайте расстояние до каждого из этих соседних атомов.

4. Что такое критическая температура и как она влияет на условие образования поверхности раздела двух фаз?

5. Удельная поверхность активированного угля $400 \text{ м}^2/\text{г}$. Плотность метанола при 288 К $0,7958 \text{ г}/\text{см}^3$. Определить максимальное количество метанола, адсорбированное 1 г угля при 288 К , если спирт адсорбируется с образованием мономолекулярного слоя.

6. Пояснить основные механизмы процессов термодиффузии.

7. Пояснить, как и почему потери энергии иона зависят от его энергии?

8. Что такое селективность травления?

Вариант 2

1. В чем особенности гибридных ИМС?

2. Что такое рекомбинация структурных дефектов?

3. Какие индексы Вейсса и индексы Миллера имеет кристаллическая грань, показанная на рисунке 3.3?

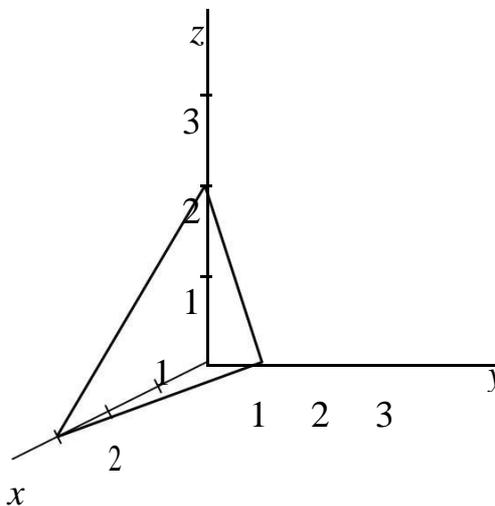


Рис. 3.3 — Кристаллическая грань

4. Почему при измельчении материалов изменяются их физико-химические свойства?

5. Один грамм силикагеля имеет активную площадь поверхности, равную 465 м^2 . Сколько брома поглощается 1 м^2 площади поверхности адсорбента, если 10 г силикагеля могут адсорбировать $5 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$ брома?

6. Пояснить, как, используя свойства термодиффузии, получить заданные *p-n-p*-структуры?

7. Какие факторы и как влияют на глубину проникновения иона в вещество?

8. Каков механизм процесса химического травления?

Вариант 3

1. Какие факторы и почему влияют на скорость образования зародышей?

2. Каковы механизм и особенности пиролитического осаждения оксидных защитных пленок?

3. Какие факторы и как влияют на длину свободного пробега частиц в вакууме?

4. Дать определение чувствительности и контрастности фоторезиста. От чего зависит светочувствительность фоторезиста?

Вариант 4

1. Какие факторы и почему влияют на структуру осаждения пленок?

2. В чем сущность химического метода осаждения диэлектрических пленок?

3. Что влияет на равномерность толщины осаждаемой пленки при термовакуумном напылении?

4. Что такое разрешающая способность, как она оценивается, какие факторы оказывают влияние на нее?

Практическая работа №4

Вариант 1

1. Каковы характерные особенности совмещенных ИМС?

2. Что такое равновесная концентрация дефектов и как ее определить?

3. Изобразить кристаллографические плоскости и направления 102 и 202 в кубической решетке.

4. Что такое смачивание и от чего оно зависит?

5. При адсорбции 2,8 г кислорода активированным углем при 68 К выделяется 1,36 кДж теплоты. Вычислите теплоту адсорбции кислорода на угле.

6. Пояснить закономерности распределения примеси при термодиффузии из бесконечного и ограниченного источников.

7. Что такое каналирование ионов и каковы условия его проявления?

8. Каков механизм ультразвуковой очистки?

Вариант 2

1. Что такое степень интеграции и как подразделяются ИМС в зависимости от степени интеграции?

2. Назвать и охарактеризовать основные виды дефектов кристаллической решетки.

3. Индексы Вейсса некоторой кристаллической грани имеют значения $\frac{1}{4} \frac{1}{3}$. 1. Какими будут соответствующие индексы Миллера?

4. Что является мерой смачивания и от чего она зависит?

5. Площадь поверхности 10^{-6} м^2 активированного угля равна 1600 м^2 . Какой объем аммиака могут адсорбировать $25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ активированного угля, если принять, что вся поверхность покрыта мономолекулярным слоем аммиака? Условно можно считать, что поперечное сечение молекулы NH_3 представляет собой квадрат с длиной стороны $2 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ и

что при полном заполнении поверхности соседние молекулы касаются друг друга.

6. Пояснить сущность второго закона Фика. Каков его физический смысл?

7. Какие факторы влияют на проявление эффекта каналирования?

8. Какова роль поверхностно-активных веществ в процессе очистки?

Вариант 3

1. Каков механизм роста пленки после получения первичного слоя?

2. В чем сущность и особенности комбинированного метода термического окисления кремния?

3. Что такое реиспарение атомов на подложке и что влияет на его проявление?

4. В чем сущность процессов проекционной фотолитографии?

Вариант 4

1. Как и почему температура подложки влияет на качество формируемой пленки?

2. В чем особенности окисления кремния в водяном паре?

3. В чем особенности резистивного метода испарения в вакууме?

4. Какую предельно возможную разрешающую способность обеспечивает фотолитография? Какие факторы и почему ограничивают разрешающую способность?

Практическая работа №5

Вариант 1

1. Что такое профильно-технологическая схема?

2. Что такое идеальные и реальные кристаллы, в чем их различие?

3. Что такое адсорбция и от чего она зависит?

4. Теплота адсорбции аммиака на мелко раздробленной меди равна $29,3 \text{ кДж/моль}$. Какой объем аммиака поглотилась медью, если при этом выделилось $158,6 \text{ кДж}$ теплоты?

5. Пояснить сущность первого закона Фика. Каков его физический смысл?

6. Как и почему эффект каналирования влияет на распределение имплантированных ионов по глубине?

7. Каков механизм физического обезжиривания?

Вариант 2

1. Перечислить и охарактеризовать основные технологические процессы, связанные с изготовлением ИМС.

2. Как и в какой мере проявляется анизотропия полупроводниковых материалов?

3. Определите межплоскостные расстояния d_{100} , d_{110} , d_{111} в кристалле кремния, если длина ребра куба $a = 0,541975$ нм.

4. Назвать виды адсорбции. Чем они обусловлены?

5. Вычислить количество водорода (измененного при стандартных условиях), который адсорбируется 100 мл адсорбента, если его площадь поверхности 850 м², причем 95 % поверхности является активной. Диаметр молекулы водорода $0,27$ нм. Адсорбированные молекулы касаются друг друга в плоскости так, что центры четырех соседних сфер расположены в углах квадрата.

6. Что такое термодиффузия и от чего она зависит?

