

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Факультет «Машиностроительные технологии»
Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Ю.С. Боброва, Ю.Б. Цветков

**Контактная фотолитография и
травление тонкопленочных структур**

*Методические указания к выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Процессы и оборудование микротехнологии»*

Москва

(С) 2018 МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Рецензент:

Боброва Ю.С., Цветков Ю.Б.

Контактная фотолитография и травление тонкопленочных структур: Метод. указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Процессы и оборудование микротехнологии» - М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2018. 40с.: 20ил.

Учебная цель методических указаний состоит в формировании у студентов навыков экспериментальной оценки разрешающей способности процесса контактной фотолитографии сухого пленочного фоторезиста и умения применить полученные навыки при создании защитного фотополимерного покрытия для реализации процесса жидкостного травления тонкопленочных токопроводящих структур на керамическом основании. На примере работы с негативным фоторезистом «Ordyl ALPHA 340» показаны основные этапы процесса фотолитографии. Большая часть методических указаний посвящена процедурам проведения экспериментов по определению разрешающей способности операций фотолитографии и жидкостного травления тонкопленочных медных структур, методике обработки полученных результатов травления и выявления на их основе бокового подтравки токопроводящих структур и неравномерности тонкопленочного покрытия по площади заготовки.

Издание может быть полезно для студентов, изучающих дисциплины: «Технология и оборудование микро- и нанозлектроники», «Процессы и оборудование микротехнологии».

Ил. 20, табл. 6

Рекомендовано учебно-методической комиссией факультета «Машиностроительные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Боброва Юлия Сергеевна,
Цветков Юрий Борисович**

Контактная фотолитография и травление тонкопленочных структур

© 2018 МГТУ имени Н.Э. Баумана

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	7
1.1. Основы процесса фотолитографии.....	7
1.1.1. Основные характеристики фоторезистов	8
1.1.2. Основные этапы фотолитографии	10
1.2. Основы процесса погружного химического травления	12
1.2.1. Боковой подтрав.....	12
1.2.2. Растворы для жидкостного травления меди	13
2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	14
Ламинатор GX12	14
Установка контактного экспонирования Mega Electronics AZ210.....	15
Цифровой USB-микроскоп Levenhuk DTX 90	17
Измеритель параметров RLC CHY Firemate E7-22.....	17
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	19
Лабораторная работа №1. Оценка разрешающей способности процесса фотолитографии	19
Определение оптимального времени экспонирования.....	19
Оценка влияния микрозазора на разрешение	20
Оценка времени экспонирования по шаблону с градацией оптической плотности	20
Порядок выполнения лабораторной работы №1	22
Вопросы для самоконтроля и оценки уровня готовности к выполнению лабораторной работы №1	25
Вопросы к защите лабораторной работы №1	26
Лабораторная работа №2. Оценка бокового подтрав тонкопленочных структур	27
Распределение электрического сопротивления структур по полю заготовки	27
Оценка бокового подтрав тонкопленочных структур	29
Порядок выполнения лабораторной работы №2.....	29

Вопросы для самоконтроля и оценки уровня готовности к выполнению лабораторной работы №2	31
Вопросы к защите лабораторной работы №2	33
4. ОБЩИЕ ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	34
5. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	35
РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ	37
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	38
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	39

ВВЕДЕНИЕ

Фотолитография – это технологический процесс, применяющийся при микро- и нанообработке различных заготовок методами локального удаления материала (травление, абразивная обработка) или локального нанесения материала (напыление, химическое и электрохимическое осаждение).

Суть фотолитографии заключается в том, что на поверхность обрабатываемой заготовки наносится тонкий слой фоточувствительного кислото- и/или щёлочестойкого полимера – фоторезиста, в котором формируется сквозной рельеф, «окна» заданных размеров и формы, для чего слой фоторезиста экспонируется через фотошаблон, а затем проявляется.

Фотошаблон, содержащий требуемую топологию «окон», освещается равномерным потоком ультрафиолетового излучения, его изображение непосредственно или через оптическую систему передаётся в фоторезист. При облучении через прозрачные «окна» фотошаблона облучаемые участки фоторезиста необратимо меняют свои химические свойства, формируется скрытое изображение рисунка фотошаблона. В результате проявления скрытое изображение в фоторезисте превращается в рельеф.

Методы фотолитографии широко применяются в микро- и нанoeлектронике, полиграфии, художественной обработке изделий из стекла или металла и в других современных технологиях.

Цель лабораторных работ – формирование у студентов навыков экспериментальной оценки разрешающей способности фоторезиста и умения определять оптимальное время экспонирования (по критерию разрешение / адгезия) для формирования медных тонкопленочных структур на керамическом основании методом погружного жидкостного травления.

После выполнения лабораторных работ студенты смогут:

- формулировать требования к параметрам качества процессов микротехнологии;
- осуществлять практическую реализацию процессов микротехнологии, экспериментально определять и оценивать параметры процессов фотолитографии и жидкостного травления тонких пленок;
- на основе экспериментальных данных оценивать показатели качества процессов фотолитографии и травления металлических тонких пленок, выявлять лимитирующие факторы;

- анализировать причины возникновения бокового подтравы при погружном травлении проводников и причины, вызывающие отклонение от вертикали стенок профиля сечения фотополимерной защитной маски.

Работы проводятся на действующем технологическом оборудовании:

- ламинаторе для нанесения пленочного фоторезиста GX12, Mega Electronics,
- установке контактного экспонирования AZ210, Mega Electronics,
- установке химической обработки PCB 500S, Mega Electronics,

с использованием современных методов оценки разрешения процессов фотолитографии и травления.

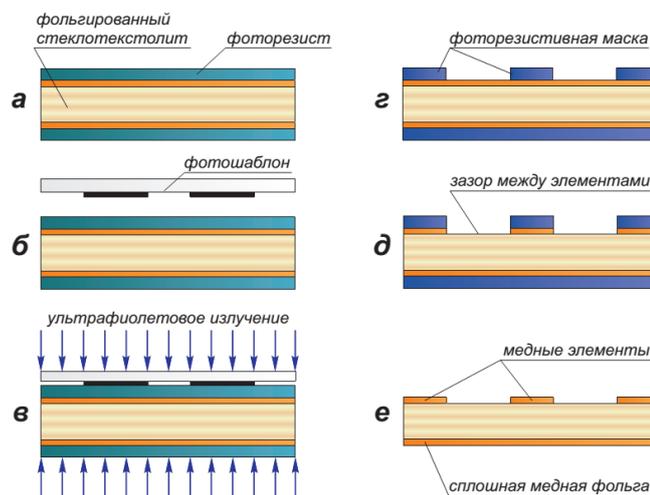
Перед началом работ студенты проходят инструктаж по технике безопасности. Затем проводится тестирование для оценки уровня подготовленности студентов к проведению лабораторных работ.

По окончании работ каждый студент представляет индивидуальные отчёты, выполненные по формам (см. Приложения 1 и 2), с ответами на контрольные вопросы. После проверки правильности оформления отчётов и защиты студенту выставляется рейтинговый балл, учитываемый при оценке модуля №4 дисциплины «Процессы и оборудование микротехнологии».

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Основы процесса фотолитографии

Рассмотрим применение фотолитографии на примере микрообработки печатных плат, типовые элементы которых характеризуются шириной от десятков до сотен микрометров.



а – фольгированный стеклотекстолит; б – нанесение фоторезиста; в – совмещение фотошаблона; г – экспонирование; д – проявление; е – локальное травление меди; ж – удаление фоторезиста

Рис. 1. Этапы фотолитографии на примере обработки печатных плат

В этом случае процесс включает следующие основные этапы (рис. 1):

- подготовку исходной поверхности заготовки (подложки) – фольгированного стеклотекстолита;
- нанесение на заготовку негативного пленочного фоторезиста, например, марки «Riston» компании «DuPont» (США), марки «Ordyl ALPHA 340» компании «Elga Europe» (Италия) или фоторезиста СПФ-ВЩ отечественного производства;
- совмещение фотошаблона со знаками совмещения на заготовке;
- экспонирование фоторезиста через пленочный фотошаблон ультрафиолетовым излучением, в результате чего в слое фоторезиста образуется скрытое изображение рисунка фотошаблона;
- проявление, т.е. превращение скрытого изображения в рельеф в фоторезисте;
- локальное травление слоя медной фольги на поверхности стеклотекстолита;
- удаление фоторезиста.

