

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
МИКРОСХЕМ МЕТОДОМ
ФОТОЛИТОГРАФИИ**

Методические указания к лабораторной работе
по курсу «Технологические процессы микроэлектроники»

САМАРА 2005

Составители: *В.Д. Дмитриев, А.И. Меркулов*

УДК 621.38(075)

Изучение технологии изготовления элементов гибридных интегральных микросхем методом фотолитографии.

Метод. указания к лаб. работе / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2004. Сост. *В.Д. Дмитриев, А.И. Меркулов*. Самара, 2005. 19 с.

Приведены теоретические сведения по технологии изготовления элементов тонкоплёночных гибридных интегральных микросхем методом фотолитографии. Рассмотрены вопросы повышения качества и точности фотолитографического процесса, приведен типовой технологический процесс.

Рекомендуются студентам специальности 20.08.00 при изучении дисциплины «Технологические процессы микроэлектроники».

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва.

Рецензент: Г.П. Шопин

Цель работы: изучение и практическое освоение основных операций фотолитографического процесса, получения рисунка пассивных элементов гибридных интегральных микросхем (ГИМС).

Задания:

1. Изучить структуру и основные операции фотолитографического процесса получения рисунка пленочных элементов ГИМС.

2. Изучить оборудование для фотолитографического процесса.

3. Изучить методику оценки качества рисунков элементов при фотолитографическом методе изготовления.

4. Исследовать точность изготовления размеров пассивных пленочных элементов.

5. Изучить технологию изготовления пленочных элементов методом фотолитографии (см. Приложение).

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Сущность процесса фотолитографии

Фотолитография – совокупность фотохимических процессов, применяющихся для получения необходимых размеров и конфигурации элементов интегральных микросхем и других электронных микроузлов.

Сущность процесса фотолитографии заключается в следующем.

На поверхность материала наносят слой особого светочувствительного состава - фоторезиста. **Фоторезисты (ФР)** – светочувствительные и устойчивые к воздействию агрессивных сред (кислот, щелочей) вещества, предназначенные для создания защитного рельефа требуемой

конфигурации от последующего воздействия химических, физических, электрохимических и прочих агрессивных сред. Защитный рельеф образуется в результате того, что под действием света, падающего на определенные участки фоторезистивного слоя, последние изменяют свои физико-химические свойства.

В зависимости от механизма протекающих в фоторезисте реакций, особенностей, и изменения его свойств, фоторезисты делят на негативные и позитивные. При облучении **негативного фоторезиста** через фотошаблон (позитив) в нем протекают процессы, приводящие к потере растворимости, в результате чего после обработки в соответствующих растворителях (проявителях) удаляются только необлученные участки, расположенные под непрозрачными элементами фотошаблона, и на подложке образуется защитный рельеф, повторяющий негативное изображение фотошаблона.

В **позитивных фоторезистах** под действием света протекают фотохимические реакции, приводящие, наоборот, к усилению растворимости в соответствующих проявителях, в результате чего удаляются (вымываются) только облученные участки фоторезиста и защитный рельеф повторяет позитивное изображение фотошаблона.

К основным достоинствам фотолитографического процесса следует отнести:

возможность получения пленочных и объемных компонентов ИМС весьма малых размеров (до долей микрона) практически любой конфигурации;

универсальность метода (изготовление трафаретов для напыления пленок и сеткографии, селективное травление пленочных слоев, вытравливание «окон» в оксидных пленках для локальной диффузии, эпитаксии и имплантации, глубинное травление в полупроводниковых и диэлектрических подложках и т.д.);

возможность применения групповой технологии (за одну операцию и на одном виде оборудования можно

получить сотни и тысячи элементов ИМС и других приборов).

Для осуществления фотохимических процессов в фоторезистивных материалах применяют обычно ультрафиолетовое (УФ) излучение. Поскольку в естественном свете содержание УФ лучей сравнительно невелико, то для более интенсивного протекания фотохимических процессов применяют искусственные источники УФ излучения. Поглощение УФ излучения органическими молекулами протекает селективно, т.е. для различных веществ поглощение наблюдается на вполне определенной длине волны УФ диапазона.

Процессы, протекающие при экспонировании вещества, разделяют на три группы:

1 – фотополимеризация и образование нерастворимых участков; наиболее типичными для системы, в которой используется этот процесс, являются негативные фоторезисты – эфиры коричной кислоты и поливинилового спирта;

2 – сшивание линейных полимеров радикалами, образующимися при фотолизе светочувствительных соединений, использование каучуков с добавками светочувствительных веществ, таких, например, как бисазиды, дает возможность получать исключительно кислотостойкие негативные фоторезисты;

3 – фотолиз светочувствительных соединений с образованием растворимых веществ. Примером служит большинство современных фоторезистов, в которых фотолиз соединений, называемых нафтохинондиазидами (НХД), приводит к тому, что облученные участки становятся растворимыми в щелочных составах.

