

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Микро- и нанотехника»

Д. В. Балохонов

МЕТОД МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ (ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ)

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-27 01 01 «Экономика
и организация производства (по направлениям)»
по направлению 1-27 01 01-08 «Экономика
и организация производства (приборостроение)»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области экономики и организации производства*

Минск
БНТУ
2023

УДК 621.38-03+621.315.5/.6(076.5)

ББК 31.23я7

Б20

Р е ц е н з е н т ы:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники
Белорусского государственного университета *В. Б. Оджаев*;
кандидат технических наук, доцент кафедры технологий стекла
и керамики УО «Белорусский государственный
технологический университет» *Е. М. Дятлова*

Балохонов, Д. В.

Б20 Метод материального баланса в технологии полупроводников (практические задания) : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-27 01 01 «Экономика и организация производства (по направлениям)» по направлению 1-27 01 01-08 «Экономика и организация производства (приборостроение)» / Д. В. Балохонов. – Минск : БНТУ, 2023. – 52 с.
ISBN 978-985-583-901-0.

Пособие содержит теоретические сведения и инструкции, необходимые для выполнения практических работ по изучению метода материального баланса для оценки расхода материалов в полупроводниковом производстве. Приводятся основные сведения о технологических процессах полупроводниковой технологии, примеры расчетов расхода материалов для данных технологических процессов, имеются варианты условий для самостоятельного решения.

Предназначено для студентов направления специальности 1-27 01 01-08 «Экономика и организация производства (приборостроение)», изучающих дисциплину «Технологии электронного приборостроения» и выполняющих разработку инженерно-технологического раздела при дипломном проектировании, может применяться для обучения студентов других специальностей, имеющих схожие дисциплины.

УДК 621.38-03+621.315.5/.6(076.5)

ББК 31.23я7

ISBN 978-985-583-901-0

© Балохонов Д. В., 2023

© Белорусский национальный
технический университет, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Практическое задание № 1. Основы метода материального баланса.....	5
Практическое задание № 2. Технологический процесс разделения монокристалла на подложки	14
Практическое задание № 3. Технологический процесс окисления кремния	22
Практическое задание № 4. Технологический процесс фотолитографии.....	29
Практическое задание № 5. Технологический процесс эпитаксии.....	38
Практическое задание № 6. Технологический процесс травления	46
Список использованных источников	52

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электроника и ее производные технологии являются одними из главных в мировой промышленности. Существующие и перспективные изделия электроники в основном базируются на известных достаточно давно базовых технологических процессах, таких как окисление, травление, фотолитография и др.

Несмотря на то, что полный цикл проектирования технологических процессов в полупроводниковой промышленности является задачей инженеров-технологов, инженеры-экономисты и инженеры остальных специальностей, работающие в той же отрасли, должны понимать основные технологические процессы во избежание постановки невыполнимых задач и для экономии времени на оценочные расчеты (например, расчет принципиальной выполнимости программы выпуска изделий имеющимися силами и ресурсами).

Целью практических заданий по дисциплине «Технология электронного приборостроения» является дать студентам теоретические знания об основных технологических процессах полупроводниковой промышленности и практические навыки, необходимые для выполнения оценочных расчетов этих техпроцессов как при дипломном проектировании, так и в профессиональной деятельности.

В результате выполнения практических заданий по дисциплине «Технология электронного приборостроения» студент должен знать основные положения и принцип работы по методу материального баланса, уметь применять этот метод при оценочных расчетах базовых технологических процессов полупроводниковой промышленности, владеть основами использования метода материального баланса для расчета любых технологических процессов.

Пособие «Метод материального баланса в технологии полупроводников» предназначено для студентов направления специальности 1-27 01 01-08 «Экономика и организация производства (приборостроение)», а также для студентов других специальностей, в учебном плане которых имеется дисциплина «Технология электронного приборостроения».

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ № 1 ОСНОВЫ МЕТОДА МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА

Цель работы: овладеть основами метода материального баланса для оценки ресурсов при проектировании и выполнении технологических процессов.

Теоретические сведения

В пределах всего пособия приняты следующие основные обозначения:

Технологический процесс (ТП) – часть производственного процесса, который представляет собой комплекс действий исполнителей и оборудования, непосредственно направленных на преобразования материалов и комплектующих изделий в готовое изделие (ГОСТ 3.1109-82). Если качество ресурсов для ТП соответствует заданным требованиям, а ТП выполняется без ошибок, качество полученных по ТП изделий *гарантированно* является заданным. ТП состоит из стадий.

Ресурс ТП – любой предмет, вещество, форма энергии или время, которые требуются для успешного завершения стадии ТП. Ресурсы могут быть непрерывными (допускают деление на сколь угодно малые или большие доли) или штучными (дискретными), которые не могут быть разделены и всегда должны быть употреблены целиком.

Стадия ТП – завершенная часть ТП, результатом выполнения которой является заготовка заданного качества. Заготовка может быть ресурсом для других стадий или других ТП.

Программа выпуска изделий (программа) – количество определенных к выпуску изделий. Если ТП организован правильно, то программа всегда выполняется, иногда с небольшим (до 5 %) запасом.

Расход ресурса – количество ресурса, потребное для успешного выпуска одной единицы результата работы стадии ТП. У штучных ресурсов расход выражен всегда целым числом. Для оценочного расчета расходы ресурсов по стадиям назначают исходя из предыдущего опыта. Точные величины расходов ресурсов по стадиям определяют после первого запуска реального ТП или с помощью САПР для моделирования ТП.

Потери ресурса – количество ресурса (в долях единицы), которое по определенным причинам теряется на стадии ТП. Для оценочного расчета потери ресурсов по стадиям назначают исходя из предыдущего опыта. Точные величины потерь ресурсов по стадиям определяют после первого запуска реального ТП.

Выход годных – отношение выпущенных годных изделий ко всему количеству запланированных к выпуску изделий. Чем ближе выход годных к единице, тем лучше организован ТП.

Метод материального баланса – метод оценки количества ресурсов, необходимых для выпуска заданной программы по известному ТП, отличающийся тем, что при расчете количества ресурсов на каждой стадии учитываются не только ресурсы, необходимые для выпуска программы, но и ресурсы, потерянные на каждой стадии.

Метод материального баланса **позволяет**:

1. Оценить количество ресурсов, зная, сколько изделий нужно выпустить, их технологию, приблизительные расходы и потери ресурсов на стадиях техпроцесса.

2. Оценить влияние на требуемое количество ресурсов различных факторов, например, изменений в программе выпуска или потерь ресурсов на стадиях.

3. Построить математическую модель ТП, которая при постоянном использовании и уточнении позволит получать текущие данные ТП и контролировать его текущие затраты, а также модифицировать техпроцесс при изменении программы выпуска изделий.

4. Подобрать оборудование для ТП по производительности и надежности.

Метод материального баланса **не позволяет**:

1. Получить точные данные о затраченных ресурсах до запуска реального ТП. Это выполняется с помощью САПР ТП, которые требуют больших вычислительных мощностей и расходов на содержание.

2. Точно определить потери и расходы ресурсов на стадиях техпроцесса до запуска реального техпроцесса. Это практически невозможно сделать, так как на совокупные расходы и потери влияет много факторов, среди которых текущее качество оборудования, погодные условия, человеческий фактор, состояние зданий цехов и т. п.

3. Управлять ТП в режиме реального времени. Для этого нужна обратная связь, которую позволяют осуществить автоматические системы управления ТП (АСУ ТП).

Для оценки количества ресурсов, которые понадобятся для выпуска программы по заданному ТП, необходимы следующие данные:

1. Программа выпуска изделий.
2. Перечень стадий ТП.
3. Перечень ресурсов на каждой стадии ТП.
4. Расходы ресурсов и потери ресурсов на каждой стадии ТП.

Главная формула метода материального баланса имеет вид:

$$X_i = X_{i+1} \cdot R_i \cdot (1 + P_i),$$

где X_i – количество продукта на стадии i ;

X_{i+1} – количество продукта на стадии $i + 1$ (следует за стадией i);

R_i – расход продукта на стадии i из таблицы расходов;

P_i – потери продукта на стадии i из таблицы потерь.

Начать расчет следует с последней стадии, при этом в качестве X_{i+1} будет выступать программа выпуска продукта. Передвигаясь от последней стадии к первой (для примера расчета, приведенного далее, i принимает значения последовательно 3, 2, 1), получить количество продукта, которое должно поступить на каждую стадию процесса для реализации программы выпуска.

Результаты расчета для всех стадий внести в главную таблицу в соответствующие графы (заполнить первую строчку главной таблицы).

В первую очередь необходимо рассчитать основные ресурсы, то есть ресурсы, являющиеся результатом стадий, далее по их количеству рассчитать вспомогательные ресурсы.

Пример решения задачи

Для расчета упрощенного ТП сборки микросхем имеются следующие данные:

1. Программа выпуска микросхем – 1000 шт.
2. Стадии ТП: создание кристалла, сборка микросхемы, контроль качества.

3. Ресурсы, их расходы и потери на каждой стадии.

Создание кристалла: для 1 кристалла нужно 0,110 кг кремния, потери кремния 0,091.

Сборка микросхемы: для 1 микросхемы нужна 1 выводная рамка, 1 кристалл, 1 корпус и 0,041 кг алюминия. Потери составят: выводная рамка 0,056, кристалл 0,043, корпус 0,040, алюминий 0,056.

Контроль качества: контролируется 1 микросхема, потери микросхем 0,016.