7. Почему при ионном легировании эффект каналирования считается нежелательным и как от него избавляются?

8. Что такое деионизованная вода и каков механизм ее получения?

Вариант 3

1. Что такое эпитаксия и каковы особенности эпитаксиального наращивания пленок?

2. Какие факторы и как влияют на скорость окисления кремния?

3. Каков механизм электронно-лучевого метода испарения вещества в вакууме?

4. В чем сущность и каковы особенности эионных методов литографии?

Вариант 4

1. Каковы основные виды эпитаксии, в чем их особенности?

2. В чем сущность механизма термического окисления кремния?

3. Какие факторы и как влияют на структуру и качество осаждаемых пленок при термовакуумном испарении?

4. В чем особенности электронно-лучевой литографии?

Практическая работа №6

Вариант 1

1. Перечислить и охарактеризовать основные группы методов полупроводниковой технологии по результату воздействия на материал.

2. Дать определение поли- и монокристаллов, привести их характерные особенности.

3. Какие индексы Миллера имеет кристаллическая плоскость в кубической решетке, показанной на рисунке 3.5?

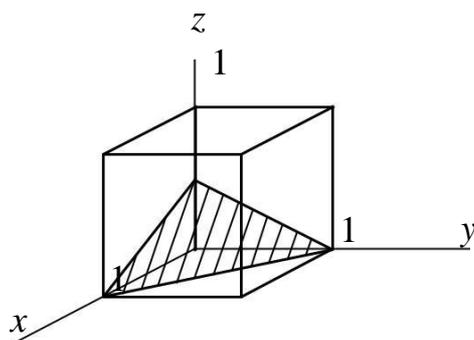


Рис.3.5 — Кристаллическая плоскость.

4. Дать определение силам Ван-дер-Ваальса, пояснить их физический смысл.

5. Вычислите площадь поверхности катализатора, 1 г которого при образовании монослоя адсорбирует 103 см^3 азота (при $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и 273 К). Адсорбция измеряется при 78 К , эффективная площадь, занятая молекулой азота на поверхности, $16,2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$.

6. Назвать и охарактеризовать основные методы легирования полупроводников.

7. Что такое радиационные дефекты и каков механизм их образования?

8. Каков механизм химического обезжиривания?

Вариант 2

1. Перечислить и охарактеризовать основные технологические процессы, связанные с изготовлением ИМС.

2. Что такое кристаллическая решетка, элементарная ячейка, каковы их параметры?

3. Пояснить, как и почему адсорбция зависит от температуры.

4. Какой объем ($л$) аммиака при 298 К и $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ может адсорбироваться на поверхности 45 г активированного угля, если вся поверхность полностью покрыта NH_3 ? Поверхность 1 г активированного древесного угля 1000 м^2 . Диаметр молекулы NH_3 равен $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$. Молекулы касаются друг друга в плоскости так, что центры четырех соседних сфер расположены в углах квадрата.

5. Что такое легирование материалов и какими способами оно осуществляется?

6. Что такое кластеры радиационных дефектов и что способствует их образованию?

7. Что собой представляют методы физического обезжиривания?

Вариант 3

1. Каковы основные методы осуществления эпитаксиального наращивания пленок?

2. Какие требования предъявляются к защитным диэлектрическим пленкам и какие исходные материалы могут быть использованы в качестве защитных пленок?

3. В чем достоинства и недостатки термовакuumного метода нанесения пленок?

4. В чем особенности и каков механизм сканирующей электронно-лучевой литографии?

Вариант 4

1. Каковы механизм и основные особенности эпитаксиального наращивания пленок?

2. Каков механизм электрохимического осаждения металлических пленок?

3. В чем особенности термовакuumного нанесения пленок сложного состава (сплавов)?

4. В чем особенности и каков механизм проекционной электронно-лучевой литографии?

4 Методические указания по выполнению тематических рефератов

В основе технологии производства интегральных микросхем (ИМС) заложены процессы, связанные с термической, ионно-плазменной, плазмохимической, лазерной, электронной и ионной обработками, термодиффузией, ионной имплантацией, фото-, рентгено-, ионо-, электролитографией и др. процессами. Множественность, сложность и взаимозависимость этих процессов требуют от будущего специалиста как глубокого изучения теории по отдельным разделам курса, так и достаточно широкого кругозора в самых различных областях физики, химии, математики, техники и технологии с целью увязать в единый технологический процесс множество самых различных операций. В этом заключаются сложность и своеобразие курса «Физико-химические основы технологии электронных средств».

Выполнение рефератов по данному курсу ставит своей целью:

- углубление теоретических знаний по отдельным разделам курса;
- развитие навыков в подборе специальной учебной и научной литературы, включая иностранную, умения работы с нею для освоения и совершенствования теоретических знаний;
- ознакомление с практическими расчетами физико-химических процессов, оценка влияния различного рода факторов на тот или иной технологический процесс;
- совершенствование навыков и умений обобщать результаты изучения теории, обосновывать элементы конструкции или технологические процессы;
- развитие самостоятельности и инициативы в выборе путей и методов решения инженерных задач.

Тематика рефератов охватывает широкий круг вопросов, связанных с физико-химическими процессами в технологии производства ИМС. Все темы можно объединить в несколько основных групп, для которых характерны общая тематика, общая методика выполнения, способ оформления, литература. К таким группам можно отнести следующие:

- 1) физико-химические процессы, лежащие в основе методов получения и исследования тонких пленок;
- 2) процессы, лежащие в основе различного рода методов очистки и поверхностной обработки подложек;
- 3) процессы получения в полупроводниковых кристаллах заданных структур методами эпитаксии, термодиффузии, ионной имплантации;
- 4) литографические процессы.

Перечень тем рефератов с заданиями приведен в разделе 3.4. Независимо от конкретной темы реферат, как правило, включает несколько разделов:

1. Введение. В данном разделе кратко отмечаются место и роль того или иного физико-химического процесса в технологии электронных

средств, выделяется проблема, которой посвящен реферат, важность и актуальность ее решения, формируется задача исследований, обосновываются пути ее решения.

2. Описание механизма, принципов и основных характеристик технологического процесса. В разделе приводится по возможности полная характеристика технологического процесса с анализом физико-химических особенностей. Здесь же приводятся оценка достоинств и недостатков процесса, сравнительные характеристики устройств, реализующих данный процесс. При описании механизма процесса следует по возможности полно использовать информацию из литературных источников, рисунки, схемы, диаграммы, которые иллюстрировали бы влияние тех или иных факторов на данный технологический процесс. Ссылка на источник информации должна быть обязательно. На основе анализа литературы с учетом индивидуального задания следует установить основные требования к процессу и устройству, его реализующему. При этом необходимо выделить все факторы, влияющие на этот процесс, и качественные характеристики конечного продукта процесса.