1.1.1. Основные характеристики фоторезистов

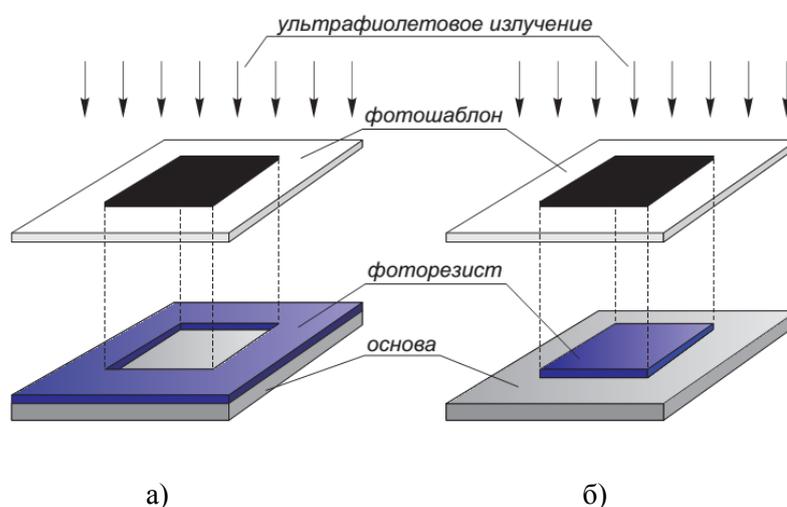
Фоторезисты должны обладать следующими свойствами:

- иметь высокую чувствительность и разрешающую способность;
- быть устойчивыми к воздействию агрессивных растворов травления;
- иметь хорошую адгезию к подложке;
- быть механически прочными.

Основой всех фоторезистов служат полимерные материалы, обладающие хорошими пленкообразующими и адгезионными качествами.

Главной особенностью является то, что под действием излучения определённой длины волны в облучённых участках фоторезистов происходят необратимые изменения – они резко меняют растворимость в соответствующих проявителях.

Различают позитивные и негативные фоторезисты. В негативных фоторезистах облученные участки благодаря фотополимеризации становятся стойкими к воздействию проявителя и в отличие от необлучённых участков остаются на подложке при проявлении (рис. 2, а). В позитивных фоторезистах облучённые участки за счёт фотодеструкции растворяются (удаляются) в проявителях, а необлучённые остаются и образуют фоторезистивную маску (рис.2, б).



1 – ультрафиолетовое излучение; 2 – фотошаблон; 3 – фоторезист; 4 – подложка

Рис. 2. Формирование фоторезистивной маски в негативном (а) и позитивном (б) фоторезистах после проявления

Рассмотрим свойства негативного пленочного фоторезиста, наиболее широко применяемого при микрообработке печатных плат.

В негативном фоторезисте экспонирование ультрафиолетовым излучением приводит к поперечной сшивке молекул базового полимера и к резкому увеличению

молекулярной массы молекул, т.е. к образованию трёхмерной сетки соединённых между собой полимерных молекул (рис.3). При этом резко уменьшается растворимость образовавшейся полимерной структуры в проявителе.

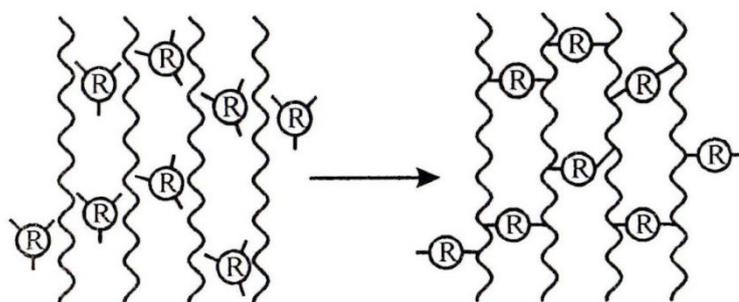


Рис.3. Соединение молекул мономера в полимерные макромолекулы

В современном производстве печатных плат широко применяется пленочный негативный фоторезист марки «Ordyl ALPHA 340» компании «Elga Europe» (Италия), он содержит фотополимеризирующую смесь и краситель для контроля степени проявления фоторезиста.

Важным параметром фоторезистивной маски является профиль рельефа, сформированного в фоторезисте.

Все боковые стенки профиля рельефа должны быть практически вертикальными и должны иметь резкие, точно определяемые границы с поверхностью слоя медной фольги (рис.4). Поверхность фоторезиста после сушки должна быть глянцевой и иметь резкие или слегка закруглённые края.

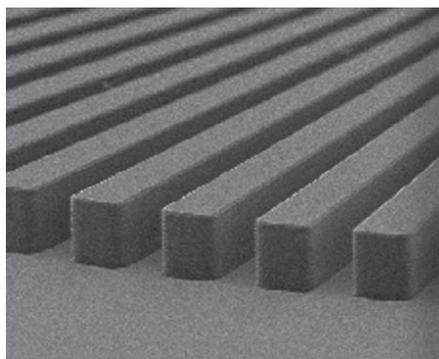


Рис.4. Профиль фоторезистивной маски

При контроле фоторезистивной маски с помощью микроскопа часто обнаруживаются отклонения параметров профиля от требуемых (рис.5). Основными причинами отклонений являются: неточный подбор времени экспонирования, неплотный прижим фотошаблона к заготовке, нерезкость края изображения на фотошаблоне.

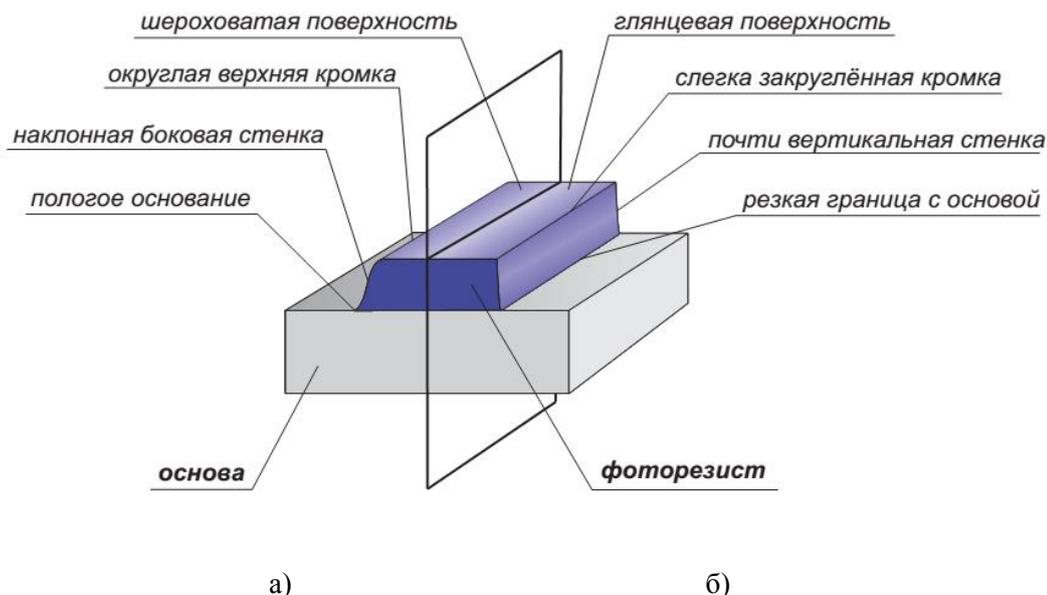


Рис.5. Характеристики профиля в пленочном фоторезисте: а) реальные; б) требуемые

1.1.2. Основные этапы фотолитографии

Рассмотрим особенности выполнения основных этапов процесса фотолитографии.

При подготовке поверхности необходимо, чтобы на поверхности заготовки печатной платы не было загрязнений (пыли после механической обработки, органических загрязнений), адсорбированных жидкостей, газов. Поверхность заготовки (подложки) должна иметь требуемую шероховатость для того, чтобы исключить отслаивание фоторезиста от подложки во время травления и локальное протравливание участков, защищённых фоторезистом.