В точной фотолитографии предпочитают использовать позитивные ФР в связи с отсутствием ореолов по границам защитного рельефа. Позитивные ФР проявляют в растворах с основными свойствами (в качестве проявителя часто используется водный раствор тринатрийфосфата). Помимо разрушенных молекул НХД проявитель должен растворять и полимер, поэтому с целью снижения числа дефектов на

незасвеченных участках желательнее время воздействия проявителя на слой фоторезиста сокращать до минимума. Для этого необходимо работать на нижнем пределе экспонирования, который определяется условием достижения максимальной скорости проявления экспонированных участков по экспериментальным кривым (рисунок 1).

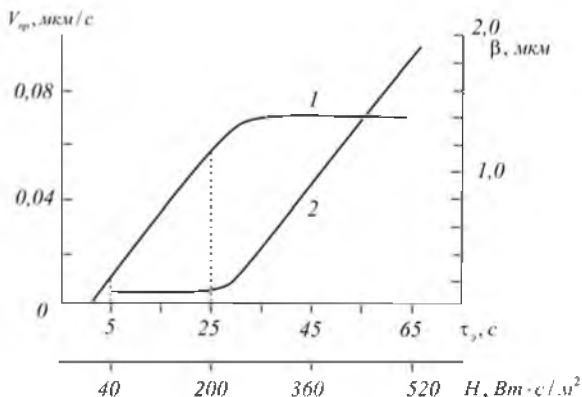


Рисунок 1 - Характеристическая кривая и погрешность в воспроизведении размеров элементов после проявления:

1 – зависимость скорости проявления от экспозиции;

2 – зависимость погрешности от экспозиции.

$V_{пр} = h_c / t_{пр}$, где $t_{пр}$ - время полного растворения слоя толщиной h_c , получившего дозу излучения $H = E\tau_{э}$; E – плотность светового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $\tau_{э}$ - время экспозиции, с.

1.2. Получение конфигурации тонкоплёночных элементов методом фотолитографии

Типовой технологический процесс фотолитографии в общем виде представлен схемой (рисунок 2).

Нанесение фоторезиста на подложку осуществляют:

1. Центрифугой при частоте вращения до 10 тыс.

об/мин. Метод обеспечивает получение тонких, равномерных покрытий толщиной до 1 микронметра с отклонением до 5%. В промышленности выпускается агрегат для нанесения и сушки фоторезиста типа Э12 К631 .

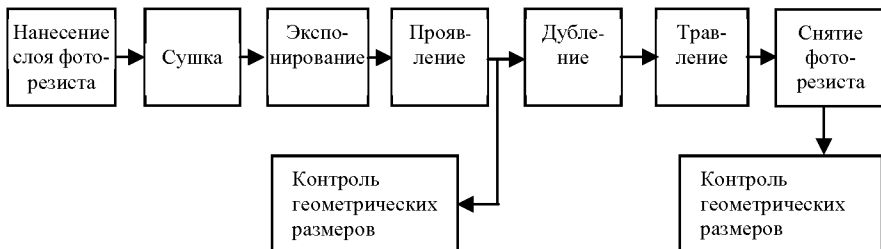


Рисунок 2 - Схема фотолитографического процесса.

2. Распылением фоторезиста в обеспыленной среде под давлением. Размер частиц, поступающих на подложку, не превышает 1,5—2 мкм. Метод обеспечивает нанесение слоя в интервале от 0,3 до 10 мкм с допуском $\pm 5\%$.

3. Погружением подложки в ванну с фоторезистом. Однако толщина плёнки на подложке неравномерна и имеет форму «клина» за счёт стекания фоторезиста в сторону, противоположную вытягиванию подложки из ванны.

Для удаления остатков растворителя из плёнки фоторезиста проводят сушку, при которой адгезия между подложкой и фоторезистом увеличивается. Формируется конфигурация в плёнке фоторезиста экспонированием, при котором изображение с фотошаблона переносится на поверхность подложки, покрытой слоем фоторезиста.

Фоторезист проявляют, погружая в раствор или выдерживая в парах проявителя. Время проявления определяется толщиной фоторезиста и регулируется таким образом, чтобы по всей площади подложки полностью был удален **проэкспонированный** растворимый фоторезист.

Контроль геометрических размеров элементов после

проявления производят путем измерения линейных размеров на оптических микроскопах типа УИМ-21, УИМ-23 и проверяют на соответствие размерам, заложенным в топологии.