3. Выбор схемы и параметров процесса. На основе проведенного анализа литературы, касающейся данного процесса, выбирается схема его осуществления, описание его особенностей, составляется последовательность необходимых операций для осуществления процесса. Здесь же излагаются основные технологические приемы, их назначение, суть, технологические режимы в данной технологии.

4. Расчет технологических параметров. В ряде тем рефератов предполагается провести необходимые расчеты. В этом случае приводятся исходные данные, расчетные формулы, методика расчета, на основании которых разрабатываются рекомендации по проведению технологических режимов, используемых для практической реализации. В ряде случаев решение проблем разработки высокоэффективных ИМС (БИС, СБИС) требует применения новых методов автоматизированного проектирования, основой которых является математическое моделирование всех этапов изготовления прибора и на его основе оптимизация параметров технологического процесса. Основным этапом каждого уровня моделирования является формулировка задачи исследования, выбор математической модели процесса. Этому предшествует очень важный этап выбора физических приближений, ранжирование учитываемых и пренебрегаемых факторов, уточнения (в зависимости от типов и количества) различного рода факторов, влияющих на технологический режим.

5. Заключение. В данном разделе дается краткая характеристика выполненной работы, формируются общие выводы, отмечаются актуальность и полезность выполненной работы.

Темы рефератов

Тематические рефераты оформляются согласно общим требованиям оформления отчетов и курсовых работ, их объем должен быть в пределах 8–12 страниц.

4.1 Термовакuumный метод получения тонких пленок

Термовакuumный метод получения тонких пленок основан на нагреве в вакууме вещества до температуры испарения, образования пара и конденсации его на подложке. Поток испарившихся частиц в вакууме образуется, если давление пара испаряемого материала превышает давление в рабочей камере.

Для нагрева и испарения вещества используют различные виды резистивного нагрева, электронный и лазерный лучи, высокочастотные поля. Процесс напыления тонких пленок данным методом можно разделить на три основных этапа: испарение вещества, распространение пара, конденсация пара на подложке. На каждом из этих этапов существенное влияние оказывают степень вакуума в рабочей камере и соотношения потоков молекул остаточного газа и испаряемого вещества, направляемого на поверхность подложек, что, в свою очередь, зависит от вида испаряемого вещества и температур испарителя и подложки.

По данному направлению предполагаются следующие темы рефератов с соответствующими заданиями. Здесь же указаны порядковые номера источников в списке рекомендуемой литературы и страницы, посвященные данной теме.

По некоторым темам рефератов предложены достаточно обширные перечни рекомендуемой литературы. Это вовсе не означает, что при подготовке реферата следует обязательно пользоваться всей указанной литературой. Очень часто материал одной и той же темы в различных книгах в большей или меньшей мере повторяется, дублируется. Относительно большой список рекомендуемой литературы поэтому в зависимости от доступности тех или иных книг помогает получить нужную информацию, расширяет в этих условиях возможности поиска необходимого материала.

Вариант 1 Тема: Исследование процессов нанесения пленочных покрытий в квазизамкнутом объеме.

Задание

Механизм процесса нанесения покрытий в условиях квазизамкнутого объема (КЗО).

Анализ возможности использования электронных пушек для нанесения пленок в условиях КЗО.

Обоснование схемы устройства для нанесения пленок в условиях КЗО.

Литература: 1, с. 262–274; 2, с. 15–87; 3, с. 157–187; 7, с. 6–36; 11, с. 11–41; 12, с. 97–145; 22, с. 290–302.

Вариант 2 Тема: Процессы получения пленок сложного состава (сплавов).

Задание

Анализ возможных методов напыления тонких пленок. Общие принципы, лежащие в основе термического испарения и конденсации материалов в условиях вакуума. Особенности испарения и конденсации сплавов.

Анализ факторов, влияющих на качество напыляемых пленок. Особенности адгезии металлических пленок на подложках из стекла и керамики.

Методы контроля толщины и анализ качества пленок.

Литература: 1, с. 262–274; 2, с. 175–187; 3, с. 157–179; 8, с. 174–195; 16, с. 34; 22, с. 290–302; 48, с. 57–63; 59, с. 71–75; 65, с. 70–75.

Вариант 3 Тема: Исследование технологических факторов, влияющих на адгезию пленок, получаемых термовакuumным методом.

Задание

Анализ основных физических и химических процессов и принципов, влияющих на адгезию.

Анализ возможных методов оценки адгезии.

Описание методики измерения адгезии пленок и схемы устройства для оценки адгезии.

Литература: 2, с. 15–87; 2а, с. 264–267; 8, с. 97–100, 174–217; 11, с. 11–41; 16, с. 57–59; 42, с. 319–323; 46, с. 141–144; 48, с. 57–63; 56, с. 232–238; 57, с. 73–81; 59, с. 71–75.

Вариант 4 Тема: Исследование процессов получения пленок ионно-кластерным методом.

Задание

Механизм получения пленок ионно-кластерным методом (ИКМ).
Анализ особенностей напыления пленок различных материалов ИКМ.

Факторы, влияющие на процесс формирования пленок при ИКМ.

Описание схемы устройства для напыления пленок ИКМ.

Литература: 1, с. 278–281; 8, с. 230–233; 16, с. 182–195.

4.2 Нанесение тонких пленок методом ионного распыления

Атомарный (молекулярный) поток вещества, осажденного в виде тонкой пленки на подложке, можно получить, бомбардируя поверхность твердого образца ионами с энергией от сотен до нескольких тысяч электрон-вольт. Источником ионов служит либо самостоятельный тлеющий разряд (диодные системы), либо плазма несамостоятельного (дугового или высокочастотного) разряда, либо автономный ионный источник. При минимально возможном парциальном давлении остаточных газов в камере распыления чистота пленок тем выше, чем выше скорость осаждения, что обеспечивается уменьшением давления рабочего газа при сохранении высокой плотности ионного тока. Это достигается при использовании накального катода, когда газовый разряд возбуждается термоэлектронной эмиссией и источником ионов служит плазма несамостоятельного газового разряда. Подобные системы называются ионно-плазменными.

Наложение магнитного поля на область плазмы разряда повышает эффективность ионизации газа и соответственно увеличивает скорость распыления. Усовершенствованным вариантом диодных систем распыления являются магнетронные распылительные системы (МРС). Высокие скорости распыления, характерные для МРС, обеспечиваются за счет локализации плазмы у поверхности распыляемой мишени путем наложения скрещенных электрического и магнитного полей. Электроны, эмиттируемые катодом-мишенью, оказываются в своеобразной ловушке, создаваемой, с одной стороны, магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой — поверхностью мишени, отталкивающей электроны. Вследствие этого электроны перемещаются в ловушке по сложной циклоидальной траектории, вызывая эффективную ионизацию молекул газа и повышая концентрацию положительных ионов вблизи мишени.