Чтобы упростить вычисления по методу материального баланса, входные данные оформляются в виде трех таблиц, расположенных одна под другой, как это показано в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Организация входных данных для расчета задачи

Главная таблица, стадии	Создание кристалла	Сборка микросхемы	Контроль качества
Ресурсы			
Кремний, кг	0,000	0,000	0,000
Выводная рамка, шт	0,000	0,000	0,000
Кристалл, шт	0,000	0,000	0,000
Алюминий, кг	0,000	0,000	0,000
Корпус микросхемы, шт	0,000	0,000	0,000
Микросхема, шт	0,000	0,000	0,000
Таблица расходов, стадии	Создание кристалла	Сборка микросхемы	Контроль качества
Ресурсы			
Кремний, кг	0,110	0,000	0,000
Выводная рамка, шт	0,000	1,000	0,000
Кристалл, шт	0,000	1,000	0,000
Алюминий, кг	0,000	0,041	0,000
Корпус микросхемы, шт	0,000	1,000	0,000
Микросхема, шт	0,000	0,000	1,000
Таблица потерь, стадии	Создание кристалла	Сборка микросхемы	Контроль качества
Ресурсы			
Кремний	0,091	0,000	0,000
Выводная рамка	0,000	0,056	0,000
Кристалл	0,000	0,043	0,000
Алюминий	0,000	0,056	0,000
Корпус микросхемы	0,000	0,040	0,000
Микросхема	0,000	0,000	0,016

Главная таблица содержит оценочный расчет ресурсов для ТП, до начала расчета во всех графах стоят нули.

Таблица расходов содержит расходы ресурсов. Если на стадии ресурс не расходуется, в его ячейке необходимо поставить 0.

Таблица потерь содержит потери ресурсов на стадиях. Если ресурс на стадии не теряется, в его ячейке следует поставить 0.

По завершении расчета главная таблица содержит нули в тех же ячейках, что и таблица расходов.

При расчете в главной таблице непрерывные ресурсы необходимо округлить до трех знаков после запятой по правилам математики. Штучные ресурсы округлить до ближайшего целого вверх, даже если дробная часть совсем немного отличается от нуля.

Расчет стадии «Контроль качества».

Главным ресурсом стадии являются микросхемы.

Вспомогательных ресурсов на стадии нет.

Количество микросхем на этой стадии определяется в виде:

$$\begin{aligned} X_{MC3} &= X_{MC\text{Программа}} \cdot R_{MC3} \cdot (1 + P_{MC3}) = \\ &= 1000 \cdot 1 \cdot (1 + 0,016) = 1016 \text{ шт.} \end{aligned}$$

Остальные ресурсы на стадии не расходуются.

Расчет стадии «Сборка микросхемы».

Главным ресурсом стадии являются кристаллы, так как без них микросхема нефункциональна.

Вспомогательными ресурсами на стадии являются корпуса, выводные рамки и алюминий.

Количество кристаллов на этой стадии определяется в виде:

$$\begin{aligned} X_{KP2} &= X_{MC3} \cdot R_{KP2} \cdot (1 + P_{KP2}) = \\ &= 1016 \cdot 1 \cdot (1 + 0,043) = 1059,688 \approx 1060 \text{ шт.} \end{aligned}$$

Количество корпусов определяется в виде:

$$\begin{aligned} X_{KO2} &= X_{KP2} \cdot R_{KO2} \cdot (1 + P_{KO2}) = \\ &= 1060 \cdot 1 \cdot (1 + 0,040) = 1102,4 \approx 1103 \text{ шт.} \end{aligned}$$

Количество выводных рамок определится в виде:

$$\begin{aligned} X_{BP2} &= X_{KP2} \cdot R_{BP2} \cdot (1 + P_{BP2}) = \\ &= 1060 \cdot 1 \cdot (1 + 0,056) = 1119,36 \approx 1120 \text{ шт.} \end{aligned}$$

Количество алюминия определяется в виде:

$$\begin{aligned} X_{AL2} &= X_{KP2} \cdot R_{AL2} \cdot (1 + P_{AL2}) = \\ &= 1060 \cdot 0,041 \cdot (1 + 0,056) = 45,894 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Остальные ресурсы на стадии не расходуются.

Расчет стадии «Создание кристалла».

Главным ресурсом стадии является кремний, так как из него изготавливается кристалл микросхемы.

Вспомогательных ресурсов на стадии нет.

Количество кремния на этой стадии определяется в виде:

$$\begin{aligned} X_{K1} &= X_{KP2} \cdot R_{K1} \cdot (1 + P_{K1}) = \\ &= 1060 \cdot 0,110 \cdot (1 + 0,091) = 127,211 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Остальные ресурсы на стадии не расходуются.

Результаты расчетов необходимо внести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Законченный расчет ТП

Главная таблица, стадии	Создание кристалла	Сборка микросхемы	Контроль качества
Ресурсы			
Кремний, кг	127,211	0,000	0,000
Выводная рамка, шт	0,000	1120	0,000
Кристалл, шт	0,000	1060	0,000
Алюминий, кг	0,000	45,894	0,000
Корпус микросхемы, шт	0,000	1103	0,000
Микросхема, шт	0,000	0,000	1016

Таблица расходов, стадии	Создание кристалла	Сборка микросхемы	Контроль качества
Ресурсы			
Кремний, кг	0,110	0,000	0,000
Выводная рамка, шт	0,000	1,000	0,000
Кристалл, шт	0,000	1,000	0,000
Алюминий, кг	0,000	0,041	0,000
Корпус микросхемы, шт	0,000	1,000	0,000
Микросхема, шт	0,000	0,000	1,000
Таблица потерь, стадии	Создание кристалла	Сборка микросхемы	Контроль качества
Ресурсы			
Кремний	0,091	0,000	0,000
Выводная рамка	0,000	0,056	0,000
Кристалл	0,000	0,043	0,000
Алюминий	0,000	0,056	0,000
Корпус микросхемы	0,000	0,040	0,000
Микросхема	0,000	0,000	0,016

Итого для выполнения заданного ТП необходимо: 127,211 кг кремния, 1120 выводных рамок, 1103 корпуса микросхемы, 45, 894 кг алюминия. Остальные ресурсы получают при выполнении стадий ТП.

Варианты заданий для самостоятельного решения

Варианты таблицы расходов (табл. 1.3, табл. 1.4).

Таблица 1.3

Таблица расходов, вариант 1

Стадии	Создание кристалла	Сборка микросхемы	Контроль качества
Ресурсы			
Кремний, кг	0,010	0,000	0,000
Выводная рамка, шт	0,000	1,000	0,000
Кристалл, шт	0,000	1,000	0,000
Алюминий, кг	0,000	0,033	0,000
Корпус микросхемы, шт	0,000	1,000	0,000
Микросхема, шт	0,000	0,000	1,000

Таблица 1.4

Таблица расходов, вариант 2

Стадии Ресурсы	Создание кристалла	Сборка микросхемы	Контроль качества
Кремний, кг	0,085	0,000	0,000
Выводная рамка, шт	0,000	1,000	0,000
Кристалл, шт	0,000	1,000	0,000
Алюминий, кг	0,000	0,036	0,000
Корпус микросхемы, шт	0,000	1,000	0,000
Микросхема, шт	0,000	0,000	1,000

Варианты таблицы потерь (табл. 1.5, табл. 1.6).

Таблица 1.5

Таблица потерь, вариант 1

Стадии Ресурсы	Создание кристалла	Сборка мик- росхемы	Контроль качества
Кремний	0,086	0,000	0,000
Выводная рамка	0,000	0,042	0,000
Кристалл	0,000	0,064	0,000
Алюминий	0,000	0,034	0,000
Корпус микросхемы	0,000	0,066	0,000
Микросхема	0,000	0,000	0,058

Таблица 1.6

Таблица потерь, вариант 2

Стадии Ресурсы	Создание кристалла	Сборка микросхемы	Контроль качества
Кремний	0,067	0,000	0,000
Выводная рамка	0,000	0,051	0,000
Кристалл	0,000	0,068	0,000
Алюминий	0,000	0,057	0,000
Корпус микросхемы	0,000	0,024	0,000
Микросхема	0,000	0,000	0,041

Варианты для расчета представлены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Варианты для расчета

Вариант	Вариант таблицы расходов	Вариант таблицы потерь	Программа выпуска микросхем, шт
1	1	1	1120
2	1	2	2000
3	2	1	2230
4	2	2	2400
5	1	1	5000
6	1	2	4300
7	2	1	4000
8	2	2	3500
9	1	2	3000
10	2	1	2150

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ № 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛА НА ПОДЛОЖКИ

Цель работы: овладеть основами метода материального баланса для оценки ресурсов при проектировании и выполнении технологического процесса разделения монокристалла на подложки.

Теоретические сведения

Для изготовления интегральных микросхем и других изделий микроэлектроники из монокристаллов получают пластины, называемые подложками. Подложка представляет собой пластину монокристалла в виде окружности, имеющей один или несколько спилов, показывающих кристаллическую ориентацию подложки. Существуют следующие стандартные размеры полупроводниковых подложек:

- 1 дюйм (25 мм);
- 2 дюйма (51 мм), толщина 275 мкм;
- 3 дюйма (76 мм), толщина 375 мкм;
- 4 дюйма (100 мм), толщина 525 мкм;
- 5 дюймов (130 мм или 125 мм), толщина 625 мкм;
- 150 мм (обычно наз. 6 дюймов), толщина 625 мкм;
- 200 мм (обычно наз. 8 дюймов), толщина 725 мкм;
- 300 мм (обычно наз. 12 дюймов), толщина 775 мкм;
- 450 мм (обычно наз. 18 дюймов), толщина 925 мкм.

Современные производители стараются применять подложки как можно большего диаметра, так как это позволяет минимизировать потери и эффективно использовать материал подложки. Переход в 2000 г от подложек диаметром 200 мм к 300 мм уменьшил стоимость обработки одного кристалла интегральной схемы на 30–40 % ценой сложности производства и технологических трудностей: были введены полностью автоматические заводы, в отличие от почти ручного производства подложек диаметром 200 мм.