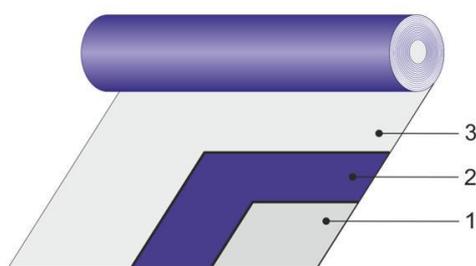
Очистка поверхности печатных плат производится водными растворами и смесями моющих средств с поверхностно-активными веществами при воздействии на обрабатываемую поверхность водными струями и щётками. Между последовательными этапами очистки предусмотрены операции отмывки заготовок теплой проточной водой.

Контроль качества очистки проводится по смачиваемости поверхности платы холодной водой. Вода, налитая на поверхность наклонённой под углом 65-70° заготовки, должна образовывать на её поверхности сплошную пленку, не имеющую зон разрыва, на протяжении 1,5-2 минут.

Отмытую заготовку сушат струёй очищенного воздуха, после чего она подаётся на операцию нанесения фоторезиста.

Сухой негативный пленочный фоторезист наносят на подготовленную заготовку печатной платы при помощи специального устройства – ламинатора – методом накатки. Перед нанесением заготовку и валки ламинатора разогревают до температуры 95...120 °С, чтобы фоторезист прилип к поверхности заготовки.

Сухой фоторезист изготавливается в виде многослойной пленки, в которой центральный слой клейкой фотополимеризующейся смеси сверху покрыт пленками майлара (лавсана) и полиолефина (полиэтилена) (рис.6). Светочувствительный слой экспонируется через майлар, предохраняющий этот слой от проколов при прижиме к фотошаблону, а также изолирующий его от кислорода внешней среды.



1 – покрывная пленка из майлара; 2 – полимерный пленочный фоторезист; 3 – разделительная плёнка из полиэтилена

Рис.6. Сухой пленочный фоторезист типа «Ordyl ALPHA 340» компании «Elga Europe»

Чувствительность сухих фоточувствительных пленок, изготавливаемых толщиной 30...50 мкм, составляет около 30...75 мДж/см² на длине волны 365...430 нм.

Экспонирование в контактной фотолитографии ведётся при плотном прижиме фотошаблона к подложке. Это должно уменьшить рассеяние излучения, которое искажает профиль интенсивности падающего излучения и, как следствие, профиль рельефа в фоторезисте. Следует иметь в виду, что обеспечить плотный контакт даже для гибкого пленочного фотошаблона довольно сложно.

Прослойка воздуха между фотошаблоном и подложкой, пылинки и другие инородные частицы между ними – главные причины того, что между фотошаблоном и подложкой могут остаться микрозазоры. Основным способом плотного прижима фотошаблона к заготовке является прижим его прозрачной плёнкой путём вакуумирования полости под этой плёнкой.

Экспонирование ведут, обязательно располагая пленочный фотошаблон «эмульсией вниз», т.е. максимально уменьшая расстояние между рисунком на фотошаблоне и поверхностью фоторезиста. Отметим, что изображение на заготовке

получается зеркальным по отношению к изображению в слое эмульсии на фотошаблоне. Однако, даже при максимальном прижиге рассеяние экспонирующего излучения по толщине слоя фоторезиста приводит к искажениям изображения и является основным ограничением разрешающей способности процесса.

Проявление. После экспонирования защитная плёнка майлара удаляется и светочувствительный слой проявляется в 0,8...1,2 %-ном растворе Na_2CO_3 при температуре не выше $+40\text{ }^\circ\text{C}$.

1.2. Основы процесса погружного химического травления

Рассмотрим применение процесса погружного химического травления на примере микрообработки тонкопленочных плат на керамике, типовые элементы которых характеризуются шириной от нескольких десятков до сотен микрометров, а их толщина составляет от 100 до 500 нм.

Отличительной особенностью технологии получения плат на керамике от технологии изготовления печатных плат является формирование слоя металлизации осаждением тонких пленок в вакууме. После процесса металлизации следуют традиционные процессы фотолитографии и травления (в случае применения субтрактивной технологии формирования токопроводящих структур).

Защитная полимерная маска должна выдерживать процесс травления в течение десятков секунд для тонких пленок (десятков минут в случае печатных плат).

1.2.1. Боковой подтрав

Погружной жидкостный способ травления рисунка является наиболее простым в реализации, так как для его осуществления достаточно иметь емкость с раствором, способным травить необходимый металл. Суть процесса заключается в химической реакции восстановления-окисления, за счет которой металл пленки удаляется из-за окисления растворами травления. Стоит учитывать факт того, что для жидкостного метода из-за невозможности контролировать направление травления характерно явление бокового подтрав под фотополимерную маску (рис. 7). Подтрав сильно влияет на качество получаемых структур.

Величину бокового подтрав при погружном жидкостном травлении можно уменьшать различными путями, например:

- подбором минимально необходимого времени травления;
- подбором состава раствора;

- созданием поступательного движения раствора над поверхностью травления и др.

При травлении тонких пленок можно добиться бокового подтравки не превышающего 2 – 5% от ширины фоторезистивной маски над элементом (в случае печатных плат – это 8 – 15% в зависимости от толщины металлизации).

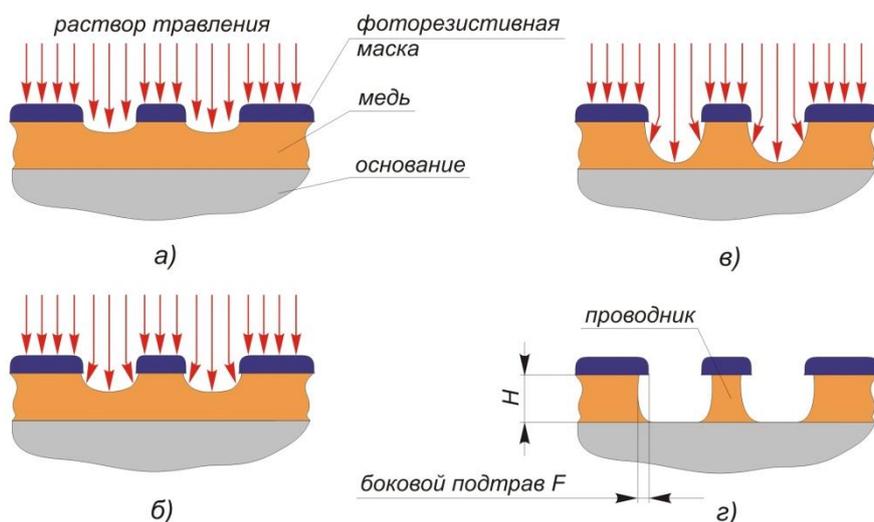


Рис. 7. Стадии процесса химического травления: а) начало процесса; б) поверхностное травление; в) начало образования подтравки; г) полное протравливание

1.2.2. Растворы для жидкостного травления меди

Для медных (никелевых) пленок используют следующие растворы травления (табл. 1).

Таблица 1. Основные растворы для травления медных и никелевых пленок

№	Состав раствора
1	Концентрированная соляная кислота (HCl)
2	8 г FeCl ₃ , 25 мл HCl, 100 мл H ₂ O
3	10 г FeCl ₃ , 20 мл HCl, 20-30 мл H ₂ O
4	40-50% водный раствор FeCl ₃
5	11 г (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ ; 100 мл H ₂ O
6	Концентрированная азотная кислота (HNO ₃)

2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ламинатор GX12

Ламинатор (рис.8) применяется для нанесения пленочного фоторезиста на заготовки печатных плат с целью защиты металлизированных отверстий и проводников при последующем травлении меди. Фоторезист одновременно наносится на обе поверхности заготовки. Установка поддерживает требуемые усилие прижима, температуру и скорость ламинирования (табл.2). Ламинатор обладает относительно мягким покрытием валов, что позволяет наносить фоторезист на хрупкие подложки кремния, керамики, стекла.



Рис.8. Ламинатор

Таблица 2. Технические характеристики ламинатора

Характеристика	Значение
Максимальная ширина ламинирования	350 мм
Максимальная толщина заготовок	4 мм
Температура нагрева прижимных валков	До 160°C
Время разогрева прижимных валков	От 6 до 10 мин.
Скорость ламинирования	0..1,6 м/мин

Для регулирования зазора между валами и для обеспечения необходимого прижима пленочного фоторезиста к поверхности заготовки у ламинатора справа от рабочей зоны размещен механизм управления зазором между валами (рис. 9).