Ионно-плазменные и магнетронные распылительные системы в обычных условиях используются для распыления металлов. Для распыления диэлектрических и полупроводниковых материалов

применяются высокочастотные системы распыления. Периодическое с определенной частотой изменение знака потенциала на мишени приводит к поочередной бомбардировке мишени электронами и положительными ионами. Так как подвижность электронов существенно больше подвижности ионов, то на мишени постепенно возрастает отрицательный потенциал, обеспечивающий на ней постоянное отрицательное смещение, за счет чего происходит ускорение и бомбардировка ионами мишени, ее распыление.

Получение диэлектрических пленок возможно также в процессах реактивного распыления. Эти процессы осуществляются в том случае, когда в камеру распыления кроме рабочего газа специально вводят реакционноспособный активный газ, взаимодействующий с распыляемым материалом и образующий в результате пленку, свойства которой существенно отличаются от материала мишени. На основе распыляемого с катода металла и различных активных газов можно получить широкую гамму свойств осаждаемых пленок — от проводящих и низкоомных резистивных до высокоомных резистивных и диэлектрических.

Предлагаются следующие темы рефератов по данному направлению.

Вариант 5 Тема: Исследование влияния условий ионно-плазменного распыления на скорость и качество напыляемых пленок.

Задание

Механизм напыления пленок ионно-плазменным методом. Влияние основных параметров на скорость ионного распыления.

Факторы, влияющие на процесс формирования пленки при ионно-плазменном распылении.

Описание схемы устройства для напыления пленок методом ионно-плазменного распыления.

Литература: 1, с. 282–288; 2, с. 412–429; 3, с. 209–217; 4, с. 238–246; 6, с. 262–269; 8, с. 203–217; 9, с. 118–124; 10, с. 114–122; 11, с. 42–46; 16, с. 39–63; 22, с. 303–309; 23, с. 144–153; 26, с. 30–38; 42, с. 323–327; 45, с. 192–199; 46, с. 145–150; 48, с. 63–65; 51, с. 209–228; 65, с. 75–83.

Вариант 6 Тема: Исследование факторов, влияющих на эффективность напыления металлических и диэлектрических пленок в магнетронной распылительной системе.

Задание

Механизм напыления пленок в магнетронной распылительной системе (МРС).

Анализ факторов, влияющих на процесс формирования пленок в МРС.

Описание схемы МРС.

Литература: 1, с. 291–295; 2, с. 69–70; 3, с. 220–223; 6, с. 269–273; 8, с. 217–224; 16, с. 97–111; 22, с. 310–313; 26, с. 38–49; 46, с. 150–151; 56, с. 77–92.

Вариант 7 Тема: Исследование особенностей получения пленок методом реактивного ионного распыления.

Задание

Механизм процесса получения пленок методом реактивного ионного распыления.

Влияние основных параметров на скорость получения пленок. Факторы, влияющие на процесс формирования пленки. Описание схемы устройства для реализации реактивного ионного распыления.

Литература: 2, с. 436–441; 3, с. 223–225; 5; 10, с. 136–140; 11, с. 52–53; 16, с. 140–143; 23, с. 152–154.

4.3 Методы получения защитных диэлектрических пленок

В технологии ИМС используют диэлектрические пленки оксида, нитрида и карбида кремния. Такие пленки выполняют функции маскирующих, изолирующих или пассивирующих слоев. Формирование диэлектрических пленок может быть основано на образовании пленок за счет материала подложки (термическое, ионно-плазменное окисление кремния, анодное окислирование) или на осаждении материала пленки из внешней среды (пиролиз, плазмохимическое осаждение, полимеризация в плазме, получение пленок из пленкообразующего раствора).

При термическом окислении пленка SiO_2 образуется за счет химического взаимодействия частиц окислителя с атомами кремния. Рост оксида происходит на границе раздела $Si — SiO_2$, которая в процессе окисления движется в глубь кремниевой пластины. Скорость окисления определяется диффузией окислителя сквозь растущую пленку к границе раздела $Si — SiO_2$.

Метод анодного окисления кремния заключается в окислении поверхности кремния в жидком электролите или газовой плазме при воздействии электрического поля. Процесс выращивания анодных оксидных пленок представляется как процесс переноса ионов кремния через границу раздела оксид-кремний и через оксид к границе раздела оксид-электролит, где происходит реакция окисления. Процессы анодного окислирования применяют и в отношении других материалов, в частности для получения пленок оксида алюминия.

Пиролитическое осаждение пленок из оксида кремния заключается в термическом (при температуре 400–700 °С) разложении газообразных сложных соединений кремния (алкоксиланов) с выделением SiO_2 . Подобным образом при использовании соответствующих газообразных реактивов возможно получать слои из нитрида и карбида кремния.

При плазмохимическом осаждении процесс разложения кремнийсодержащих соединений активизируется высокочастотным разрядом, образующим в газовой среде при пониженном давлении низкотемпературную кислородную плазму, состоящую из атомов, радикалов и молекул в разной степени возбуждения, а также электронов и ионов, в целом способствующих активизации процесса образования пленок.

Изоляционным и диэлектрическим слоем в микросхемах могут служить органические пленки, для получения которых используют явление полимеризации мономерных молекул, адсорбированных подложкой из паровой фазы под воздействием электронного луча, ультрафиолетового излучения или газового разряда.

Вариант 8 Тема: Исследование влияния технологических факторов на скорость получения и качество пленок SiO_2 методом термического окисления.

Задание

Механизм получения пленок SiO_2 методом термического окисления.

Анализ влияния технологических параметров на процесс окисления кремния.

Факторы, влияющие на скорость получения пленок SiO_2 .

Литература: 3, с. 70–75; 4, с. 113–120; 9, с. 135–148; 15, с. 159–163; 17, с. 92–101; 21, с. 8–17; 22, с. 98–105; 46, с. 151–156; 47, с. 189–193; 48, с. 39–44; 58, с. 174–205; 65, с. 64–70.

Вариант 9 Тема: Исследование факторов, влияющих на пиролитическое осаждение пленок SiO_2 и Si_3N_4 .

Задание

Механизм получения пленок методом пиролитического осаждения.

Анализ влияния технологических параметров на пиролитическое осаждение.

Факторы, влияющие на скорость получения и качество пленок пиролитическим методом.

Анализ преимуществ и недостатков метода пиролитического осаждения.

Литература: 3, с. 75–82; 4, с. 120–122; 9, с. 149–151; 21, с. 18–19; 42, с. 315–319; 46, с. 157–162; 55, с. 89–92, 116–126.