После проявления проводят процесс дублирования фоторезиста — термическую обработку с целью удаления проявляющего раствора и улучшения адгезии. Время выдержки и контроль температуры строго контролируют для исключения искажения изображения в результате пластической деформации. Затем проводят травление незащищенного слоя фоторезиста участков материала пленки. Травление обеспечивает создание требуемой конфигурации в тонком слое материала, на который нанесен фоторезист. Затем фоторезист снимают в смеси органических растворителей, не разрушающих нанесенные слои тонкопленочных элементов.

Травление в фотолитографическом процессе является одной из ответственных операций, так как геометрические размеры пленочных резисторов должны выдерживаться с высокой точностью, что, в конечном счете, определяет точность их номинала. Метод травления и травильный раствор должны обеспечивать равномерность травления, целостность защитной фоторезистивной пленки и отсутствие нерастворимых продуктов реакции при оптимальной скорости травления. Кроме того, отношение скорости бокового травления к скорости травления в глубину должно быть минимальным. Адгезия фоторезиста к пленкам во время травления не должна ухудшаться, чтобы не было отслоений. Образование пузырей нежелательно, так как их адсорбция на краях фоторезиста приводит к неравномерному процессу травления.

Нарушение фоторезистивной пленки, отслаивание указывает на непригодность совместного использования травителя и фоторезиста. Следует также избегать длительного воздействия травителя на фоторезист.

Для создания конфигурации пленочных элементов в

процессе
селективное

фотолитографии

используют

травление многослойных структур, осажденных в едином технологическом цикле вакуумного напыления. На подложку последовательно напыляют резистивную, затем проводящую пленку и, при необходимости, слой для контактных площадок.

Затем по многослойной структуре проводят фотолитографию по каждому или группе слоев, получая таким образом конфигурацию тонкопленочных резисторов и проводников (см. Приложение).

2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Качество фотолитографического процесса оценивается тремя параметрами:

1 – точностью передачи размеров, которую оценивают по абсолютным или относительным отклонениям размера элемента от номинального значения

$$\Delta l = l_0 - l; \quad \frac{\Delta l}{l} = \frac{l_0 - l}{l},$$

где l – полученный размер, l_0 – номинальный размер.

2 – точностью совмещения, которая количественно определяется разностью $\delta = z_0 - z$, где z_0 и z – заданный и воспроизведенный зазор между элементами специально помещенной на ГИМС отметки совмещения (элементы отметки выполняются в разных слоях ГИМС).

Точность совмещения в основном зависит от используемых установок для совмещения, геометрии меток совмещения и квалификации работников.

3 – плотностью опасных дефектов – λ , $1/\text{см}^2$.

Чаще всего это дефекты фотошаблона или попадания пыли между слоем ФР и фотошаблоном. Дефекты могут быть

также следствием посторонних включений и механических напряжений в слое ФР, физико-химических несовершенств ФР, (включения нерастворимых полимеров, остатки продуктов, использующихся при синтезе ФР, участки ФР с разложившимися молекулами светочувствительных составляющих и др.). Очевидно, что с увеличением толщины слоя ФР вероятность превращения потенциального дефекта (в связи с его малыми размерами) в реальный уменьшается. Однако с ростом толщины h_c (см. рис. 3), ухудшается точность передачи размера и разрешающая способность; приближенно считается, что величина h_c должна быть меньше $0,2 \div 0,3 l_{\text{ин}}$ мин.

Точность передачи размеров рисунка складывается из точности получения ФР маски и точности, получаемой в процессе травления (рисунок 3).

Воспроизведение размеров защитного слоя зависит от многих факторов: типа ФР, толщины его слоя, времени экспозиции, условий проявления; основным из них является правильный выбор экспозиции $H = E\tau$.

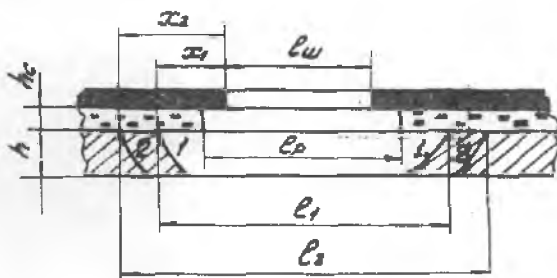


Рисунок 3 - Определение точности передачи рисунка:

1 – при правильно выбранном времени травления, где $l_{ш}$ – размер на фотошаблоне, l_p – размер на слое фоторезиста;

2 -при большом времени травления

При недостаточной экспозиции время проявления будет большим (может быть даже не полное удаление слоя ФР). При больших экспозициях за счет боковой засветки размер окна в слое ФР (см. рисунок 3) будет значительно превышать размер на фотошаблоне.