В таблице 3 приведены рекомендации по выставлению зазора в зависимости от толщины заготовки.



Рис. 9. Выставление зазора между валами ламинатора. Выбран паз № 2

Таблица 3. Выставление зазора между валами ламинатора

Толщина заготовки, мм	Номер паза	Примечание
0,05-0,3	1	На заготовки тоньше 0,1 мм накатывать фоторезист с одной стороны, подкладывая с другой стороны листы и доводя тем самым общую толщину до 0,2 мм
0,4-0,9	2	Накатывание фоторезиста на заготовки внутренних слоев многослойных печатных плат, на керамические подложки
1,0-1,9	3	Наиболее распространённая толщина заготовок фольгированного стеклотекстолита 1,5 мм
2,0-2,5	4	Накатывание фоторезиста на внешние слои многослойных печатных плат

Установка контактного экспонирования Mega Electronics AZ210

При проведении лабораторных работ используется установка контактного экспонирования, выполненная в виде настольного блока с откидывающейся крышкой (рис. 10). В таблице 4 приведены основные характеристики установки.



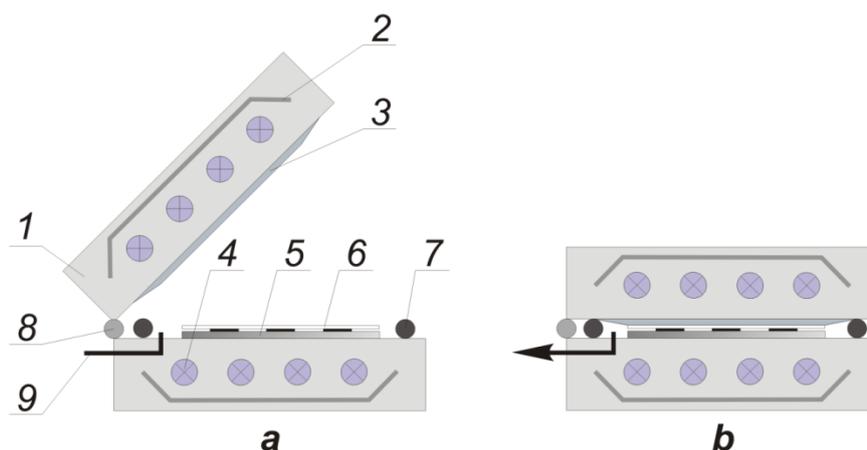
Рис.10. Установка контактного экспонирования

Таблица 4. Технические характеристики установки контактного экспонирования

Характеристика	Значение
Источник УФ-излучения	8 ртутных ламп
Выходная мощность	8 x 15 Вт
Длина волны излучения (максимум спектра)	365 нм
Таймер	0..999 с
Размер рабочего поля	260 x 355 мм

Установка экспонирования (рис. 11) включает в себя два осветителя, один из которых находится в крышке, а другой – в корпусе. Каждый осветитель состоит из четырех люминесцентных ламп по 15 Вт каждая с отражающим плоским рифленным экраном-отражателем. Установка позволяет проводить экспонирование заготовки одновременно с двух сторон. При отключении ламп, расположенных в нижней части, установка может быть использована для одностороннего экспонирования.

Нижняя рама установки состоит из стеклянного основания, а верхняя – из прозрачной пленки, которая изгибаясь при создании технического вакуума около 20 кПа (0,2 атм), прижимает фотошаблон к заготовке. Экспонирование проводится при одновременном включении верхних и нижних источников излучения. По истечении заданного времени, которое фиксируется таймером, под прозрачную пленку напускается воздух, крышка открывается для извлечения заготовки.



1 – крышка корпуса с верхним рядом ламп; 2 – гибкая пленка; 3 – отражатель; 4 – источник излучения (УФ-лампы); 5 – фотошаблон; 6 – заготовка с фоторезистом на поверхности; 7 – резиновый уплотнитель; 8 – вакуумный ввод; 9 – шарнир

Рис.11. Установка двухстороннего контактного экспонирования печатных плат: а – загрузка заготовки; б – экспонирование

Для проведения контрольно-измерительных операций в лабораторных работах используются оптический микроскоп (кратность увеличения 40х-250х) и измеритель параметров RLC (или мультиметр, позволяющий измерять сопротивление в единицы и десятки Ом).

Цифровой USB-микроскоп Levenhuk DTX 90

Микроскоп (рис.12) позволяет рассмотреть объекты размером 100-250 мкм, а также измерить их линейные размеры с точностью, достаточной для осуществления контроля качества при производстве печатных плат в лабораторных условиях (таблица 5).



Рис.12. Цифровой USB-микроскоп

Таблица 5. Технические характеристики цифрового USB-микроскопа

Характеристика	Значение
Кратность увеличения	10х-300х
Точность измерения линейных размеров	±25 мкм
Разрешение камеры	5 Мп
Тип подсветки	В падающем свете
Источник подсветки	8 светодиодов

Измеритель параметров RLC CHY Firemate E7-22

Прибор (рис.13) позволяет исследовать электрические параметры тестовых структур платы: измерять ёмкость, индуктивность, тангенс угла потерь, добротность, сопротивление переменному току, эквивалентное последовательное/параллельное сопротивление.



Рис.13. Измеритель параметров RLC

Интервалы значений и погрешности измерений прибора RLC CHY Firemate E7-22 приведены в таблице 6.

Таблица 6. Технические характеристики измерителя параметров RLC

Характеристика	Значение
Измерение сопротивления	20 - 10 МОм
Погрешность измерения сопротивления	$\pm (0.5..0.8 \% + 3 \text{ ед. мл. разряда})$ 200 Ом-2000 кОм
	$\pm (1.2..2 \% + 8 \text{ ед. мл. разряда})$ 20 Ом, 10 МОм
Измерение емкости	2000 пФ - мФ
Погрешность измерения емкости	$\pm (0.7 \% + 3 \text{ ед. мл. разряда})$ 20 нФ - 200 мкФ, ($D < 0.5$)
	$\pm (1..5 \% + 5 \text{ ед.})$ 2000 пФ, 2000 мкФ, 20 мФ ($D < 0.1$)
Измерение индуктивности	2000 мкГн - 10000 Гн
Погрешность измерения индуктивности	$\pm (0.7 \% + 5 \text{ ед. мл. разряда})$ 200 мГн - 200 Гн
	$\pm (1..2 \% + 5 \text{ ед. мл. разряда})$ 2000 мкГн, 20 мГн, 2000 Гн
	Не нормируется на пределе 10000 Гн
Тест-сигнал	120 Гц, 1 кГц, (ручной выбор), 0.5 В

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Лабораторная работа №1. Оценка разрешающей способности процесса фотолитографии

Цель работы – приобретение практических навыков реализации процессов фотолитографии, выявления и анализа факторов, определяющих ключевой параметр процесса – разрешение.

При воспроизведении изображения на светочувствительных слоях (фотоэмульсии, фоторезисте) предельное разрешение будет зависеть от условий передачи изображения, свойств слоев и способа их фотохимической обработки.

На практике разрешающая способность определяется по предельному числу линий, воспроизведенных на 1 мм длины изображения. Типовым тестовым объектом микролитографии является решетка с одинаковыми прозрачными и непрозрачными полосами (линиями) (рис. 14). В этом случае разрешение эквивалентно пространственной частоте ν решетки с шагом P :

$$\nu = \frac{1}{2w} = \frac{1}{P}.$$

В данной работе необходимо оценить влияние на разрешение следующих факторов:

- 1) времени экспонирования;
- 2) микрозазора между фотошаблоном и слоем фоторезиста.