Вариант 10 Тема: Исследование процессов плазмохимического осаждения защитных пленок.

Задание

Роль и значение защитных пленок в технологии ИМС. Требования к параметрам защитных пленок.

Механизм получения защитных пленок методом плазмохимического осаждения.

Факторы, влияющие на скорость получения и качество пленок при плазмохимическом осаждении.

Анализ достоинств и недостатков метода плазмохимического осаждения в сравнении с другими методами получения защитных пленок.

Литература: 3, с. 79–82; 4, с. 238–241; 18, с. 73–93; 21, с. 19–21; 22, с. 116–118; 23, с. 154–158; 26, с. 24–26; 42, с. 314–315; 58, с. 102–161.

4.4 Химические и электрохимические методы осаждения металлических пленок

Химические и электрохимические методы получения тонких металлических пленок из жидких растворов осуществляются путем восстановления ионов металла из раствора на поверхности подложек. Химическое осаждение пленок (металлизация) осуществляется в основном на непроводящие материалы (керамику, пластмассу, и т.п.) и основывается на окислительно-восстановительной реакции, при которой необходимые для восстановления катиона металла электроны образуются в результате окисления в водном растворе. Для стимулирования процесса осаждения поверхность диэлектрических подложек предварительно сенсibiliзируется и активизируется специальными составами.

Электрохимические методы осуществляются в электрохимических системах, содержащих внешний источник э.д.с. или тока, электрическое поле которого приложено к твердотельным электродам через раствор электролита. В процессе электролиза электрическая энергия расходуется на нагрев системы, перенос вещества электрическим полем и на повышение химической энергии веществ, образующихся вследствие катодных восстановительных и анодных окислительных реакций. Скорость осаждения и качество осаждаемых пленок зависят от таких параметров процесса, как плотность тока, потенциал рабочего электрода, состав электролита, его температура и длительность процесса, а также режим подачи напряжения (постоянное, импульсное, реверсивное).

По данному направлению возможны следующие темы рефератов:

Вариант 11 Тема: Исследование автокаталитического метода получения металлических пленок.

Задание

Роль и значение металлических пленок в технологии ИМС. Анализ методов получения металлических пленок. Достоинства и недостатки метода химической металлизации.

Механизм процесса получения пленок автокаталитическим методом.

Анализ факторов, влияющих на адгезию и качество пленок при автокаталитическом методе.

Литература: 2, с. 471–474; 8, с. 141–157; 9, с. 154–156; 23, с. 87–98; 29, с. 90–104; 30; 31; 46, с. 168–169; 61, с. 67–98.

Вариант 12 Тема: Исследование физико-химических процессов электрохимического осаждения.

Задание

Роль и значение металлических пленок в технологии ИМС. Механизм электрохимического осаждения пленок.

Анализ факторов, влияющих на рассеивающую способность электролитов и на качество электрохимических покрытий.

Особенности электрохимического осаждения меди, цинка, олова.

Литература: 2, с. 464–470; 4, с. 71–74; 8, с. 157–174; 9, с. 156–159; 23, с. 98–107; 29, с. 5–37; 32; 33; 34; 46, с. 166–168; 47, с. 105–125, 211–217.

4.5 Физико-химические основы процессов обработки поверхностей полупроводниковых пластин

Обработка поверхности полупроводниковых пластин предшествует операциям изготовления полупроводниковых приборов и ИМС и подразделяется на очистку и травление. При очистке с поверхности удаляются физические и химические загрязнения, при травлении вместе с загрязнениями удаляется верхний слой пластины, а также формируется необходимый рельеф, удаляются технологические слои и выявляются структурные дефекты.

Операции очистки и травления подразделяются по физическому состоянию используемых реактивов на жидкостные и сухие (газовые), по механизму процессов на физические и химические и, кроме того, по способам интенсификации процессов, используемым средам, оборудованию, оснастке и др.

К физическим методам очистки относят ультразвуковую обработку, смывание загрязнений потоком жидкости с использованием щеток или кистей, сдувание струей газа, бомбардировку ионными и электронными пучками, обработку ионами в плазме, обработку в вакууме или инертных средах при высокой температуре. К химическим методам очистки относят растворение и травление загрязнений химическими реактивами, плазмохимические процессы и т.д.

Возможные темы рефератов по данному направлению следующие:

Вариант 13 Тема: Исследование особенностей химического травления кремниевых пластин.

Задание

Роль и значение химического травления в технологии ИМС. Виды химического травления.

Механизм химического травления и факторы, влияющие на производительность и качество травления.

Литература: 4, с. 59–67; 8, с. 112–125; 9, с. 235–250; 23, с. 113–125; 26; 35, с. 55–64; 41, с. 24–26; 42, с. 302–304; 47, с. 194–198; 48, с. 30–34; 56, с. 46–49, 252–255; 60, с. 59–62.

Вариант 14 Тема: Исследование процессов плазмохимического травления.

Задание

Роль и значение травления в технологии ИМС.
Механизм плазмохимического травления.

Факторы, влияющие на эффективность плазмохимического травления.

Литература: 1, с. 129–139; 3, с. 116–118; 4, с. 69–71, 246–251; 8, с. 242–262; 9, с. 261–266; 16, с. 121–156; 18, с. 205–252; 22, с. 91–97; 26, с. 11–29; 35, с. 68; 42, с. 309–311; 45, с. 106–150; 46, с. 89–92; 55; 60, с. 68–70; 63, с. 294–308.

Вариант 15 Тема: Исследование особенностей реактивного ионного травления.

Задание

Роль и значение травления в технологии РЭА и технологии ИМС.
Сравнительный анализ известных методов травления, применяемых в технологии ИМС.

Механизм процесса реактивного ионного травления. Факторы, влияющие на эффективность реактивного ионного травления.

Литература: 4, с. 246; 16, с. 121–156; 18, с. 253–296, 322–364, 402–429; 25, с. 51–69; 26, с. 11–29; 46, с. 92–93; 56, с. 49–53, 256–257; 59, с. 27–28.

Вариант 16 Тема: Исследование процессов ионно-лучевого травления полупроводниковых и диэлектрических материалов.

Задание

Роль и значение ионно-лучевого травления полупроводниковых материалов в технологии ИМС.

Механизм ионно-лучевого травления.

Особенности ионной обработки полупроводниковых и диэлектрических материалов.

Литература: 16, с. 156–180; 18, с. 297–320; 25, с. 51–69; 46, с. 84–89; 51, с. 209–235; 59, 24–28.

4.6 Методы создания полупроводниковых структур с заданными свойствами

Одним из основных процессов в современной технологии изготовления полупроводниковых приборов и ИМС является легирование — дозированное введение примесей в полупроводниковый материал для изменения его электропроводности и создания структур с заданными свойствами. В зависимости от физики процесса и применяемого технологического оборудования различают следующие методы легирования: термодиффузию, радиационно-стимулированную диффузию и ионную имплантацию.