Процесс травления при неправильно выбранных режимах (концентрация раствора, температура, время травления) может внести значительный вклад в отклонение размеров элементов.

Действие химических травителей является ненаправленным, поэтому наряду с травлением толщины рабочей пленки происходит боковое растравливание под защитным слоем ФР. Количественно боковое (краевое) растравливание оценивается величиной x , которую называют шириной клина расслаивания, или коэффициентом травления v $K=x/h_m$ (где h_m – толщина рабочей пленки).

Примечание: Следует отметить, что, несмотря на заслуженное внимание, уделенное методу фотолитографии в данной работе, существует ряд технологических процессов получения еще более точного рисунка на поверхности пленок, полупроводников и т.д. Это процессы электролитографии, рентгенолитографии, ионного травления и другие. Они будут рассмотрены в лекционном курсе.

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Лабораторное оборудование состоит из:

- бокса, снабжённого вытяжной вентиляцией;
- центрифуги для нанесения слоя фоторезиста;
- установки для экспонирования с лампой типа СВД-120А;
- рамки для засветки с экраном;

- термостата;
- фотошаблона;
- микроскопа МИИ-4;
- секундомера;
- набора химической посуды и пинцетов.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1) Изготовить пассивные элементы пленочной микросхемы методом фотолитографии согласно технологическому процессу, приведенному в таблице. Произвести процесс фотолитографии для четырех различных значений экспозиции.

2) Исследовать точность передачи размеров пассивных элементов пленочной схемы на слое фоторезиста (после проявления и термообработки) и на пленке меди (после травления) в зависимости от времени экспонирования. Рассчитать абсолютные и относительные отклонения размеров элементов.

Примечание. Произвести измерения с помощью микроскопа размеров элементов l в нескольких местах (с определенным шагом) на фотошаблоне, фоторезистном слое и пленочном элементе.

3) Оформить отчет.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схема технологического процесса получения рисунка ГИМС методом прямой фотолитографии с хронометражом операций, рассчитать длительность технологического цикла.

2. Результаты замеров различных пленочных элементов и защитного рельефа, а также результаты расчетов точности передачи рисунка (оформить в виде таблицы).

3. Построить графики точности передачи рисунка на слое ФР и на пленке в зависимости от времени экспонирования.

4. Объяснить ход полученных зависимостей и определить оптимальное время экспонирования для условий проведения опыта.

5. Указать на «узкие» места фотолитографического процесса.

Контрольные вопросы

1. Какие методы получения рисунка тонких пленок вы знаете?

2. Что такое фоторезист?

3. Какова последовательность операций при прямой фотолитографии?

4. В чем различия позитивного и негативного фоторезиста?

5. Каковы критерии оценки фотолитографического процесса?

6. Какие явления вызывают появление дефектов при фотолитографической обработке?

7. Каково влияние передержки или недодержки при экспонировании на качество получения рисунка ИМС?

8. Как связаны между собой величина экспозиции и время проявления?

Получение рисунка схемы плёночных элементов методом фотолитографии

Но- мер опе- ра- ции	Но- мер пере- хода	Операции и переходы	Оборудова- ние, приспособ- ления, ин- струмент	Материалы	Режимы		Дополнительные указ- ания
					Тем- пера- тура, °С	Вре- мя, мин	
1	2	3	4	5	6	7	8
1		Нанесение фоторези- ста на рабочую по- верхность подложки. Закрепить подложку	Установка для нанесения фоторезиста Кисть колон- ковая	-	-	-	-
	1.	Удалить пыль с по- верхности подложки	Пилетка, се- кундомер	фоторезист ФП-383	-	2 ± 0,1	Фоторезист ФП-383 наносить на подложку методом полива при вращении ротора цен- трифуги со скоростью (об/мин) для рези- стивных слоев 2000; для проводниковых слоев - от 600 до 800.
	2.	Нанести фоторезист					

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
II	4.	Проверить визуально качество нанесенного слоя	-	-	-	-	Слой должен быть равномерным, глянцевым, однородным, без пузырей и инородных включений
III	1.	Сушка фоторезиста Сушить подложку с нанесенным слоем фоторезиста	- шкаф сушильный, пластина для сушки цеховая, часы сигнальные Экскатор	- -	- 100±10	- 10	- подложки для сушки положить на пластины и поместить в сушильный шкаф
	2.	Охладить подложку в затемненном экрани-торе	Экскатор	-	-	6-8	-
	1.	Экспонирование Поместить подложку с нанесенным слоем фоторезиста на столлик установки и наложить фототаблон	- установка со- вмещения и экспонирова- ния, фото- таблон	- -	- -	- -	- -
	2.	Произвести экспони-рование		-	-	-	точное время экспонирования определять опытным путем.