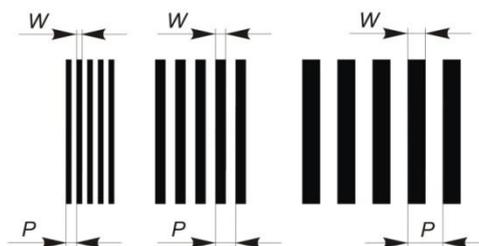


Рис. 14. Ширина линии и период решетки

Определение оптимального времени экспонирования

Время экспонирования фоторезиста является важным параметром фотолитографии по следующим причинам. Разрешающая способность негативных сшивающихся фоторезистов ограничена дифракцией излучения, рассеянием падающего и отраженного экспонирующих излучений. Это ведет к паразитной засветке края неэкспонированных участков и вызывает частичную полимеризацию

слоя, что приводит к появлению ореола, увеличивающего действительный размер изображения. Поэтому в целом ширина линии растёт с ростом дозы экспонирования.

В связи с этим, время экспонирования должно быть достаточным для полной фотополимеризации экспонированных участков и, вместе с тем, минимально возможным для уменьшения потери разрешения.

Задачей данной части работы является определение минимального времени экспонирования, обеспечивающего максимальное разрешение.

Для оценки разрешения и влияния на него различных факторов будем использовать расширяющийся (клиновой) растр (рис. 15).

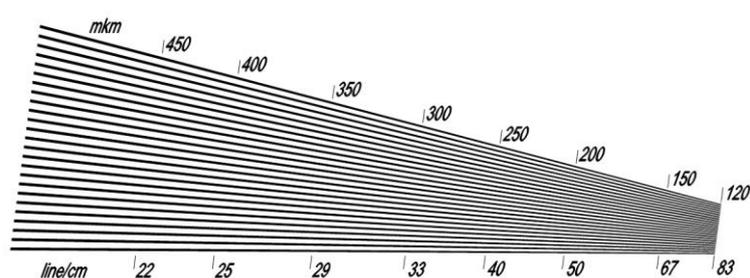


Рис. 15. Тестовый шаблон (клиновой растр)

Следует провести ряд экспериментов при постепенном изменении времени экспонирования и выбрать наилучший результат. Результаты представить в графическом виде.

Оценка влияния микрозазора на разрешение

Используя установленное ранее оптимальное время экспонирования оценить влияние микрозазоров при экспонировании. Для этого при ранее определенном оптимальном времени провести экспонирование через фотошаблон «эмульсией вверх».

Оценка времени экспонирования по шаблону с градацией оптической плотности

В общем случае, время, необходимое для фотополимеризации зависит от чувствительности фоторезиста и мощности источника излучения.

Чувствительность указывается изготовителем фоторезиста, он же обычно поставляет специальные шаблоны с участками, имеющими строго фиксированные градации оптической плотности. Например, широко известный шаблон Стоуффера (Stouffer) содержит 21 участок, оптическая плотность которых изменяется от прозрачного – участок №1, до непрозрачного – участок №21. Изменение плотности

между смежными участками подобрано таким образом, что для ультрафиолетового излучения переход к соседнему участку требует увеличения времени экспонирования в $\sqrt{2}$ раз при той же мощности источника.

После экспонирования шаблона Стоуффера и проявления (рис. 16) на фоторезисте находится участок с максимальным номером («номер экспонирования»), в котором еще сохранились остатки фоторезиста (на нашем рисунке это № 10). Найденное значение сравнивается с диапазоном номеров, рекомендуемых производителем фоторезиста, например 7...9.

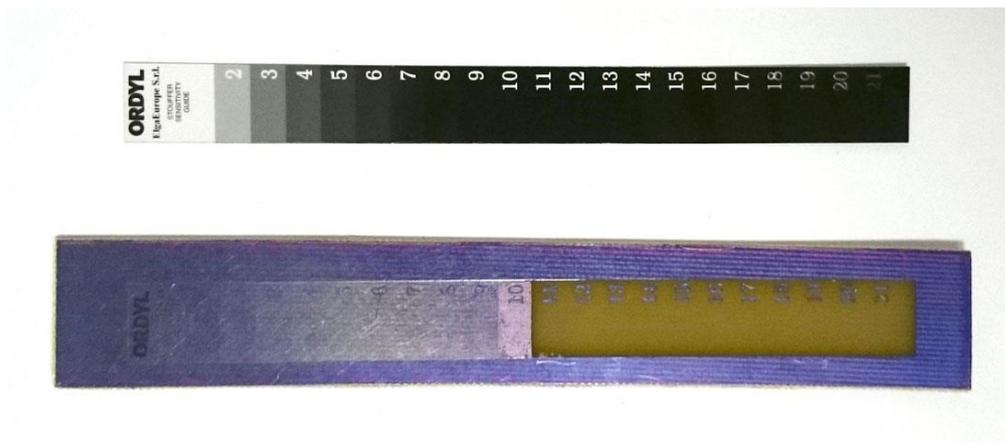


Рис. 16. Шаблон «Ordyl» (аналог шаблона Стоуффера) и фоторезистивная маска после его экспонирования

Далее следует коррекция времени экспонирования. Очевидно, что для сохранения на заготовке участков с более высокими номерами необходимо увеличить время экспонирования, так, чтобы суммарная экспозиция даже на мало прозрачных участках была достаточна для сшивки.

В нашем примере для получения среднего номера из заданного диапазона (примем его равным 8) необходимо увеличить время в

$$1,414 \cdot 1,414 = 2 \text{ раза.}$$

Если полученный номер экспонирования превышает рекомендуемый, это означает, что время экспонирования завышено. Для его коррекции используется процедура, аналогичная ранее рассмотренной, но исходное время делится на полученный коэффициент.

Используемый фоторезист «Ordyl» имеет большие допуски на технологические параметры, что облегчает его промышленное использование. Поэтому в спецификации данного фоторезиста указан довольно широкий диапазон номеров шаблона фирмы-производителя. Данный шаблон аналогичен шаблону Стоуффера и имеет 21 участок с

различной оптической плотностью. Диапазон приемлемых номеров участков составляет 7...9.

Задачей данного раздела работы является оценка номера шаблона «Ordyl», характеризующего фоторезист, применяемый в наших лабораторных условиях.

По существу необходимо определить номер шаблона и соответствующее ему время экспонирования, обеспечивающее максимальное разрешение. Для этого предварительно определяется время экспонирования с максимальным разрешением, а затем при этом времени определяется соответствующий номер. В дальнейшем он может использоваться для контроля параметров установки экспонирования при длительной ее эксплуатации.

Порядок выполнения лабораторной работы №1

1.1. Подготовиться к проведению лабораторной работы. Изучить методические указания, заготовить (распечатать) форму отчёта (см. Приложение 1). Ответить на вопросы, предназначенные для контроля готовности к выполнению лабораторной работы. Отсутствие заготовки отчёта и незнание ответов на вопросы являются основанием к недопуску студента к выполнению лабораторной работы №1.

1.2. Пройти инструктаж по технике безопасности работы на технологическом и контрольно-измерительном оборудовании и расписаться в журнале.

1.3. Научиться определять (с помощью преподавателя) сторону эмульсии у пленочных фотошаблонов.

1.4. Получить у преподавателя заготовку фольгированного стеклотекстолита с нанесённым слоем фоторезиста «Ordyl Alpha 340», фотошаблон с клиновым растром и план проведения эксперимента (времена экспонирования и размещение эмульсии фотошаблона относительно поверхности фоторезиста).

1.5. Включить установку экспонирования.

1.6. Поднять крышку корпуса с рядом верхних ламп и разместить на нижней стеклянной части корпуса заготовку.

1.7. Разместить фотошаблон клинового растра эмульсией ВНИЗ и защитить неиспользуемую в данный момент часть заготовки неактивной черной светонепроницаемой бумагой. При этом необходимо следить за тем, чтобы заготовка и/или бумага не выступали за ограничительный периметр зоны вакуумирования.

1.8. Закрывать крышку корпуса, установить запланированное время экспонирования t_1 при помощи сенсорной панели управления на лицевой части установки, перевести тумблер в нижнее положение и нажать «Start».

1.9. После звукового сигнала, сообщающего о завершении экспонирования, открыть установку и поднять крышку корпуса.

1.10. Разместить фотошаблон клинового раstra эмульсией ВНИЗ на свободном поле заготовки и защитить скрытое изображение и неиспользуемую в данный момент часть заготовки неактивной черной светонепроницаемой бумагой, продолжая следить за тем, чтобы заготовка и/или бумага не выступали за ограничительный периметр зоны вакуумирования.