Переход на подложки диаметром 450 мм проходит медленно и неравномерно. Несмотря на выгоду по цене изделия, инвестиции будут окупаться слишком долго, а подложки большого диаметра

потребуется еще более существенной модификации производства. Например, подложки большого диаметра должны быть толще из-за значительного прогиба под собственным весом, а вес монокристаллов для их производства слишком велик (в зависимости от длины 1000 кг и более). Затраты времени на производство таких монокристаллов в 2–4 раза больше, чем для монокристаллов диаметром 300 мм.

Основными стадиями технологического процесса производства подложек являются следующие:

1. *Калибровка монокристалла* – придание монокристаллу постоянного диаметра путем токарно-шлифовальной обработки, так как после выращивания он имеет волнистую поверхность, а также удаление дефектных зон (конусы и шейка). Брак на стадии может быть связан с дефектами инструмента, что вызывает перерасход энергии на обработку, потери времени и разрушение монокристалла.

2. *Ориентация кристалла* – определение кристаллографической плоскости. Проводится оптическим или рентгеновским методами. Брак на стадии может быть связан с нарушением процесса роста монокристалла и неправильной ориентацией затравки. В последнем случае весь монокристалл целиком отправляют в переработку.

3. *Резка монокристалла на пластины*. Может проводиться алмазным диском с внутренней режущей поверхностью, проволокой или металлическими полотнами. Брак на стадии связан в основном с дефектами режущего инструмента. В зависимости от метода резки, дефекты инструмента приводят к искажению геометрических параметров пластин (алмазный диск и металлические полотна) или к разрушению отрезаемой пластины, а иногда и остатка монокристалла (резка проволокой). Потери материала связаны с конечной (хотя и малой) толщиной реза.

4. *Шлифовка и полировка пластин*. При резке на поверхности пластин обязательно образуется нарушенный слой общей толщиной до 170 мкм, который не позволяет использовать пластины сразу после резки. Для его удаления пластины сначала шлифуют, потом полируют, используя корунд, алмаз и другие абразивы. Размер зерна абразива постепенно уменьшают. Одновременно корректируется неплоскостность пластин. Иногда проводится химическая полировка пластин для удаления разрушенного слоя, оставшегося от механической обработки. Процесс химической полировки напоминает травление, но концентрация травителя значительно меньше. В дополнение

к действию травителя применяется механическое воздействие, что способствует равномерности процесса за счет перемешивания травителя. После полировки пластина превращается в подложку, на которой можно создавать микросхему. Брак на стадии связан в основном с неправильной настройкой оборудования и выражается в искажении геометрических параметров подложек.

5. *Отмывка и сушка подложек.* Происходит в два этапа: обезжиривание поверхности подложек органическими растворителями (например, толуол или этиловый спирт), последующая отмывка подложек деионизованной (сверхчистой) водой. Обе стадии протекают быстрее и дают лучшие результаты при проведении их в ультразвуковых ваннах. Брак на стадии обусловлен в основном некачественной отмывкой из-за загрязнения промывных сред или неправильной эксплуатации оборудования.

6. *Контроль качества подложек.* Контролируются геометрические параметры, а также электрическое сопротивление и тип проводимости с помощью эффекта Холла. Брак на данной стадии практически не наблюдается, так как современные установки контролируют качество пластин без участия человека.

7. *Упаковка подложек.* Если планируется немедленное продолжение технологического процесса, подложки упаковывают в SMIF-контейнер, если планируется хранение на срок до 72 часов – то запаивают в герметическую упаковку из полиэтилена. Если упакованная подложка не перерабатывается в срок до 72 часов, ее требуется заново отмыть и проконтролировать ее качество. Брак и потери материала на стадии в основном обусловлены нарушением сроков хранения и загрязнением упаковочного материала.

Пример решения задачи

Номера стадий ТП соответствуют теоретической части занятия.

Входные данные для расчета:

Программа выпуска подложек: 2000 шт.

Длина монокристалла кремния: 1,25 м.

Диаметр подложек: 300 мм.

Толщина подложек: 775 мкм.

Толщина реза: 0,4 мм.

Расходы и потери по стадиям и ресурсам представлены в табл. 2.1 и табл. 2.2 соответственно.

Таблица 2.1

Таблица расходов

Ресурсы	1	2	3	4	5	6	7
Монокристалл кремния, шт	1	1	*	0	0	0	0
Пластины, шт	0	0	0	1	0	0	0
Подложки, шт	0	0	0	0	1	1	1
Абразив, л	0	0	200	15	0	0	0
Спирт этиловый, л	0	0	0	0	10	0	0
Вода сверхчистая, л	0	0	0	0	20	0	0
Пленка полиэтиленовая, м ²	0	0	0	0	0	0	0,245
Энергия, Вт	1500	100	3000	2500	2000	150	1050

Таблица 2.2

Таблица потерь

Ресурсы	1	2	3	4	5	6	7
Монокристалл кремния	0,01	0,01	0,005	0	0	0	0
Пластины	0	0	0	0,05	0	0	0
Подложки	0	0	0	0	0,02	0,01	0,02
Абразив	0	0	0,1	0,08	0	0	0
Спирт этиловый	0	0	0	0	0,1	0	0
Вода сверхчистая	0	0	0	0	0,1	0	0
Пленка полиэтиленовая	0	0	0	0	0	0	0,09
Энергия	0,15	0,05	0,13	0,07	0,12	0,05	0,06

Необходимо оценить расход всех ресурсов для выпуска программы.

Начинать расчет следует с заполнения расхода монокристаллов (отмечено * в табл. 2.1). По определению это количество монокристаллов для выпуска одной пластины. Эта величина обратна количеству пластин, получаемому из одного монокристалла.

Для расчета количества пластин, получаемого из одного монокристалла, требуется учесть, что при получении каждой пластины толщиной 775 мкм в результате резания еще 0,4 мм кремния удаляется, так что общая толщина получается равной:

$$0,4 \cdot 10^{-3} + 775 \cdot 10^{-6} = 1,18 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

а количество пластин в одном монокристалле длиной 1,25 м получается равным:

$$1,25 / 1,18 \cdot 10^{-3} = 1063 \text{ шт.}$$

Таким образом, расход монокристаллов для получения одной пластины будет равен:

$$1 / 1063 = 9,4 \cdot 10^{-4} \text{ шт.}$$

Специально для целей расчета расход по штучному ресурсу меньше единицы, так как из одного монокристалла в результате резки получается множество пластин.

Подставив полученный расход в таблицу расходов и произведя действия по расчету остальных ресурсов по аналогии с Практическим заданием № 1, можно получить следующие результаты расчета в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Главная таблица

Ресурсы	1	2	3	4	5	6	7
Монокристалл кремния, шт	1,063	1,053	1,042	0,000	0,000	0,000	0,000
Пластины, шт	0,000	0,000	0,000	1103,344	0,000	0,000	0,000
Подложки, шт	0,000	0,000	0,000	0,000	1050,804	1030,200	1020,000
Абразив, л	18109,742	0,000	235,566	17874,176	0,000	0,000	0,000
Спирт этиловый, л	0,000	0,000	0,000	0,000	10718,201	0,000	0,000
Вода сверхчистая, л	0,000	0,000	0,000	0,000	23117,688	0,000	0,000
Пленка полиэтиленовая, м ²	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	272,391
Энергия, Вт	6608241,388	1834,158	3533,496	2951445,735	2353800,960	162256,500	1135260,000

Варианты заданий для самостоятельного решения

Варианты таблиц расходов (табл. 2.4, табл. 2.5).

Таблица 2.4

Таблица расходов, вариант 1

Ресурсы	1	2	3	4	5	6	7
Монокристалл кремния, шт	1	1	*	0	0	0	0
Пластины, шт	0	0	0	1	0	0	0
Подложки, шт	0	0	0	0	1	1	1
Абразив, л	0	0	300	20	0	0	0
Спирт этиловый, л	0	0	0	0	15	0	0
Вода сверхчистая, л	0	0	0	0	30	0	0
Пленка полиэтиленовая, м ²	0	0	0	0	0	0	0,3
Энергия, Вт	1600	130	2500	3000	2500	100	900

Таблица 2.5

Таблица расходов, вариант 2

Ресурсы	1	2	3	4	5	6	7
Монокристалл кремния, шт	1	1	*	0	0	0	0
Пластины, шт	0	0	0	1	0	0	0
Подложки, шт	0	0	0	0	1	1	1
Абразив, л	0	0	300	20	0	0	0
Спирт этиловый, л	0	0	0	0	15	0	0
Вода сверхчистая, л	0	0	0	0	30	0	0
Пленка полиэтиленовая, м ²	0	0	0	0	0	0	0,3
Энергия, Вт	1700	90	3500	2500	3000	110	1100

Варианты таблицы потерь (табл. 2.6, табл. 2.7).