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
IV							
	1.	Проявление и изображение схемы Протыкать изображение	Чашки фарфоровые, эмалированная	- натрий фосфорно-кислый трехкислотный, глауциин, вода дистиллированная, толуол	20±2	1,5±0,5	подложку с нанесенным слоем фоторезиста ФП-383 поместить в фарфоровую чашку с раствором промывателя и при встряхивании покачивать чашку следя за появлением изображения
	2.	Промыть подложку в проточной воде	Кювета эмалированная Вентилятор	-	-	-	сушить до полного высыхания
	3.	Сушить подложку	микроскоп	-	-	-	изображение должно быть четким, с ровными краями, без разрывов.
	4.	Провести контроль изображения					Некачественное изображение рисунка на фоторезисте ФП-383 смывать дистиллированной водой.

Продолжение таблицы

I	2	3	4	5	6	7	8
V	1. 2.	Термообработка Поместить подложку на пластине с напечатанной схемой в сушильный шкаф	- шкаф сушильный, пластины для сушки несовместимы тоже	- -	- 100x10	- 10	промыть, просушить и использовать для второй печати - для сушки фоторезиста ФП-383
VI	1.	Контроль Проверить количество фоторезистивного слоя	- микроскоп	- -	- -	- -	пластину извлечь из сушильного шкафа с температурой 100°C и поместить в сушильный шкаф с температурой 150°C - слой должен быть равномерным, гладким, однородным, без пузырей и отслоений
II		Получение рисунка схемы на фоторезисте	-	- -	- -	- -	производить в соответствии с описанным технологическим процессом - -

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Срубить капитальный железный слой с защитным слоем фоторезиста	Чистка фоторезиста, удаление защитного слоя фоторезиста, сушка	Чистка фоторезиста, удаление защитного слоя фоторезиста, сушка	-	-	-	Режимы для травления хрома. Травление производится при комнатной температуре в ацетиленовой плазме. Режимы для травления азидооксида
2.	Промывать подложку проточной водой	Промывать подложку проточной водой	Сушка фоторезиста, удаление защитного слоя фоторезиста, сушка	-	20±2 20±2	2-3 -	Удаление фоторезиста производится путем погружения в 20-процентный раствор едкого натра. Допускается удаление фоторезиста в смеси диоксида с диметилформидом 1:1 при кипячении
4.	Промывать подложку проточной водой	Промывать подложку проточной водой	Контроль удаления фоторезиста, сушка	-	20±2	2-3	
5.	Сушить подложку	Сушить подложку	Контроль удаления фоторезиста, сушка	-	-	-	Сушить до полного высыхания

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
III		Контроль Проверить качество элементов схемы	- микроскоп	- -	- -	- -	- на элементах не допус- каются раковины, вырывы, выступы по краям; на поверхности подложки не должно быть металлизированных участков, не преду- смотренных чертежом. Пронзводить в соответ- ствии с описанным техпроцессом
I		Получение рисунка схемы на фоторезисте	-	-	-	-	
II		Травление меди					
	1.	Стравить медный слой с защищенных фоторезистом участ- ков подложки	Чашка фар- форовая	-	-	-	
	2.	Промыть подложку протоочной водой	Секундомер, кювета эма- лированная	-	-	2-3	
	3.	Сушить подложку	-	-	-	-	Сушить до высыхания полного

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
III		Травление подложки	-	Хром, никель	-	-	Проводить в соответствии с описанным технологическим процессом
IV	1.	Удаление фоторезиста Удалить фоторезист	- Чаши фарфоровая	- диметил-формалид, диоксид	- -	- -	- удаления слюс фоторезиста 3-4 кратным промыванием подложки в смеси диметилформалида и диоксидов сава в соотношении 1:1
	2.	Промыть подложку в проточной воде	Чашка фарфоровая, секундомер	-	-	2-3	-
	3.	Сушить подложку	Вентилятор	-	-	-	Сушить до полного высыхания при комнатной температуре
V		Контроль					
		Проверить качество элементов схемы	-	-	-	-	качество элементов схемы проверить под микроскопом

Библиографический список

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов. -2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000 - 488 с.: ил. с. 189-218.
2. Пресс Ф. П. Фотолитография в производстве полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1968.
3. Введение в фотолитографию / Под ред. Лаврищева В. П. – М.: Энергия, 1977, с.35-48, с.138-151, с.199-205, с.277-280.