Высокотемпературная диффузия (термодиффузия) основана на перераспределении частиц одного вещества в другом в направлении убывания их концентрации при тепловом воздействии. Скорость диффузии определяется подвижностью диффундирующих в кристаллической решетке полупроводника атомов и зависит от идеальности полупроводникового кристалла, вида и концентрации дефектов в кристалле, а также от выбранного кристаллографического направления.

Другим распространенным методом легирования является ионная имплантация — введение в полупроводник необходимых примесей в виде ионов. Обладая большой (до 1000 кэВ) энергией, ионы примеси проникают через поверхность полупроводника в его кристаллическую решетку. В результате столкновений с атомами, расположенными в узлах кристаллической решетки, ионы примеси смещают их в междоузлия с образованием вакансий. Так как энергия ионов примеси в 100–1000 раз больше энергии связи атомов в решетке полупроводника, каждому из них передается огромное количество энергии. Этот лавинообразный процесс вызывает каскад последовательных смещений атомов в кристаллической решетке и возникновение нескольких тысяч точечных дефектов. Поэтому для восстановления кристаллической структуры, снятия напряжений и устранения дефектов после ионного легирования полупроводниковые подложки отжигают при температуре 600–800 °С.

Радиационные нарушения кристаллической решетки снижают энергию активации процесса диффузии и соответственно увеличивают коэффициент диффузии. Это способствовало созданию метода легирования посредством радиационностимулированной диффузии. Для производства радиационных дефектов используются ионы легких неактивных элементов (H^+ , He^+ и других) при высоких энергиях. Термодиффузия, осуществляемая в таком образом подготовленную полупроводниковую пластину, отличается высокой скоростью, большой

глубиной легирования и четким профилем распределения примесей по глубине.

Создание полупроводниковых структур с заданными свойствами возможно путем выращивания эпитаксиальных слоев. Эпитаксия – процесс ориентированного наращивания монокристаллического слоя, в результате которого образующаяся новая фаза закономерно продолжает кристаллическую решетку подложки с образованием переходного эпитаксиального слоя, способствующего когерентному срастанию двух решеток по плоскостям и направлениям со сходной плотностью упаковки атомов. При эпитаксии атомы примеси внедряются из внешней среды в кристаллическую решетку эпитаксиального слоя непосредственно в процессе его роста. Концентрация атомов примеси легко регулируется, и характеристики электрофизических параметров эпитаксиального слоя могут изменяться почти неограниченно.

Технология получения кремниевых эпитаксиальных слоев основана на использовании метода восстановления кремния из парогазовой смеси ($SiCl_4 + H_2$) или при пиролизе моносилана.

Для получения эпитаксиальных слоев $GaAs$ получил распространение жидкофазный метод, основанный на кристаллизации слоев $GaAs$ из переохлажденных насыщенных растворов.

В последнее время успешно развивается метод молекулярно-лучевой эпитаксии, основанный на конденсации полупроводниковых материалов с дозированным введением примесей из молекулярных пучков в условиях сверхвысокого вакуума (до 10^{-8} Па). Эпитаксиальный рост осуществляется посредством одновременной реакции многочисленных молекулярных пучков различной плотности и химического состава с нагретой подложкой и характеризуется малой скоростью протекания эпитаксии, что позволяет контролировать химический состав кристаллической структуры и распределение концентрации элементов по глубине непосредственно во время осаждения слоев.

Возможные темы рефератов по данной тематике следующие:

Вариант 17 Тема: Исследование факторов, влияющих на процессы термодиффузии.

Задание

Роль и значение термодиффузии в технологии ИМС.
Механизм термодиффузии.

Факторы, влияющие на эффективность термодиффузии.

Анализ возможности разработки математической модели процесса термодиффузии.

Литература: 1, с. 149–203; 3, с. 8–51; 4, с. 172–201; 8, с. 125–141; 9, с. 270–308; 10, с. 171–178; 13, с. 71–102; 14, с. 44–60; 15, с. 188–195; 17, с. 113–120; 21, с. 47–62; 22, с. 119–139; 41, с. 18–20; 42, с. 353–362; 46, с. 187–197; 47, с. 157–161; 48, с. 50–56; 56, с. 54–58, 365–369; 65, с. 24–37.

Вариант 18 Тема: Исследование факторов, влияющих на процессы выращивания эпитаксиальных слоев из газовой фазы.

Задание

Роль и значение эпитаксии в технологии ИМС. Механизм процессов газовой эпитаксии. Факторы, влияющие на процессы эпитаксии.

Анализ возможности разработки математической модели процессов выращивания эпитаксиальных слоев из газовой среды.

Литература: 1, с. 204–231; 3, с. 61–62; 4, с. 87–109; 9, с. 35–102; 13, с. 97–99; 14, с. 72–74; 21, с. 63–78; 41, с. 16–18; 46, с. 174–183; 47, с. 198–202; 48, с. 35–39; 49, с. 222–239; 55, с. 264–292; 59, с. 113–119; 62, с. 97–109; 65, с. 47–63.

Вариант 19 Тема: Исследование процессов молекулярно-лучевой эпитаксии.

Задание

Роль и значение возможностей молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в технологии ИМС.

Механизм МЛЭ.

Особенности технологии МЛЭ и структура пленок, получаемых при МЛЭ.

Литература: 1, с. 206–208; 15, с. 154–156; 21, с. 80–81; 22, с. 150–152; 26, с. 82–91; 45, с. 227–248; 46, с. 184–187; 56, с. 349–358; 58, с. 102–121.

Вариант 20 Тема: Исследование процессов радиационно-стимулированной диффузии.

Задание

Роль и значение легирования полупроводниковых материалов в технологии ИМС.

Механизм процессов радиационно-стимулированной диффузии (РСД).

Влияние различных факторов на РСД.

Достоинства и недостатки метода РСД в сравнении с другими методами легирования.

Литература: 3, с. 59; 4, с. 272–275; 9, с. 325–327; 56, с. 387–388.

Вариант 21 Тема: Исследование процессов ионного легирования полупроводниковых материалов.

Задание

Физические особенности процесса ионного легирования. Анализ влияния технологических параметров на процесс ионной имплантации.

Схема устройства для ионной имплантации.

Возможности математического моделирования процесса ионной имплантации.

Литература: 1, с. 231–262; 3, с. 51–61; 4, с. 202–228; 8, с. 262–274; 9, с. 309–325; 13, с. 49–61; 14, с. 28–43; 15, с. 196–201; 20, с. 9–22; 22, с. 164–193; 41, с. 20–22; 42, с. 364–370; 45, с. 152–192; 46, с. 198–204; 52, с. 134–137; 56, с. 58–62, 370–387; 58, с. 292–337; 59, с. 119–128; 65, с. 37–47.