1.11. Закрывать крышку корпуса, установить запланированное время экспонирования t_2 при помощи сенсорной панели управления на лицевой части установки, перевести тумблер в нижнее положение и нажать «Start».

1.12. После звукового сигнала, сообщающего о завершении экспонирования, открыть установку и поднять крышку корпуса.

1.13. Повторить п.1.10 – п.1.12 для времени экспонирования t_3 .

1.14. Разместить фотошаблон клинового раstra эмульсией ВВЕРХ на свободном поле заготовки и защитить скрытое изображение и неиспользуемую в данный момент часть заготовки неактивной черной светонепроницаемой бумагой.

1.15. Повторить п.1.11 – п.1.12 для времени экспонирования t_4 .

1.17. Разместить фотошаблон «Ordyl» эмульсией вниз на свободном поле заготовки и защитить скрытое изображение и неиспользуемую в данный момент часть заготовки неактивной черной светонепроницаемой бумагой.

1.18. Закрывать крышку корпуса, установить запланированное время экспонирования t_5 при помощи сенсорной панели управления на лицевой части установки, перевести тумблер в нижнее положение и нажать «Start».

1.19. После звукового сигнала, сообщающего о завершении экспонирования, открыть установку и поднять крышку корпуса.

1.20. Если на обратную сторону заготовки нанесён фоторезист необходимо заэкспонировать его в течение 30 с, предварительно защитив сторону со скрытыми изображениями неактивной черной светонепроницаемой бумагой.

1.21. Перед проявлением провести сравнительный анализ интенсивности окраски скрытых изображений и сделать вывод о влиянии на неё времени экспонирования.

1.22. Снять с заготовки защитные оптически прозрачные майларовые пленки.

1.23. Проявить скрытое изображение, полученное в фоторезисте, в 1%-м водном растворе Na_2CO_3 при комнатной температуре в течение 1,5-2,5 мин.

1.24. Промыть заготовку под холодной проточной водой.

1.25. Погрузить заготовку в в 50%-й водный раствор хлорного железа (FeCl_3) на 20 -30 с.

1.24. Промыть заготовку под холодной проточной водой.

1.25. Высушить заготовку.

1.26. При помощи USB-микроскопа оценить количество линий/см для всех полученных рельефов клинового растра. Для этого необходимо при помощи простого карандаша отделить зону, где отсутствует фоторезист и началось травление меди, от зоны, где осталась тонкая пленка фоторезиста, препятствующая травлению меди, проведя перпендикуляр к биссектрисе клинового растра.

1.27. Перейти от разрешения в количестве линий в сантиметре к разрешению в мкм для всех времён экспонирования.

1.28. Построить график зависимости разрешения от времени экспонирования фотошаблона клинового растра эмульсией вниз.

1.29. Определить номер экспонирования по шкале «Ordyl».

1.29. Заполнить отчёт и сделать выводы о взаимосвязи разрешающей способности процесса фотолитографии и времени экспонирования.

1.30. На обратной стороне отчёта ответить на контрольные вопросы, указанные преподавателем.

Вопросы для самоконтроля и оценки уровня готовности к выполнению лабораторной работы №1

1. Цель процесса фотолитографии заключается в получении:
 - а) полимерной защитной маски;
 - б) скрытого изображения в фоторезисте;
 - в) рисунка из меди.
2. Для получения излучения, которое засвечивает фоточувствительные полимеры, в том числе фоторезисты, за несколько секунд, используют лампы, наполненные:
 - а) ксеноном; б) парами ртути; в) гелием.
3. Скрытое изображение в фоторезисте водощелочного проявления, полученное после экспонирования, проявляют:
 - а) в воде (H_2O);
 - б) в 10%-м водном растворе серной кислоты (H_2SO_4);
 - в) в 1%-м водном растворе карбоната натрия (Na_2CO_3).
4. Если после экспонирования фоторезист остается на заготовке (полимеризуется), то он называется:
 - а) позитивным; б) негативным; в) нейтральным.
5. Если после проявления фоторезиста получены более широкие линии, чем на фотошаблоне, то это может означать, что:
 - а) время экспонирования было слишком большим;
 - б) время проявления было слишком большим;
 - в) влажность воздуха в помещении выше требуемого значения.
6. Как будет выглядеть надпись на фотошаблоне со стороны эмульсии, если на плате нужно получить надпись R0:
 - а) R0; б) 0R; в) 0Я.
7. В случае контактной фотолитографии фотошаблон прикладывают максимально плотно к фоторезисту для того, чтобы:
 - а) минимизировать боковое засвечивание;
 - б) сделать боковое засвечивание больше;
 - в) устранить погрешность совмещения заготовки с фотошаблоном.
8. Боковое засвечивание приводит к тому, что:
 - а) зазоры между элементами маски из негативного фоторезиста становятся шире;
 - б) негативный фоторезист не реагирует на боковое засвечивание;
 - в) элементы маски из негативного фоторезиста становятся шире.

9. Чем дольше длилось экспонирование сухого пленочного фоторезиста, тем скрытое изображение в нем будет:

- а) ярче;
- б) бледнее;
- в) разница не будет различима невооруженным глазом.

Вопросы к защите лабораторной работы №1

1. Задайте размеры линий на микроизображении (например: 0,2 мкм, 1,0 мкм, 50 мкм) и рассчитайте показатель разрешения как «число пар линий на миллиметр».
2. При ближайшем рассмотрении линии растра тестового шаблона оказываются клиновидными. Тем не менее, он используется для оценки разрешения, аналогично растрам с параллельными линиями. Обоснуйте возможность такого использования тестового шаблона.
3. Составьте примерный график зависимости разрешения от величины времени экспонирования. Что будет с фоторезистом при явно недостаточном времени экспонирования? При слишком большом времени экспонирования?
4. Как повлияет на разрешение отключение прижима фотошаблона и экспонирование «эмульсией вверх»?
5. Для фоторезиста производителем задан номер 9 по шаблону Стоуффера. При подборе времени экспонирования получен «номер экспонирования» 14. Как нужно корректировать время экспонирования: увеличивать или уменьшать и во сколько раз?
6. Как влияет теплопроводность заготовки на процесс нанесения пленочного фоторезиста ламинированием? Предложите режимы процесса ламинирования сухим пленочным фоторезистом стальной заготовки размером 200x150x1,0 мм на ламинаторе GX12.
7. Какие длины волн должны преобладать в спектре излучения при экспонировании сухих пленочных фоторезистов типа «Ordyl ALPHA 340»? К чему приведёт преобладание волн большей длины при экспонировании такого фоторезиста?
8. На основании знаний, полученных в ходе выполнения лабораторной работы, составьте методику определения времени экспонирования сухого пленочного фоторезиста для получения максимального разрешения процесса фотолитографии.

Лабораторная работа №2. Оценка бокового подтравки тонкопленочных структур

Цель работы – приобретение практических навыков по выявлению факторов, определяющих величину бокового подтравки тонкопленочных токопроводящих структур при погружном жидкостном травлении, освоение метода определения неравномерности тонкопленочного покрытия по площади заготовки.

В ходе выполнения лабораторной работы №2 в качестве опытного образца используется керамическая заготовка (ситалл, поликор или нитрид алюминия) размером 48x60x0,5 мм с пленкой, полученной в ходе выполнения работы «Изучение процесса формирования тонкопленочных покрытий методом магнетронного распыления».

Основные режимы экспонирования при получении фоторезистивной маски (рис. 17) выбираются на основании ширины наиболее узких токопроводящих структур согласно данным, полученным в ходе выполнения работы №1 «Оценка разрешающей способности процесса фотолитографии».

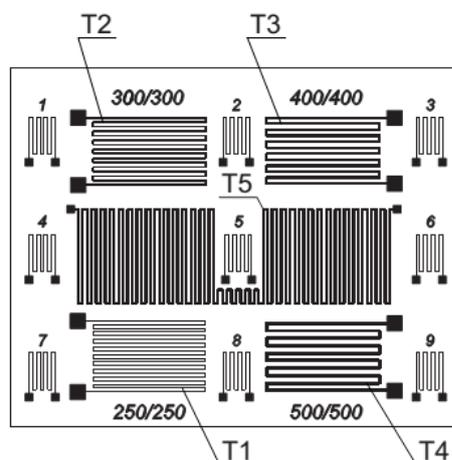


Рис. 17. Тестовые структуры

Отношение ширины проводника к зазору пишется через «/». Надпись 250 / 250 означает, что данная структура представляет собой проводник шириной 250 мкм, сегменты которого отделены друг от друга зазором в 250 мкм.