Таблица 2.6

Таблица потерь, вариант 1

Ресурсы	1	2	3	4	5	6	7
Монокристалл кремния	0,02	0,015	0,01	0	0	0	0
Пластины	0	0	0	0,06	0	0	0
Подложки	0	0	0	0	0,01	0,02	0,03
Абразив	0	0	0,15	0,1	0	0	0

Окончание табл. 2.6

Ресурсы	1	2	3	4	5	6	7
Спирт этиловый	0	0	0	0	0,11	0	0
Вода сверхчистая	0	0	0	0	0,11	0	0
Пленка полиэтиленовая	0	0	0	0	0	0	0,1
Энергия	0,18	0,07	0,11	0,09	0,11	0,03	0,04

Таблица 2.7

Таблица потерь, вариант 2

Ресурсы	1	2	3	4	5	6	7
Монокристалл кремния	0,03	0,02	0,015	0	0	0	0
Пластины	0	0	0	0,08	0	0	0
Подложки	0	0	0	0	0,012	0,03	0,01
Абразив	0	0	0,11	0,16	0	0	0
Спирт этиловый	0	0	0	0	0,12	0	0
Вода сверхчистая	0	0	0	0	0,13	0	0
Пленка полиэтиленовая	0	0	0	0	0	0	0,1
Энергия	0,2	0,1	0,15	0,1	0,12	0,05	0,05

Варианты условий для расчета представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Условия для расчета

Вариант	Вариант таблицы расходов	Вариант таблицы потерь	Программа выпуска подложек, шт	Толщина пластины, мкм	Длина монокристалла, м
1	1	1	1000	775	1
2	1	2	3000	925	1,1
3	2	1	5000	775	1,2
4	2	2	2600	925	1,3
5	1	1	2000	775	1,4
6	1	2	7500	925	1,5
7	2	1	2000	775	1,6
8	2	2	1700	925	1,7
9	1	2	6000	775	1,8
10	2	1	2200	925	1,0

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ № 3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ОКИСЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

Цель работы: овладеть основами метода материального баланса для оценки ресурсов при проектировании и выполнении технологического процесса окисления кремния.

Теоретические сведения

Окисление – получение слоя оксида кремния на поверхности подложки. Оксид кремния – самый популярный диэлектрик: он легко образуется из материала подложки, имеет высокую диэлектрическую проницаемость и электрическую прочность (не пропускает ток даже при высоком, сверх 1000 В, электрическом напряжении), прочен и устойчив к высокой температуре.

Применения оксида кремния разнообразны:

- защита (пассивирующий слой) – слой оксида кремния защищает поверхность подложки от различных воздействий окружающей среды: влажность, грязь, пыль. Не защищает от статического электричества;

- изоляция – слой оксида кремния не пропускает электрический ток, что используется в большинстве интегральных схем и полевых транзисторов;

- основа для слоев гибридных интегральных схем;

- технологическое применение – слой оксида кремния может применяться для маскирования на фотолитографии, ионного легирования и т. п.

Окисление проводится следующими методами:

Термическое – оксид кремния образуется при повышенной (800–1200 °С) температуре из материала подложки и кислорода атмосферы или из кислорода, подаваемого в реактор специально. Сухое термическое окисление требует большей температуры (1000–1200 °С) и большего времени, но дает качественную пленку без дефектов, включений и пор. Мокрое окисление в кислороде и парах воды требует меньшей температуры (700–800 °С), меньшего времени (за счет применения воды как катализатора и восстановления водорода), но в этом случае пленка оксида содержит включения

воды, поры и ионы щелочных металлов. Оксидная пленка с толщиной d по плотности меньше кремния, так что она выступает за пределы подложки на $0,54 d$, а остальные $0,44 d$ растут внутрь пластины.

Химическое – используется химическое соединение, распадающееся с образованием оксида кремния или образующее его на поверхности подложки за счет реакции с другими компонентами. Чаще всего применяют термическое разложение алкосилана $Si(OC_2H_5)_4$, при котором образуются вода и этилен, или окисление силана SiH_4 до воды и оксида кремния. Применяется для получения толстых пленок оксида при пониженных температурах (пиролиз алкосилана – $700\text{ }^\circ\text{C}$, окисление силана – $300\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$). Допускает легирование оксида кремния или применение после металлизации.

Плазменное – пластину помещают в плазму из соединений кремния, которые в плазме образуют свободные радикалы, и под воздействием высокочастотного разряда позволяют быстро (до 10 мкм/ч) и при низкой температуре ($200\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$) получить пленку оксида кремния. Применяется для получения защитного оксида, изоляции металлизации и др. Дополнительное преимущество – плазмой можно протравить поверхность перед окислением, чтобы очистить ее. Для процесса нужен вакуум (хотя бы $66\text{--}660\text{ Па}$ или лучше) и высокочастотный разряд с частотой $13\text{--}40\text{ МГц}$.

Молекулярная эпитаксия кислорода – атомы кислорода ускоряются электрическим полем в вакууме и попадают на поверхность подложки, встраиваются в нее и образуют пленку оксида. Можно создавать пленки как на поверхности, так и внутри подложки, толщина слоев может быть от одного атома. Недостаток – радиационные дефекты в подложке. Для процесса нужен высокий вакуум или лучше. Нагрев для процесса не используется, он нужен только для отжига радиационных дефектов.

Сухое термическое окисление имеет самый простой технологический процесс, в который входят следующие основные стадии:

1. *Входной контроль качества* – у подложек контролируют качество поверхности и ее геометрические параметры. Выборочно контролируют наличие на поверхности загрязнений и плотность дислокаций. Потери подложек в основном малы и обусловлены сбоями в работе оборудования и человеческим фактором.

2. *Сухое термическое окисление* – подложку помещают в реактор, разогревают до номинальной температуры и подают в реактор кислород. Он соединяется с кремнием подложки, и получается пленка оксида кремния. Этот процесс описывается параметрической моделью Дила-Гроува:

$$d^2 + K_1d = K_2t,$$

где d – толщина пленки;

t – время процесса;

K_1 – кинетическая константа;

K_2 – диффузионная константа.

Из уравнения видно, что при малой толщине пленки скорость ее роста почти постоянна и зависит только от скорости химической реакции между кислородом и кремнием (основной является кинетическая константа K_1). При большой толщине пленки оксида ее рост замедляется, так как кислороду приходится диффундировать через уже образовавшуюся пленку (основной является K_2 – диффузионная константа).

Брак и потери на данной стадии обусловлены в основном следующими причинами:

– неравномерность окисления (встречается на подложках большого диаметра, приводит к порам в окисле)

– перегрев и колебания температуры подложек (приводит к колебаниям толщины окисла, деформациям и излому подложек)

– некачественная отмывка перед окислением (приводит к наличию электрического заряда в окисле)

3. *Выходной контроль качества* – у всех подложек проверяют толщину и равномерность слоя оксида кремния, выборочно проверяются диэлектрические параметры. Для проверки толщины широко используется интерферометрия, что позволяет проверять толщину оксида по его цвету. Потери подложек в основном малы и обусловлены сбоями в работе оборудования и человеческим фактором.

Пример решения задачи

Номера стадий ТП соответствуют теоретической части занятия.

Входные данные для расчета: программа выпуска окисленных подложек: 1000 шт.

Диаметр подложек: 300 мм.

Толщина подложек: 775 мкм.

Толщина оксидного слоя: 0,4 мкм.

Плотность оксида кремния: 2650 кг/м³.

Молярная масса оксида кремния: 60 г/моль.

Тип окисления: сухое термическое.

Температура процесса: 1000 °С.

Молярный объем газов при 20 °С: 22,4 л/моль.

Расходы ресурсов представлены в табл. 3.1, потери ресурсов содержатся в табл. 3.2.

Таблица 3.1

Таблица расходов

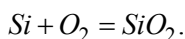
Ресурсы	1	2	3
Пластина, шт	1	1	1
Кислород, л	0	*	0
Энергия, Вт	100	5000	150

Таблица 3.2

Таблица потерь

Ресурсы	1	2	3
Пластина	0,01	0,15	0,01
Кислород	0	0,18	0
Энергия	0,02	0,3	0,01

Чтобы начать расчет, необходимо определить, сколько кислорода при температуре 1000 °С расходуется на одну подложку (заполняется ячейка * в табл. 3.1). Для этого следует записать реакцию окисления кремния:



Из этой реакции видно, что на создание 1 моль оксида кремния расходуется 1 моль кислорода.

На одной подложке получается пленка оксида толщиной 0,4 мкм, и ее объем равен:

$$V_{SiO_2} = \frac{\pi \cdot 0,3^2}{4} \cdot 0,4 \cdot 10^{-6} = 2,83 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3.$$

Масса этой пленки равна:

$$m_{SiO_2} = 2,83 \cdot 10^{-7} \cdot 2650 = 7,49 \cdot 10^{-4} \text{ кг}.$$

Химическое количество оксида кремния в этой пленке равно:

$$n_{SiO_2} = \frac{7,49 \cdot 10^{-4}}{60 \cdot 10^{-3}} = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ моль}.$$

Таким образом, химическое количество кислорода для обработки одной подложки будет также равно $1,25 \cdot 10^{-2}$ моль.

Далее необходимо рассчитать объем кислорода при 1000 °С (или 1273 К). Один моль кислорода занимает 22,4 л при 25 °С (или 298 К). При этом процесс окисления можно считать изобарическим, так как кислород прокачивается через реактор, и давление остается постоянным. Поэтому можно записать:

$$V_{O_2,1273K} = \frac{V_{O_2,298K} \cdot 1273}{298} = \frac{22,4 \cdot 1273}{298} = 97,3 \text{ л}.$$

Таким образом, необходимый для окисления одной подложки объем кислорода при 1000 °С равен:

$$V = 97,3 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} = 1,21 \text{ л}.$$

Подставив этот объем на место * в табл. 3.1, рассчитывают количество подложек, кислорода и энергии для выпуска программы. Расчет ведется по аналогии с практическим заданием № 1.

Результат расчета представлен в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Главная таблица

Ресурсы	1	2	3
Пластина, шт	1174	1162	1010
Кислород, л	0	1664,856	0
Энергия, Вт	119657,73	7549750	153015

Варианты заданий для самостоятельного решения

Варианты таблицы расходов (табл. 3.4, табл. 3.5).