4.7 Литографические процессы

Литография — это процесс формирования отверстий в масках, создаваемых на поверхности пластины, предназначенных для локального легирования, травления, окисления, напыления и других операций. Различают фото-, электроно-, рентгено- и ионную литографию.

Ведущую роль в технологии ИМС занимает фотолитография. Она основывается на использовании светочувствительных полимерных материалов — фоторезистов, которые могут быть негативными и позитивными. Негативные фоторезисты под действием света полимеризуются и становятся нерастворимыми в специальных веществах — проявителях. После локальной засветки (экспонирования) растворяются и удаляются незасвеченные участки. В позитивных фоторезистах свет разрушает полимерные цепочки и растворяются засвеченные участки.

Экспонирование производят через стеклянную маску — фотошаблон, имеющий прозрачные и непрозрачные участки. После обработки в проявителе за счет удаления в резистивном слое локальных участков получают резистивную маску, через которую можно проводить последующую обработку.

Перспективным является метод электронолитографии (ЭЛ). Эффекты дифракции, ограничивающие разрешающую способность фотолитографии и связанные с большой длиной волны экспонирующего излучения, в ЭЛ пренебрежимо малы. При ЭЛ его острофокусированный электронный луч воздействует на резист, производя либо его разрушение, либо его закрепление. Сформированный из резиста рельеф (топологический рисунок) и является маской для различных технологических воздействий (для травления подложки ионным пучком или в плазме, а также для селективного ионного внедрения примеси в подложку). Управление перемещением электронного луча осуществляется с помощью ЭВМ.

Рентгеновая литография использует мягкое рентгеновское излучение с длиной волны около 1 нм. Так как фокусирующих систем для него не существует, то литография является контактной, т.е. производится через шаблон, представляющий собой тонкую мембрану, на которую

нанесен тонкопленочный рисунок из непрозрачного для рентгеновских лучей металла.

Ионно-лучевая литография использует облучение резиста потоком ионов и может быть либо проекционной (через шаблон), либо сканирующей. Чувствительность резистов к ионному облучению много выше, чем к электронному. Вследствие меньшего рассеяния ионов в слое резиста, разрешающая способность может быть доведена до 0,01 мкм. Сканирующие ионно-лучевые системы позволяют создать рисунок тонких металлических слоев не только без шаблона, но и без слоя резиста, используя непосредственно ионное травление.

Возможные темы рефератов по данной тематике следующие:

Вариант 22 Тема: Исследование физико-химических процессов фотолитографии.

Задание

Механизм процесса фотолитографии.

Анализ известных видов литографии, их технологических возможностей.

Факторы, влияющие на разрешающую способность различных видов литографии.

Анализ факторов, определяющих параметры и свойства фоторезисторов.

Литература: 1, с. 336–369; 3, с. 90–127; 4, с. 135–169; 8, с. 270–310; 9, с. 343–362; 10, с. 189–204; 17, с. 102–103; 22, с. 194–239; 41, с. 34–37; 42, с. 332–347; 43, с. 5–61; 44, с. 14–18; 46, с. 88–120; 48, с. 44–50; 53, с. 44–47; 54, с. 30–38; 55, с. 189–256; 56, с. 34–39, 281–294, 331–336; 58, с. 354–373; 62, с. 259–272; 65, с. 97–108; 63, с. 424–497.

Вариант 23 Тема: Исследование процессов и перспективных возможностей проекционной и сканирующей электронной литографии.

Задание

Механизм электронной литографии.

Факторы, влияющие на разрешающую способность электронной литографии.

Перспективные возможности проекционной и сканирующей электронной литографии.

Особенности электронных резистов и шаблонов.

Литература: 1, с. 369–383; 3, с. 134–140; 9, с. 364–369; 15, с. 220–228; 22, с. 247–259; 26, с. 73–74; 42, с. 350–352; 43, с. 90–102; 44; 45, с. 52–66; 46, с. 121–126; 55, с. 250–264; 63, с. 39–42, 313–336; 58, с. 373–382; 62, с. 272–276; 63, с. 14–85, 163–176; 65, с. 108–115; 66, с. 158–164, 530–586.

Вариант 24 Тема: Исследование процессов и анализ технологических возможностей рентгенолитографии.

Задание

Механизм процесса рентгенолитографии (РЛ). Факторы, влияющие на разрешающую способность РЛ. Особенности рентгенорезистов и рентгеношаблонов. Описание схемы установки для РЛ.

Анализ перспективных возможностей использования синхротронного излучения для РЛ.

Литература: 1, с. 383–391; 3, с. 128–134; 4, с. 169; 9, с. 362–364; 15, с. 228–232; 22, с. 259–268; 41, с. 37–39; 42, с. 347–350; 43, с. 102–106; 44, с. 284–286; 46, с. 126–130; 53, с. 47–48; 56, с. 42–45, 295–309, 340–348; 58, с. 382–391; 63, с. 149–163; 64, с. 241–294; 66, с. 138–150, 587–591; 67, с. 323–423; 68, с. 25–45.

Вариант 25 Тема: Исследование особенностей и технологических возможностей ионно-лучевой литографии.

Задание

Сравнительный анализ видов литографии и их технологических возможностей.

Механизм ионно-лучевой литографии.

Перспективные возможности ионно-лучевой литографии.

Литература: 1, с. 391–397; 4, с. 272; 26, с. 71–73; 41, с. 40; 43, с. 106–107; 45, с. 213–222; 46, с. 130–133; 56, с. 340–348; 64, с. 141–241; 66, с. 150–157, 591–594; 67, с. 202–322; 68, с. 9–25.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Томилин, Н.П. Томилина Физико-химические основы технологии электронных средств. Учебное пособие. — Красноярск, 2007.
2. Смирнов, В.И. Физико-химические основы технологии электронных средств: учебное пособие / В. И. Смирнов. — Ульяновск: УлГТУ, 2005.— 112 с.
3. Томилин В.И. Физико-химические основы технологии электронных средств: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.И. Томилин. — М.: Издательский центр «Академия», 2010.— 416 с.
4. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. — М.: Радио и связь, 1991. — 528 с.
5. Технология тонких пленок: Справочник. В 2-х томах / Под ред. Л. Майс-села, Р. Глэнга. — М.: Сов. радио, 1977. — Т.1. — 644 с.; Т.2. — 768 с.
6. Парфенов О.Д. Технология микросхем. — М.: Высш. школа, 1986. — 320 с.
7. Курносков А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Высш. школа, 1986. — 368 с.
8. Установка полуавтоматическая вакуумная резистивного напыления пленок УВН-71ПЗ: Техническое описание. 1975.
9. Ефимов Е.И. и др. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. — М.: Высш. школа, 1986. — 464 С.
10. Кондратов А.В., Потапенко А.А. Термическое испарение в вакууме при производстве изделий радиоэлектроники. — М.: Радио и связь, 1986. — 80 с.
11. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. — М.: Высш. школа, 1987. — 376 с.
12. Чистяков Ю.Д., Райнова Ю.П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. — М.: Металлургия, 1979. — 408 с.
13. Иванов-Есипович А.К. Технология микросхем. — М.: Высш. школа, 1972 — 256 с.
14. Минайчев В.Е. Нанесение пленок в вакууме. — М.: Высш. школа, 1989. — 110 с.
15. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов и др. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 256 с.
16. Бубенников А.Н., Садовников А.Д. Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. — М.: Радио и связь, 1991. — 288 с.
17. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микро-технологий, приборов и схем. — М.: Высш. школа, 1989. — 320 с.