Распределение электрического сопротивления структур по полю заготовки

Вследствие операции травления не изменяются толщина токопроводящей пленки и ее материал. Изменяется только ширина проводника (рис. 18).

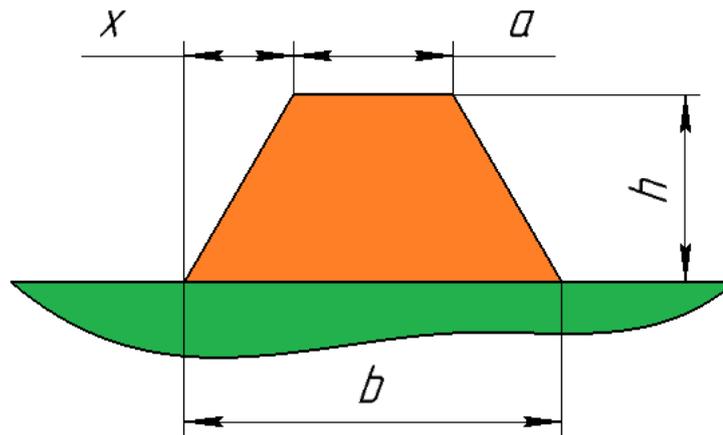


Рис. 18. Расчетная модель

Для получения формулы определения толщины пленки примем, что сечение принимает форму трапеции, на самом же деле боковая грань является линией порядка выше второго. С этими допущениями выведем формулу для определения толщины проводника:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (1)$$

$$S = \frac{a + b}{2} \cdot h, \quad (2)$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{\frac{a + b}{2} \cdot h} \rightarrow h = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{(a + b) \cdot R}. \quad (3)$$

Параметр « l » считается длиной всего меандра (плотно упакованной структуры).

Точность расчета по данной методике уменьшается вместе с уменьшением толщины протравливаемого покрытия. Рассчитывать толщину тонкой пленки по представленной выше методике проблематично из-за сложности измерения параметров a и b .

Для оценки распределения толщины тонкой пленки по полю заготовки достаточно снять электрическое сопротивление единообразных структур №1-№9 и на основании обратной зависимости между электрическим сопротивлением и площадью сечения проводника (1) сделать заключение о распределении толщины пленки по полю заготовки.

Оценка бокового подтрав тонкопленочных структур

На основании данных об электрическом сопротивлении токопроводящих структур (формула (1)) можно оценить боковой подтрав проводников. Это делается через отношение планируемой (проектной) площади сечения проводника и косвенно измеренной площади сечения (рис. 19):

$$\Delta = \left(\frac{S_{\text{изм}}}{S_{\text{пр}}} \right) \cdot 100\%. \quad (4)$$



Рис.19. Площадь сечения проводников после травления: а) планируемая; б) измеренная

При последующих расчетах и оценках геометрических параметров токопроводящих структур (например, длины проводников), обязательно следует учитывать величину Δ , полученную по формуле (4).

Порядок выполнения лабораторной работы №2

1.1. Подготовиться к проведению лабораторной работы. Изучить методические указания, заготовить (распечатать) форму отчёта (см. Приложение 2). Ответить на вопросы, предназначенные для контроля готовности к выполнению лабораторной работы. Отсутствие заготовки отчёта и незнание ответов на вопросы являются основанием к недопуску студента к выполнению лабораторной работы №2.

1.2. Пройти инструктаж по технике безопасности работы на технологическом и контрольно-измерительном оборудовании и расписаться в журнале.

1.3. Подготовить ламинатор к нанесению фоторезиста:

- включить ламинатор;
- выставить температуру нагрева валов 105 °С;
- выставить скорость нанесения фоторезиста 2 (соответствует 0,6 м/мин.);
- после нагрева валов до 105 °С выставить зазор между валами, зафиксировав ручку в пазу №1;

- убрать столик, для предотвращения раскалывания образца в процессе нанесения фоторезиста;
- запустив ламинатор в работу кнопкой «Run», пропустить 120-150 мм фоторезиста.

1.4. Накатать фоторезист на керамический образец с тонкой медной пленкой.

1.5. Обрезать фоторезист ножницами или канцелярским ножом по контуру образца (рис. 20).



а)



б)

Рис. 20 Пример обрезки фоторезиста: а) правильно; б) неправильно

1.6. Провести экспонирование образцов в установке экспонирования AZ210 нижними лампами. Фотошаблон разместить эмульсией к фоторезисту. Время экспонирования выбрать из интервала 18...22 сек.

1.7. Снять защитную пленку с обеих сторон образца и проявить скрытое изображение в 0,8-1,2% водном растворе Na_2CO_3 .

1.8. Промыть проявленные образцы под проточной водой.

1.9. Травить незащищенные фоторезистивной маской участки тонкой медной пленки в 40-50% водном растворе FeCl_3 . Для этого следует:

- используя пинцет погрузить образец в раствор и засечь время до протравливания тонкой пленки до белой керамической подложки;
- по истечении времени травления (10-30 с) вынуть образец;
- быстро погрузить образец в «стон-ванну» с водой для прекращения процесса травления;
- промыть образец под проточной водой;
- при помощи фена высушить образец.

1.10. Удалить фоторезистивную маску в 3-6% водном растворе KOH или NaOH.

1.11. Промыть образец под проточной водой.

1.12. При помощи фена высушить образец.

1.13. Используя RLC-измеритель E7-22 измерить сопротивление резистивных структур №1-№9 и занести в отчет. По распределению электрического сопротивления структур №1-№9 по полю заготовки сделать выводы о распределении толщины тонкой пленки по полю заготовки и о положении заготовки относительно магнетрона в процессе металлизации.

1.14. Используя RLC-измеритель E7-22 измерить сопротивление резистивных структур T1, T2, T3, T4 и занести в отчет. Провести необходимый переход от электрического сопротивления к площади поперечного сечения проводников каждой из структур и оценить боковой подтрав.

1.15. Визуально определив ширину проводника структуры T5 и учитывая примерную величину бокового подтрав оценить длину проводника T5.

1.16. Заполнить отчет, сделать выводы о взаимосвязи величины бокового подтрав с временем травления, конфигурацией проводников и их положением на заготовке.

1.17. На обратной стороне отчёта ответить на контрольные вопросы, указанные преподавателем.

Вопросы для самоконтроля и оценки уровня готовности к выполнению лабораторной работы №2

1. Боковое засвечивание приводит к тому, что элемент защитной маски из негативного фоторезиста после проявления в сечении представляет собой:

- а) полукруг (или полуэллипс);
- б) равнобокую трапецию с большим основанием внизу;
- в) прямоугольник.

2. Для получения защитной маски из фоторезиста с очень тонкими линиями (шириной 25-50 мкм) нужно применять:

- а) как можно более тонкий фоторезист;
- б) как можно более толстый фоторезист;
- в) подойдет любой пленочный фоторезист.

3. Тип пленочного фоторезиста при изготовлении защитного рельефа для последующего травления меди в водном растворе хлорного железа должен быть:

- а) кислотостойким;

- б) щелочестойким;
 - в) подойдёт любой тип фоторезиста.
4. Фоторезист водощелочного проявления устойчив к воздействию:
- а) 3%-го водного раствора гидроксида калия (KOH);
 - б) 40%-го водного раствора хлорного железа ($FeCl_3$);
 - в) 6%-го водного раствора гидроксида натрия (NaOH).
5. При жидкостном травлении боковой подтрав будет выше у группы проводников расположенных:
- а) по периметру заготовки, ближе к краю;
 - б) в центре заготовки;
 - в) боковой подтрав не зависит от местоположения проводников на заготовке.
6. При погружном травлении боковой подтрав будет меньше:
- а) у одиночно расположенного проводника;
 - б) у среднего проводника из группы подобных;
 - в) не зависит от близости соседних элементов топологии.
7. Частично компенсировать боковой подтрав можно:
- а) на этапе фотолитографии пленочного фоторезиста снизив время экспонирования на несколько секунд;
 - б) сделав фотошаблон для экспонирования пленочного фоторезиста с «окнами» несколько большего размера;
 - в) на этапе фотолитографии пленочного фоторезиста превысив время экспонирования на несколько секунд.
8. При травлении тонких пленок частично компенсировать боковое засвечивание фоторезиста и получить металлические структуры с размерами, в пределах допуска, можно:
- а) понизив время травления на несколько секунд;
 - б) сделав фотошаблон для экспонирования пленочного фоторезиста с «окнами» несколько большего размера;
 - в) превысив время травления на несколько секунд.
9. На что нужно обращать внимание при выборе времени экспонирования:
- а) на минимальную ширину линий на фотошаблоне;
 - б) на максимальную ширину линий на фотошаблоне;
 - в) на влажность воздуха в помещении.