Таблица 3.4

Таблица расходов, вариант 1

Ресурсы	1	2	3
Пластина, шт	1	1	1
Кислород, л	0	*	0
Энергия, Вт	150	3000	10

Таблица 3.5

Таблица расходов, вариант 2

Ресурсы	1	2	3
Пластина, шт	1	1	1
Кислород, л	0	*	0
Энергия, Вт	120	4000	20

Варианты таблицы потерь (табл. 3.6, табл. 3.7).

Таблица 3.6

Таблица потерь, вариант 1

Ресурсы	1	2	3
Пластина	0,02	0,2	0,03
Кислород	0	0,15	0
Энергия	0,01	0,4	0,02

Таблица 3.7

Таблица потерь, вариант 2

Ресурсы	1	2	3
Пластина	0,01	0,1	0,01
Кислород	0	0,2	0
Энергия	0,02	0,2	0,01

Варианты условий для расчета представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Условия для расчета

Вариант	Вариант таблицы расходов	Вариант таблицы потерь	Программа выпуска подложек, шт	Толщина пленки, мкм	Диаметр подложки, м
1	1	1	1000	10	0,2
2	1	2	3000	12	0,3
3	2	1	5000	16	0,45
4	2	2	2600	18	0,2
5	1	1	2000	20	0,3
6	1	2	7500	10	0,45
7	2	1	2000	12	0,2
8	2	2	1700	16	0,3
9	1	2	6000	18	0,45
10	2	1	2200	20	0,3

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ № 4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ФОТОЛИТОГРАФИИ

Цель работы: овладеть основами метода материального баланса для оценки ресурсов при проектировании и выполнении технологического процесса фотолитографии.

Теоретические сведения

Фотолитография (ФЛ) – процесс образования на поверхности подложек с помощью светочувствительных материалов (фоторезистов) локальных защитных участков пленки (микрорельеф), рельеф которых повторяет топологию прибора или схемы, и последующего переноса микрорельефа на подложку. ФЛ должна проводиться в чистых помещениях во избежание уменьшения выхода годных. ФЛ – определяющий процесс: от нее зависит степень миниатюризации изделий, степень интеграции.

В зависимости от способа передачи изображения, бывает контактная и бесконтактная (проекционная) ФЛ. В первом случае фотошаблон соприкасается с поверхностью фоторезиста, в последнем – нет.

В зависимости от вида излучения, переносящего изображение на поверхность подложки, бывают следующие виды ФЛ:

- оптическая ФЛ – актиничное излучение – видимый свет;
- ультрафиолетовая ФЛ – актиничное излучение – ультрафиолет, позволяет уменьшить ширину линий;
- рентгеновская ФЛ – актиничное излучение – рентгеновские лучи – еще сильнее уменьшает ширину линий, но может повредить пластину радиацией и требует фотошаблонов из благородных металлов (обычные являются прозрачными для рентгена);
- электронная ФЛ – актиничное излучение – поток электронов, для проведения нужен вакуум; возможны радиационные дефекты;
- ионная ФЛ – актиничное излучение – поток ионов, для проведения нужен вакуум; возможны радиационные дефекты.

Основными параметрами фотолитографии являются:

1. Минимальный размер элемента ИС – определяется длиной волны по дифракционным ограничениям:

$$b_{\min} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{\lambda(z + h/2)},$$

где z – зазор между фотошаблоном и пленкой резиста толщиной h (0, если контактная ФЛ).

2. Разрешающая способность – максимальное число линий (плосковых отверстий в маске), отдельно воспроизводимое в 1 мм. Разрешающая способность определяется в виде:

$$R = \frac{1000}{2b_{\min}}.$$

Технологический процесс ФЛ включает следующие основные стадии:

1. *Подготовка подложек.* Производится, чтобы обеспечить хорошую адгезию слоя фоторезиста к подложке. Подготовку поверхности кремния выполняют по следующей схеме:

- поочередная отмывка в толуоле, амилацетате, ацетоне, этиловом спирте по 5 мин, нагрев до кипения с последующей ультразвуковой очисткой в порции свежего растворителя;

- кипячение в деионизованной воде 5 мин;

- промывка в HF 5 мин;

- кипячение в деионизованной воде 5 мин.

Если подложки хранились длительное время, то их следует подвергнуть термообработке перед нанесением фоторезиста в целях гидрофобизации поверхности оксида. Минимальная температура обработки в сухом азоте 700 °С, время обработки 1 ч.

При предварительной обработке металлических слоев проводят их очистку и химическое травление. Предварительную обработку поверхности нитрида кремния производят в горячей фтористоводородной кислоте с последующей промывкой кипячением в деионизованной воде.

Брак на данной стадии в основном связан с нарушением температурного режима и времени обработки.

2. *Нанесение и сушка слоя фоторезиста.* Нанесение фоторезиста осуществляют центрифугированием, пульверизацией (для получения равномерных пленок без утолщений и на профилированные поверхности), поливом, окунанием в раствор фоторезиста, накаткой пленочного резиста (толстые пленки до 20 мкм) и т. д. Наибольшее распространение в промышленности получил способ центрифугирования.

При включении центрифуги доза фоторезиста помещается в центр пластины, пластину приводят во вращение, и фоторезист растекается по поверхности подложки под действием центробежной силы. В процессе центрифугирования на краю пластины возникает валик фоторезиста. Для изменения толщины слоя изменяют вязкость фоторезиста. Тонкая регулировка толщины достигается подбором угловой скорости вращения центрифуги ω , которая обычно находится в диапазоне 2000–10 000 об/мин. Толщина слоя зависит от угловой скорости следующим образом: $h = A \cdot \sqrt{\frac{\nu}{\omega}}$, причем A определяется опыт-

ным путем, а вязкость ν задается концентрацией фоторезиста. Для каждой концентрации фоторезиста существует критическая скорость вращения центрифуги, соответствующая равновесию центробежной и когезионной сил. При превышении этой скорости уменьшение толщины слоя фоторезиста не происходит. Типичная толщина слоя фоторезиста – от 0,4 до 3,5 мкм. Брак при нанесении фоторезиста обусловлен недостаточной чистотой фоторезиста и окружающей среды: попавшие в фоторезист пыль и пузырьки газов не обладают светочувствительностью, и приводят к появлению «иммунных к свету» участков, которые не могут переносить изображение правильно.

Сушка фоторезиста выполняется для его уплотнения, уменьшения внутренних напряжений, повышения устойчивости и адгезии к подложке. Сушка фоторезиста выполняется путем нагрева его до температуры около 100 градуса Цельсия (больше нельзя – резист разрушается). Нагрев проводится конвективным способом (термокамера с воздухом до 110 градуса на 15–30 мин, нагрев может быть неравномерным), инфракрасным излучением (подложка нагревается ИК-лучами, она сушит фоторезист, быстро (5–10 мин) и более качественно). Кроме того, можно осуществить микроволновую сушку (она занимает порядка одной секунды и требует экранирования, иначе остальные части оборудования могут быть повреждены). Скорость такой сушки может быть различной на разных участках пластины. После сушки нужно обработать пластину не позднее, чем через 10 часов.

3. *Совмещение и экспонирование* – операции, обеспечивающие перенос изображения с фотошаблона на пластину. Совмещение фотошаблона производится с точностью не менее десятых долей элемента топологии относительно среза пластины (первая ФЛ) или

по реперным меткам, представляющим собой концентрические окружности, кресты или выемки. Совмещение – процесс в основном ручной, автоматика не везде справляется. Проводится под микроскопом с увеличением хотя бы 200 крат. Потом происходит наложение фотошаблона (при контактной ФЛ) и экспонирование путем облучения актиничным излучением. Поскольку одинаково недопустимы как недодержки, так и передержки при экспонировании, оптимальная экспозиция определяется экспериментально. Брак на данной стадии обусловлен человеческим фактором или неправильно изготовленным фотошаблоном.

4. *Проявление* – операция получения рельефа в фоторезисте путем обработки его проявителем. Режим проявления зависит от дозы экспонирования. При проявлении позитивных резистов применяют щелочные растворы: 0,3–0,5 %-й раствор KOH ; 1–2 %-й раствор тринатрийфосфата Na_3PO_4 ; органические щелочи – этаноламины. В процессе проявления важно контролировать температуру и значение pH проявителя. Изменение pH всего на 0,1 вызывает отклонение в размере элементов на ~ 10 % от номинального значения, что и является основной причиной брака на данной стадии.

5. *Отмывка* – удаление экспонированных участков негативных резистов производят в органических растворителях, часто в тех же, на основе которых был составлен фоторезист. Брак появляется из-за нарушения состава промывающей среды и чистоты окружающей среды.

6. *Задубливание проявленного слоя*. Производится для удаления остатков проявителя и дополнительной тепловой полимеризации фоторезиста, улучшающей его защитные свойства в процессе травления рельефа на подложке. Задубливание можно проводить путем облучения интенсивным ультрафиолетовым светом или путем термической обработки. Чаще применяют второй метод, который можно осуществлять в одном цикле с сушкой проявленного слоя. При этом вначале производят сушку при 100–1200 а затем задубливание при 200–220 °С в течение 30–40 мин. Во избежание опливания краев фотомаски температура повышается плавно. В ходе задубливания у термопластичных резистов происходит ликвидация мелких дефектов и пор в пленке. Кислотоустойчивость резиста повышается при задубливании, сопровождающемся полной полимеризацией маски.

7. *Травление*. Рельеф на подложке травят в различных по составу травителях при различных режимах (в зависимости от типа

подложки). В общем случае при травлении через защитную маску из фоторезиста травители должны обеспечивать локальность воздействия, не вызывать газовыделения, хорошо смачивать и поверхность фоторезистивной маски и подложки. В окончательной структуре рельефа высокая разрешающая способность может быть получена только в том случае, если травитель обеспечивает минимальное отношение скорости бокового травления к скорости травления в направлении нормали к поверхности. Брак может быть связан с нарушением температурного режима травления.