18. Сугано Т. и др. Введение в микроэлектронику: Пер. с япон. – М.: Мир, 1988. – 320 с.
19. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.
20. Маллер Р., Кейлингс Т. Элементы интегральных схем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 630 с.
21. Плазменная технология в производстве СБИС: Пер. с англ. / Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. – М.: Мир, 1987. – 470 с.
22. Дерягин Б.В. Адгезия твердых тел. – М.: Наука, 1973.
23. Углов А.А. Адгезионная способность пленок. – М.: Радио и связь, 1987.
24. Никифорова–Денисова С.Н., Любушкин Е.Г. Термические процессы. – М.: Высш. школа, 1989. – 95 с.
25. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Радио и связь, 1987. – 464 с.
26. Иванов-Есипович Н.К. Физико-химические основы производства радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Высш. школа, 1979. – 205 с.
27. Ясуда Х. Полимеризация в плазме: Пер. с япон. – М.: Мир, 1988. – 376 с.
28. Киреев В.Ю., Данилин Б.С., Кузнецов В.И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур. – М.: Радио и связь, 1983. – 128 с.
29. Моряков О.С. Элионная обработка – М.: Высш. школа, 1990. – 128 с.
30. Аверьянов Е.Е. Справочник по анодированию. – М.: Машиностроение, 1988.
31. Грилихес С.Я. Защита металлов оксидными и фосфатными пленками. – М.: Машиностроение, 1961.
32. Практикум по прикладной электрохимии / Под ред. В.А. Варыпаева, В.Н. Кудрявцева. – Л.: Химия, 1990. – 304 с.
33. Ротрелл Б. и др. Нанесение металлических покрытий на пластмассы. – Л.: Химия, 1968. – 168 с.
34. Шалкаускас М., Вашкялис А. Химическая металлизация пластмасс. – Л.: Химия, 1977. – 168 с.
35. Бахвалов Г.Т. Новая технология электроосаждения металлов. – М.: Металлургия, 1966.
36. Справочное руководство по гальванотехнике / Под ред. В.И. Лайнера. – М.: Металлургия, 1972.
37. Груев И.Д. и др. Электрохимические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры: Справочник. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
38. Никифорова-Денисова С.Н. Механическая и химическая обработка. – М.: Высш. школа, 1989. – 95 с.

39. Габович М.Д. Плазменные источники ионов. – М.: Атомиздат, 1968.
40. Гиваргизов Е.И. Искусственная эпитаксия. – М.: Наука, 1988. – 186 с.
41. Зорин Е.И. и др. Ионное легирование полупроводников. – М.: Энергия, 1975.
42. Технология ионного легирования: Пер. с япон. / Под ред. С. Намбы. – М.: Сов. Радио, 1974. – 160 с.
43. Симонов В.В. и др. Оборудование ионной имплантации. – М.: Радио и связь, 1988. – 184 с.
44. Аваев Н.А. и др. Основы микроэлектроники. – М.: Радио и связь, 1991.
45. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. – М.: Радио и связь, 1989. – 400 с.
46. Мартынов В.В., Базарова Т.Е. Литографические процессы. – М.: Высш. школа, 1980. – 128 с.
47. Электронно-лучевая технология в изготовлении микроэлектронных приборов / Под ред. Дж.Брюэра. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.
48. Попов В.Ф., Горин Ю.А. Процессы и установки электронно-ионной технологии. – М.: Высш. школа, 1988. – 255 с.
49. Малышева И.А. Технология производства интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1991. – 344 с.
50. Барыбин А.А., Сидоров В.Г. Физико-технологические основы электроники. – СПб.: Изд-во «Лань», 2001. – 272 с.
51. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники: В 10 кн. / И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов и др. – М.: Высш. школа, 1989. – Кн. 1: Общая технология. – 223 с.
52. Крапухин В.В., Соколов И.А. др. Физико-химические основы технологии полупроводниковых материалов. – М.: Металлургия, 1982. – 252 с.
53. Крапухин В.В., Соколов И.А., Кузнецов Г.Д. Технология материалов электронной техники. – М.: Металлургия, 1995. – 260с.
54. Аброян И.А., Андропов А.А., Титов А.И. Физические основы электронной и ионной технологии. – М.: Высш. школа, 1984. – 320 с.
55. Вавилов В.С., Кекелиндзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. – М.: Наука, 1988. – 192 с.
56. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники: В 10 кн. /А.И. Курносов. – М.: Высш. школа, 1989. – Кн. 2: Материалы. – 98 с.
57. Пресс Ф.П. Фотолитографические методы в технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Сов. радио, 1978. – 96 с.
58. Мазель Е.З., Пресс Ф.П. Планарная технология кремниевых приборов. – М.: Энергия, 1974.

59. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микроэлектроники: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 496 с.
60. Елифанов Г.И., Мома Ю.А. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ЭВА. – М.: Сов радио, 1979.
61. Технология СБИС: В 2-х кн. Пер. с англ. / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – Кн. 1. – 404 с.; Кн. 2. – 453 с.
62. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники: В 10 кн. / С.Н. Никифорова-Денисова. – М.: Высш. школа, 1989. – Кн.4: Механическая и химическая обработка. – 95 с.
63. Флеров В.Н. Химическая технология в производстве радиоэлектронных деталей. – М.: Радио и связь, 1988. – 104 с.
64. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы: материалы, приборы, изготовление: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985, – 501 с.
65. Таруи Я. Основы технологии СБИС: Пер. с япон. – М.: Радио и связь, 1985. – 480 с.
66. Валиев К.А., Раков А.В. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике. – М.: Радио и связь, 1984.
67. Чикин Е.В. Физико-химические основы технологии электронных систем – Учебное методическое пособие. – Томск. :ТУСУР, 2006. – 63 с.