8. *Отмывка и удаление фоторезиста* – завершающая операция технологического процесса фотолитографии, которая во многом определяет качество выполнения последующих циклов: диффузии, окисления, металлизации. Удаляют фоторезист деструкцией полимера путем кипячения в серной кислоте; обработкой в органических растворителях; плазмо-химическим, термическим или фототермическим методами, результатом которых является окислительная деструкция в кислороде или в кислородсодержащих газах.

Пример решения задачи

Номерами обозначены стадии ТП: 1 – входной контроль, 2 – пульверизация резиста, 3 – экспонирование и проявление, 4 – травление, 5 – удаление резиста, 6 – отмывка, 7 – выходной контроль.

Входные данные для расчета:

Вид фотолитографии – контактная ($z = 0$).

Программа выпуска обработанных подложек: 5000 шт.

Минимальный размер элемента: 0,6 мкм.

Длина волны: 400 нм.

Диаметр пластины: 0,3 м.

Плотность фоторезиста: 1300 кг/м³.

Расходы ресурсов приведены в табл. 4.1, потери ресурсов приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.1

Таблица расходов

Стадия/Ресурс	1	2	3	4	5	6	7
Пластина, шт	1	1	1	1	1	1	1

Стадия/Ресурс	1	2	3	4	5	6	7
Фоторезист, кг	0	*	0	0	0	0	0
Проявитель, л	0	0	0,9	0	0	0	0
Травитель, л	0	0	0	0,7	0	0	0
Деионизированная вода, л	0	0	0	0	0	2	0

Таблица 4.2

Таблица потерь

Стадия/Ресурс	1	2	3	4	5	6	7
Пластина, шт	0,002	0,003	0,001	0,005	0,007	0,010	0,005
Фоторезист, кг	0,000	0,050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Проявитель, л	0,000	0,000	0,030	0,000	0,000	0,000	0,000
Травитель, л	0,000	0,000	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000
Деионизированная вода, л	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	0,000

Перед началом отчета необходимо определить, сколько фоторезиста понадобится нанести для выполнения фотолитографии на одной подложке (заполнить ячейку * в табл. 4.1). Для этого определить толщину пленки фоторезиста из формулы $b_{\min} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{\lambda(z + h/2)}$:

$$h = \frac{8 \cdot b_{\min}^2}{9 \cdot \lambda} = \frac{8 \cdot (0,6 \cdot 10^{-6})^2}{9 \cdot 4 \cdot 10^{-7}} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Зная толщину, оценить объем пленки фоторезиста на одной подложке диаметром 0,3 м:

$$V_{\text{фр}} = \frac{\pi \cdot 0,3^2 \cdot h}{4} = 5,65 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3.$$

Исходя из объема и плотности фоторезиста можно получить его массу для обработки одной подложки:

$$m_{\text{фр}} = V_{\text{фр}} \cdot 1300 = 7,35 \cdot 10^{-5} \text{ кг.}$$

Таким образом, теперь таблица расходов заполнена, и можно рассчитать процесс фотолитографии для выполнения программы в 5000 подложек. Проведя расчет по аналогии с практическим заданием № 1, в табл. 4.3 получить следующие результаты:

Таблица 4.3

Главная таблица

Стадия/Ресурс	1	2	3	4	5	6	7
Пластина, шт	5167,205	5156,891	5141,467	5136,331	5110,777	5075,250	5025,000
Фоторезист, кг	0,000	0,398	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Проявитель, л	0,000	0,000	4766,140	0,000	0,000	0,000	0,000
Травитель, л	0,000	0,000	0,000	3667,340	0,000	0,000	0,000
Деионизированная вода, л	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11165,55	0,000

Варианты заданий для самостоятельного решения

Варианты таблиц расходов (табл. 4.4, табл. 4.5).

Таблица 4.4

Таблица расходов, вариант 1

Стадия/Ресурс, вариант 1	1	2	3	4	5	6	7
Пластина, шт	1	1	1	1	1	1	1
Фоторезист, кг	0	*	0	0	0	0	0
Проявитель, л	0	0	0,95	0	0	0	0
Травитель, л	0	0	0	0,75	0	0	0
Деионизированная вода, л	0	0	0	0	0	4	0

Таблица 4.5

Таблица расходов, вариант 2

Стадия/Ресурс, вариант 2	1	2	3	4	5	6	7
Пластина, шт	1	1	1	1	1	1	1
Фоторезист, кг	0	*	0	0	0	0	0
Проявитель, л	0	0	0,8	0	0	0	0
Травитель, л	0	0	0	0,6	0	0	0
Деионизированная вода, л	0	0	0	0	0	5	0

Варианты таблиц расходов (табл. 4.6, табл. 4.7).

Таблица 4.6

Таблица потерь, вариант 1

Стадия/Ресурс, вариант 1	1	2	3	4	5	6	7
Пластина, шт	0,001	0,005	0,002	0,006	0,005	0,013	0,007
Фоторезист, кг	0,000	0,060	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Проявитель, л	0,000	0,000	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000
Травитель, л	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,000
Деионизированная вода, л	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,150	0,000

Таблица 4.7

Таблица потерь, вариант 2

Стадия/Ресурс, вариант 2	1	2	3	4	5	6	7
Пластина, шт	0,003	0,015	0,025	0,01	0,002	0,005	0,003
Фоторезист, кг	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Проявитель, л	0,000	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000
Травитель, л	0,000	0,000	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000
Деионизированная вода, л	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,170	0,000

Варианты условий для расчета представлены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Условия для расчета

Вариант	Вариант таблицы расходов	Вариант таблицы потерь	Программа выпуска подложек, шт	Минимальный размер элемента, мкм	Длина волны, нм	Диаметр подложки, м
1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1000	0,3	100	0,2
1	2	3	4	5	6	7
2	1	2	3000	0,6	200	0,3
3	2	1	5000	0,9	300	0,45
4	2	2	2600	1,1	400	0,2
5	1	1	2000	1,2	500	0,3
6	1	2	7500	0,3	100	0,45
7	2	1	2000	0,6	200	0,2
8	2	2	1700	0,9	300	0,3
9	1	2	6000	1,1	400	0,45
10	2	1	2200	1,2	500	0,3

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ № 5 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ЭПИТАКСИИ

Цель работы: овладеть основами метода материального баланса для оценки ресурсов при проектировании и выполнении технологического процесса эпитаксии.

Теоретические сведения

Эпитаксия – процесс ориентированного наращивания монокристаллического материала на монокристалл-подложку. Растущий новый кристалл продолжает кристаллическую решетку подложки с образованием переходного эпитаксиального слоя, способствующего когерентному срастанию двух решеток по плоскостям и направлениям со сходной плотностью атомной упаковки.

Эпитаксия тем успешнее, чем меньше постоянная решетки осаждаемого вещества отличается от подложки (пленка не отрывается).

Классификация процессов эпитаксии приведена ниже.

По типу процессов:

1. *Автоэпитаксия (гомоэпитаксия)* – процесс ориентированного наращивания, кристаллического вещества, одинакового по структуре и не отличающегося химически (или отличающегося незначительно) от вещества подложки. Отличие может заключаться в различном уровне легирования и типе примесей, что обуславливает возможность формирования гомогенных электронно-дырочных структур.

2. *Гетероэпитаксия* – процесс ориентированного наращивания вещества, отличающегося по химическому составу от вещества подложки, но подобного ему по структуре. Этот процесс происходит с образованием переходного слоя, протяженность которого может быть значительной.

3. *Хемоэпитаксия* – процесс ориентированного нарастания, в результате которого образование новой кристаллической фазы – хемоэпитаксиального слоя – происходит за счет химического взаимодействия (например, реактивной диффузии) вещества подложки с веществом, поступающим из исходной фазы. Полученный слой по химическому составу отличается как от подложки, так и от исходной фазы, но закономерно продолжает кристаллическую структуру

подложки. Как правило, толщина хемопитаксиального слоя невелика. При образовании таких слоев может быть сформирован гетеропереход или невыпрямляющий контакт.

4. *Реотаксия* – ориентированное наращивание кристаллического слоя в условиях, близких к равновесным, на подложке как механическом носителе. Подложка может быть стеклообразной, аморфной или иметь структуру, отличную от структуры формирующейся кристаллической фазы. Упорядочение формирующегося слоя происходит за счет высокой подвижности исходных структурных образований кластеров, попадающих на подложку из внешней среды.

По агрегатному состоянию исходной фазы все эпитаксиальные процессы делятся на четыре типа:

1. *Газофазная (парофазная) эпитаксия*. Проходит в присутствии газовой фазы, которая либо является паром нужного вещества, либо паром соединения-предшественника. Газофазная эпитаксия может проходить по одному из трех типов реакций: пиролиз (разложение при высокой температуре), восстановление в атмосфере водорода, химические транспортные реакции. Легирование при газофазной эпитаксии производится проще всего, так как необходимо просто добавить необходимую примесь (или ее соединение-предшественник) в газовую фазу для эпитаксии.

2. *Эпитаксия в жидкой фазе*. Применяется для осаждения многих бинарных и тройных полупроводниковых соединений АПВВ, особенно при создании многослойных *p-n*- и изотипных структур на различных подложках. В этом случае осаждаемое вещество находится в исходной фазе либо в растворенном (раствор), либо в расплавленном (раствор – расплав) состоянии. Перенос вещества к подложке осуществляется при распаде пересыщенного раствора диффузионным путем, иногда при участии конвективного обмена в жидкой фазе. Особый случай представляет эпитаксия в жидкой фазе при наличии градиента температуры в системе раствор – подложка.

3. *Эпитаксия в твердой фазе*. Этот метод сводится к перекристаллизации вещества в поверхностном слое твердой фазы или к синтезу его в поверхностном слое с последующей перекристаллизацией. Для синтеза тонких слоев химических соединений вблизи поверхности твердого тела иногда используют метод ионного внедрения одного из компонентов соединения с последующей кристаллизацией в процессе эпитаксиального отжига. Примерами служат

образование слоя AlN на поверхности $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ после имплантации азота или Si_3N_4 на поверхности Si. К настоящему времени эпитаксия в твердой фазе – наименее изученный процесс. Применение ее в технологии полупроводниковых приборов ограничено.

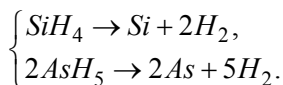
4. *Молекулярно-лучевая эпитаксия.* Отличается тем, что происходит в вакууме (высокий/сверхвысокий) и позволяет получать пленки толщиной в несколько атомных слоев (скорость процесса – около 3 нм/ч). Принцип – атомы вещества для нанесения разгоняются электрическим полем до нужной энергии, после чего попадают на пластину и закрепляются там, формируя слой. Можно подогнать энергию так, что атомы образуют пленку внутри пластины на заданной глубине. Минус – радиационные дефекты (отжиг после процесса).

Самым простым и от того достаточно широко применяемым является технологический процесс газофазной эпитаксии методом пиролиза, который имеет следующие основные стадии:

1. *Входной контроль.* Проверяется чистота поверхности подложки и ее готовность для эпитаксии при высокой температуре. Проверка может проводиться интерференционными методами автоматически или визуально.

2. *Предварительная обработка подложки во фреоне или иных активных газах.* Проводится для удаления попавших на их поверхность загрязнений. Проводится при высокой температуре (выше 1000 °С), что может вызвать термические напряжения и излом подложек. Чтобы избежать этого, нагрев проводят постепенно.

3. *Напуск паро-газовой смеси (ПГС) и эпитаксия.* В реактор, разогретый до рабочей температуры (1050–1100 °С), подается ПГС, содержащая заданную концентрацию силана SiH_4 и газа-предшественника для примеси (например, арсина AsH_3). При рабочей температуре силан и арсин разлагаются с выделением кремния и мышьяка соответственно. Процесс проходит по реакциям:



Основные причины брака на этой стадии – перегрев, возникновение излишних термических напряжений, нарушение состава ПГС (особенно попадание кислорода или избыток примеси).

4. *Отжиг*. Применяется для удаления термических напряжений в подложке и пленке, проходит при температурах до 1100 °С. Чтобы не возник брак, нужно охлаждать подложки после отжига постепенно. Также следует контролировать время процесса, так как попавшая в подложку примесь продолжает распространяться вглубь подложки из-за повышенной температуры.

5. *Выходной контроль*. Контролируют толщину и качество получившейся пленки. Для этого можно применять как разрушающие методы (например, создание косоугольного шлифа), так и неразрушающие (например, метод Холла или четырехзондовый метод).

Пример решения задачи

Входные данные для расчета:

Эпитаксия газофазная, пиролитическая, с одновременным легированием пленки мышьяком.

Диаметр пластины 0,3 м.

Толщина пленки: 70 мкм.

Примесь – мышьяк, молярная масса 75 г/моль, концентрация примеси $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Источник примеси – арсин.

Материал пленки – кремний, молярная масса 28 г/моль, плотность 2330 кг/м³.

Источник кремния – силан.

Температура процесса – 1100 °С.

Программа выпуска 1200 подложек.

Расходы ресурсов приведены в табл. 5.1, потери ресурсов приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.1

Таблица расходов

Стадия	Входной контроль	Эпитаксия	Отжиг	Выходной контроль
Подложки, шт	1	1	1	1
Арсин, л	0	*	0	0
Силан, л	0	*	0	0

Таблица потерь

Стадия	Входной контроль	Эпитаксия	Отжиг	Выходной контроль
Подложки	0,01	0,03	0,04	0,01
Арсин	0	0,02	0	0
Силан	0	0,01	0	0

Чтобы начать расчет, необходимо получить данные о расходах силана и арсина (заполнить ячейки * в табл. 5.1). Так как концентрация примеси значительно (не менее, чем на девять порядков) меньше концентрации собственных атомов кремния, то расход силана можно определить, зная массу вырастающей пленки, а расход арсина – по количеству атомов мышьяка в этой пленке. Мышьяк почти не повлияет на плотность кремниевой пленки, так как он хорошо в ней растворяется, и его крайне мало по сравнению с кремнием.

Необходимо рассчитать объем пленки по ее толщине:

$$V_{\text{пл}} = \frac{\pi \cdot 0,3^2 \cdot 70 \cdot 10^{-6}}{4} = 4,945 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Массу пленки определить по ее объему и плотности кремния:

$$m_{\text{пл}} = V_{\text{пл}} \cdot 2330 = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ кг}.$$

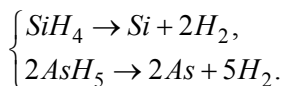
Найти химическое количество кремния в пленке:

$$n_{\text{Si}} = m_{\text{пл}} / M_{\text{Si}} = 0,412 \text{ моль}.$$

По объему пленки и концентрации примеси определить химическое количество мышьяка (N_A – постоянная Авогадро):

$$n_{\text{As}} = \frac{V_{\text{пл}} \cdot 5 \cdot 10^{19}}{N_A} = 4,111 \cdot 10^{-10} \text{ моль}.$$

Зная химические количества кремния и мышьяка, определить их объемы при нормальных условиях. Для этого записать реакции разложения силана и мышьяка при температуре процесса:



Из этих реакций следует, что при разложении одного моля силана получается один моль кремния, а при разложении одного моля арсина получается один моль мышьяка. Поэтому при нормальных условиях при мольном объеме 22,4 л объемы силана и арсина для обработки одной подложки выражаются в виде:

$$V_{\text{силан, н.у.}} = 22,4 \cdot n_{Si} = 9,229 \text{ л,}$$

$$V_{\text{арсин, н.у.}} = 22,4 \cdot n_{As} = 9,209 \cdot 10^{-9} \text{ л.}$$

Зная молярный объем, необходимо определить расходы кремния и мышьяка при температуре процесса по аналогии с кислородом в практическом задании № 3. Для этого следует выразить рабочую температуру в градусах Кельвина, что составит 1373 К:

$$V_{\text{силан, 1373К}} = \frac{V_{\text{силан, н.у.}} \cdot 1373}{298} = 42,522 \text{ л,}$$

$$V_{\text{арсин, 1373К}} = \frac{V_{\text{арсин, н.у.}} \cdot 1373}{298} = 4,242 \cdot 10^{-8} \text{ л.}$$

Таким образом, расходы силана и арсина получены. Подставив их в табл. 5.1, по аналогии с практическим заданием № 1 можно получить следующий результат в табл. 5.3:

Таблица 5.3

Главная таблица

Стадия	Входной контроль	Эпитаксия	Отжиг	Выходной контроль
Пластины, шт	1311	1298	1260	1212

Окончание табл. 5.3

Стадия	Входной контроль	Эпитаксия	Отжиг	Выходной контроль
Арсин, л	0	$5,611 \cdot 10^{-5}$	0	0
Силан, л	0	$5,569 \cdot 10^4$	0	0

Экспоненциальный формат чисел применен из-за малого расхода силана и арсина.

Варианты заданий для самостоятельного решения

Таблица расходов (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Таблица расходов

Таблица расходов	Входной контроль	Эпитаксия	Отжиг	Выходной контроль
Подложки, шт	1	1	1	1
Арсин, л	0	*	0	0
Силан, л	0	*	0	0

Варианты таблиц потерь (табл. 5.5, табл. 5.6).

Таблица 5.5

Таблица потерь, вариант 1

Таблица потерь, вариант 1	Входной контроль	Эпитаксия	Отжиг	Выходной контроль
Подложки	0,02	0,03	0,03	0,01
Арсин	0	0,01	0	0
Силан	0	0,02	0	0

Таблица 5.6

Таблица потерь, вариант 2

Таблица потерь, вариант 2	Входной контроль	Эпитаксия	Отжиг	Выходной контроль
Подложки	0,03	0,01	0,01	0,02
Арсин	0	0,03	0	0
Силан	0	0,03	0	0

Варианты условий для расчета представлены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Условия для расчета

Вариант	Вариант таблицы расходов	Вариант таблицы потерь	Программа выпуска подложек, шт	Толщина пленки, мкм	Температура процесса, °С	Диаметр пластины, м
1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1000	10	1000	0,2
2	1	2	3000	20	1050	0,3
3	1	1	5000	30	1100	0,45
4	1	2	2600	40	1150	0,2
5	1	1	2000	50	1000	0,3
6	1	2	7500	10	1050	0,45
7	1	1	2000	20	1100	0,2
8	1	2	1700	30	1150	0,3
9	1	2	6000	40	1050	0,45
10	1	1	2200	50	1100	0,3

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ № 6 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ТРАВЛЕНИЯ

Цель работы: овладеть основами метода материального баланса для оценки ресурсов при проектировании и выполнении технологического процесса травления.

Теоретические сведения

Травление – контролируемое удаление части материала с поверхности подложки.

Травление бывает жидкостное, газовое, плазменное.

Жидкостное (мокрое) – травление проводится в жидкой фазе (раствор, расплав). Процесс по большей части химический. В основе каждого травителя должны присутствовать два обязательных компонента: окислитель и растворитель оксида (комплексобразователь). Кроме основных компонентов в состав травителей часто вводят регуляторы скорости травления: замедлители или ускорители. Жидкие травители для кремния имеют щелочную (быстрое травление, но много ионов щелочных металлов, что портит качество поверхности) или кислотную (медленно, зато качественно) реакцию, оксид травится кислотами.

Газовое (сухое) – травление в газовой фазе. Может быть химическим или физическим. Как правило, травление выполняется по реакциям, обратным эпитаксии. Для этого температура процесса сильно повышается, чтобы стимулировать переход реакции в обратную форму и вызвать таким образом удаление материала, а не его нарастание.

Плазменное (сухое) – травление в плазме или вакууме. По большей части физическое, легко переводится в напыление пленки. Основное качество этого вида травления – высокая скорость процесса, которая достигается и контролируется путем пропускания тока заданной величины через плазму и создания магнитного поля для разгона частиц плазмы.

Травление имеет следующие основные характеристики: селективность, изотропность и скорость.

Селективность – показывает, насколько избирателен травитель к материалам: селективный травитель травит только один материал, неселективный – все материалы. Подбор состава селективных

травителей во многом носит чисто эмпирический характер. Селективность работы травителя обусловлена прежде всего особенностями адсорбции молекул (ионов) окислителя на поверхности кристалла в области с нарушенной структурой.

Изотропность – показывает отношение травителя к ориентации материала: изотропный травит материал с одинаковой скоростью вне зависимости от ориентации, анизотропный – только в одном направлении.

Скорость – показывает, сколько материала удаляется с поверхности пластины в единицу времени.

В качестве примера технологического процесса травления рассмотрим процесс мокрого травления, имеющий следующие основные стадии:

1. *Входной контроль*. Контролируют чистоту поверхности пластины.

2. *Погружение в травитель и травление*. Основными параметрами стадии является температура (от нее зависит скорость травления, на каждые 10 градусов нагрева скорость возрастает в 2–4 раза), время процесса и степень перемешивания раствора. Брак появляется в основном из-за нарушения температурного режима и режима перемешивания раствора.

3. *Отмывка*. Выполняется с целью гарантированно прекратить травление. Для промывки применяют раствор соды (если травитель был кислотный) или уксусную кислоту (если щелочной). Обязательно контролируется экологическая безопасность промывочной жидкости и ее pH.

4. *Выходной контроль*. Проводится визуально или автоматически, оценивается качество поверхности и наличие дефектов травления (например, искажения формы отверстий).

Пример решения задачи

Эпитаксия газофазная, пиролитическая, с одновременным легированием пленки мышьяком.

Диаметр пластины 0,3 м.

Глубина травления 20 мкм.

Материал пленки для травления – оксид кремния, молярная масса 60 г/моль, плотность 2650 кг/м³.

Травитель – смесь соляной кислоты (молярная масса 36 г/моль) и деионизованной воды (молярная масса 18 г/моль) в соотношении 1:9 по массе.

Программа выпуска 1600 подложек.

Расходы ресурсов приведены в табл. 6.1, потери ресурсов приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.1

Таблица расходов

Стадии	Входной контроль	Травление	Отмывка	Выходной контроль
Подложки, шт	1	1	1	1
Соляная кислота, кг	0	*	0	0
Деионизованная вода, л	0	*	1	0

Таблица 6.2

Таблица потерь

Стадии	Входной контроль	Травление	Отмывка	Выходной контроль
Подложки	0,01	0,02	0,04	0,01
Соляная кислота	0	0,05	0	0
Деионизованная вода	0	0,06	0,07	0

Для расчета необходимо вначале получить данные о расходе деионизованной воды и соляной кислоты (отмечены в табл. 6.1 *). Чтобы получить их, сначала следует рассчитать объем и массу удаляемой части оксида кремния по толщине удаляемого оксида, диаметру подложки и плотности оксида:

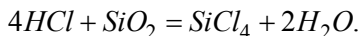
$$V_{\text{пл}} = \frac{\pi \cdot 0,3^2 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{4} = 1,413 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3,$$

$$m_{\text{SiO}_2} = V_{\text{пл}} \cdot 2650 = 3,744 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

После этого необходимо вычислить химическое количество удаленного оксида кремния:

$$n_{SiO_2} = m_{SiO_2} / M_{SiO_2} = 3,744 \cdot 10^{-3} / 60 \cdot 10^{-3} = 6,241 \cdot 10^{-2} \text{ моль.}$$

С помощью реакции травления определить, сколько молей соляной кислоты необходимо для удаления оксида:



Из реакции видно, что для удаления 1 моль оксида нужно 4 моль соляной кислоты. Поэтому ее химическое количество будет равно:

$$n_{HCl} = 4 \cdot n_{SiO_2} = 0,25 \text{ моль.}$$

Массу соляной кислоты определить в виде:

$$m_{HCl} = n_{HCl} \cdot M_{HCl} = 8,987 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

Зная массу соляной кислоты, можно получить массу воды из соотношения 1:9, то есть на одну часть соляной кислоты нужно девять частей воды. Поэтому:

$$m_{H_2O} = 9 \cdot m_{HCl} = 8,088 \cdot 10^{-2} \text{ кг.}$$

После проведения расчетов известно, сколько соляной кислоты и деионизованной воды понадобится для обработки одной подложки. Расход деионизованной воды требуется в литрах, но из-за плотности воды (1000 кг/м^3) количество литров будет равно килограммам, полученным ранее.

Подставив данные в таблицу 6.1 и проведя расчет по аналогии с практическим заданием № 1, можно получить следующий результат (табл. 6.3):

Таблица 6.3

Главная таблица

Стадии	Входной контроль	Травление	Отмывка	Выходной контроль
Подложки, шт	1732	1715	1681	1616
Соляная кислота, кг	0	16,176	0	0
Деионизованная вода, л	0	146,968	1798,285	0

После расчета главной таблицы при определении итогового количества ресурсов следует сложить объемы деионизованной воды для отмывки и приготовления травителя, так как для его приготовления применяется та же вода, что и для отмывки.

Варианты заданий для самостоятельного решения

Варианты таблиц расходов (табл. 6.4, табл. 6.5).

Таблица 6.4

Таблица расходов, вариант 1

Таблица расходов, вариант 1	Входной контроль	Травление	Отмывка	Выходной контроль
Подложки, шт	1	1	1	1
Соляная кислота, кг	0	*	0	0
Деионизованная вода, л	0	*	3	0

Таблица 6.5

Таблица расходов, вариант 2

Таблица расходов, вариант 2	Входной контроль	Травление	Отмывка	Выходной контроль
Подложки, шт	1	1	1	1
Соляная кислота, кг	0	*	0	0
Деионизованная вода, л	0	*	5	0

Варианты таблиц потерь (табл. 6.6, табл. 6.7).

Таблица 6.6

Таблица потерь, вариант 1

Таблица потерь, вариант 1	Входной контроль	Травление	Отмывка	Выходной контроль
Подложки	0,01	0,03	0,05	0,01
Соляная кислота	0	0,06	0	0
Деионизованная вода	0	0,05	0,08	0

Таблица 6.7

Таблица потерь, вариант 2

Таблица потерь, вариант 2	Входной контроль	Травление	Отмывка	Выходной контроль
Подложки	0,01	0,02	0,06	0,01
Соляная кислота	0	0,04	0	0
Деионизованная вода	0	0,02	0,1	0

Варианты условий для расчета представлены в табл. 6.8.

Таблица 6.8

Условия для расчета

Вариант	Вариант таблицы расходов	Вариант таблицы потерь	Программа выпуска подложек, шт	Глубина травления, мкм	Соотношение соляной кислоты и воды	Диаметр пластины, м
1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1000	10	1:9	0,2
2	1	2	3000	20	2:5	0,3
3	1	1	5000	30	3:10	0,45
4	1	2	2600	40	4:7	0,2
5	1	1	2000	50	5:11	0,3
6	1	2	7500	10	1:9	0,45
7	1	1	2000	20	2:5	0,2
8	1	2	1700	30	3:10	0,3
9	1	2	6000	40	4:7	0,45
10	1	1	2200	50	5:11	0,3

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мартынов, В. В. Технология сверхбольших интегральных схем и оптико-механическое оборудование для микро-и нанoeлектроники / В. В. Мартынов, Я. И. Точицкий; Национальная академия наук Беларуси. – Минск : Беларуская навука, 2018. – 466 с.: ил., цв. ил., схемы, табл.

2. Колосницын, Б. С. Полупроводниковые приборы и элементы интегральных микросхем: [учебно-методическое пособие для специальности 1-41 01 02 «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы»] / Б. С. Колосницын, А. Г. Черных; кол. авт. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2015. – 85 с.: ил.

3. Готра, З. Ю. Технология микрoeлектронных устройств / З. Ю. Готра. – Москва : Радио и связь, 1991. – 528 с.

4. Ефимов, И. Е. Микрoeлектроника / И. Е. Ефимов, И. Я. Козырь, Ю. И. Горбунов – 2-е изд. – Москва : Высшая школа, 1986. – 464 с.

5. Аваев, Н. А. Основы микрoeлектроники. Учебное пособие для студентов радиотехнических специальностей ВУЗов / Н. А. Аваев, Ю. Е. Наумов, В. Т. Фролкин. – Москва : Радио и связь, 1991. – 288 с.

6. Курнос, А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Учебное пособие для студентов вузов / А. И. Курнос, В. В. Юдин. – 3-е изд. – Москва : Высшая школа, 1986. – 368 с.

7. Будневич, М. Технологическая подготовка производства печатных плат / М. Будневич // Электроника. – 2004. – № 5. – С. 30–33.

Учебное издание

БАЛОХОНОВ Дмитрий Валентинович

**МЕТОД МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА
В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ
(ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ)**

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-27 01 01 «Экономика
и организация производства (по направлениям)»
по направлению 1-27 01 01-08 «Экономика
и организация производства (приборостроение)»

Редактор *П. П. Горбач*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 08.06.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,08. Уч.-изд. л. 2,05. Тираж 100. Заказ 269.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.