Вопросы к защите лабораторной работы №2

1. На основании знаний, полученных в ходе выполнения лабораторной работы №1, составьте методику определения рабочего времени экспонирования при формировании фоторезистивной маски для получения медных тонкопленочных структур погружным жидкостным травлением в лабораторной работе №2.
2. При проявлении скрытого изображения фоторезист начал отслаиваться. Что могло послужить причиной отслаивания фоторезиста от поверхности заготовки?
3. Как влияет шероховатость поверхности заготовки на разрешение процесса фотолитографии? Что было бы, если бы поверхность керамической подложки, на которую нанесена тонкая пленка меди, имела шероховатость $R_z = 32$ нм?
4. В чем заключаются особенности нанесения фоторезиста на керамику из нитрида алюминия (AlN)?
5. Быстрее всего фоторезистивная маска после процесса травления удалится с проводников 250 мкм, 300 мкм, 400 мкм или 500 мкм? Объясните причину.
6. Какова причина неравномерного окрашивания тонкой пленки по площади заготовки?
7. Почему при погружном жидкостном травлении тонкопленочных структур обязательно используют «стоп-ванну»?
8. На основании распределения электрического сопротивления структур №1-№9 сделайте выводы о распределении толщины тонкой пленки по площади заготовки. Восстановите расположение заготовки относительно магнетрона при напылении тонкой пленки, нарисуйте схему.
9. Оцените длину проводника центрального сложно упакованного меандра на основании измерения его электрического сопротивления и данных, полученных при исследовании других структур на заготовке.

4. ОБЩИЕ ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Проводить лабораторные работы на оборудовании можно только в присутствии ответственного за выполнение работы инженера или преподавателя.

По способу защиты человека от поражений электрическим током установки относятся к классу 0 по ГОСТ12.2.007.0-75. В электрических цепях установок используется безопасное низкое напряжение.

Целостность изоляции обеспечивается еженедельным осмотром электрических кабелей установок и устранением неисправностей в случае их обнаружения.

Перед началом работы в лаборатории необходимо:

- пройти инструктаж по технике безопасности и расписаться в журнале за соблюдение правил безопасности при выполнении лабораторных работ;
- во избежание травм вследствие наматывания длинных волос и широких обшлагов рукавов на подвижные части ламинатора, следует привести в порядок рабочую одежду и собрать распущенные длинные волосы в безопасную прическу.

Меры безопасности при работе на оборудовании:

- работать только на исправном оборудовании;
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ работать на оборудовании влажными и мокрыми руками;
- во время работы ламинатора не подносить руки близко к нагретым подвижным валам установки;
- удерживать заготовку руками после ее захвата валами ламинатора ЗАПРЕЩАЕТСЯ;
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ пытаться открывать установку экспонирования во время работы ее ламп;
- не допускать попадания предметов под уплотнение установки экспонирования;
- при работе на установке экспонирования придерживать крышку с рядом верхних ламп, не допускать ее падения;
- при обнаружении неисправностей следует обращаться к ответственному за выполнение работы инженеру или преподавателю;
- при перерыве в подаче электроэнергии, появлении неисправностей ламинатор, установку экспонирования отключить.

Требования безопасности по окончании работ

- Получить разрешение у преподавателя на окончание работ и сдать работающие установки ответственному за выполнение работы инженеру или преподавателю.
- Отключить питание ламинатора переводом клавиши включения/ выключения в положение «Выкл.». Развести валы, освободив из паза рукоятку установления зазора (находится справа от рабочей области).
- Отключить питание установки экспонирования переводом клавиш включения/ выключения верхних и нижних ламп в положение «Выкл.».
- Привести в порядок рабочее место.
- ЗАПРЕЩАЕТСЯ производить отключение влажными и мокрыми руками, а также путем дергания за питающий кабель.

5. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

В соответствии с рабочей программой дисциплины «Процессы и оборудование микротехнологии» лабораторные работы оцениваются в 5 рейтинговых баллов. Итоговая оценка учитывает уровень подготовки студента к работе, качество ее выполнения и защиту.

Перед началом лабораторных работ студент должен **ознакомиться с содержанием теоретической части и подготовить формы отчётов.**

1. Оценка готовности студента к выполнению лабораторных работ

(тест: 5 вопросов на 15 мин, оценка - 1 балл)

при наличии заготовленных форм отчетов по ЛР:

- ответ на 4-5 вопросов – 1 балл;
- ответ на 3 вопроса – 0 баллов;
- ответ менее, чем на 3 вопроса – баллы не проставляются, к работе не допускается.

При отсутствии заготовленной формы отчёта или незнании ответов на вопросы – студент к выполнению лабораторных работ **не допускается.**

2. Качество оформления отчётов (максимум – 2 балла):

- отчёты оформлены полностью с первого попытки – 2 балла;
- отчёты оформлены полностью после исправлений – 1 балл;
- отчёты имеют ошибки или не оформлены – 0 баллов и недопуск к защите.

Студенту, выполнившему лабораторные работы, предоставляется возможность исправить отчёт и сдать повторно на проверку.

3. **Защита** в форме ответов на контрольные вопросы

(в течение 15 минут, 5 вопросов, макс. оценка – 2 балла)

- 5 правильных ответов на контрольные вопросы – 2 балла;
- 3-4 правильных ответа на контрольные вопросы – 1 балл;
- менее 3-х правильных ответов или нет ответов – 0 баллов (при этом студенту разрешается пройти процедуру защиты повторно).

Лабораторные работы считаются выполненными, если студент их защитил и получил в сумме не менее 3-х баллов.

Студенты, допущенные к защите, но не набравшие установленного минимума баллов, могут быть допущены к повторной защите в сроки, установленные кафедрой.

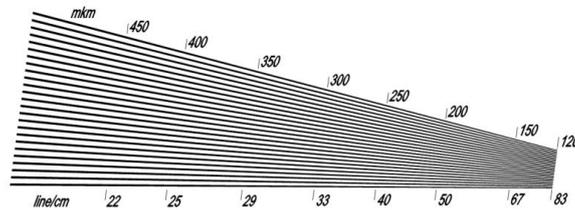
РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

1. Боброва Ю.С., Андроник М., Китаев И.В., Щербаков В.И. Фотолитография толстых слоев пленочного фоторезиста в полуаддитивной технологии изготовления плат силовых модулей // Наноинженерия. – 2015 . – № 9 . – С.8-13.
2. Боброва Ю.С., Каменихин А.Т., Литвак Ю.Н. Оценка погрешности позиционирования прецизионного оборудования: Метод. указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Основы проектирования и эксплуатации нанотехнологического оборудования». – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2017. – С.5-10.
3. Медведев А. Технология производства печатных плат. – М.: Техносфера, 2005. – 360 с.
4. Моро У. Микролитография: В 2-х частей. Ч. 1: Пер. с англ. – М.:Мир,1990. – 605 с.
5. Технологии в производстве электроники. Часть II. Справочник по производству печатных плат / Под ред. Семёнова П.В. – М.: ООО «Группа ИТД», 2007. – 568 с.
6. Шмаков М., Паршин В. Школа производства ГПИС. Фотолитография. Первый этап: формирование слоя резиста // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – №3. – С.70-74.
7. Шмаков М., Паршин В. Школа производства ГПИС. Фотолитография. Второй этап – передача рисунка на слой резиста // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – №4. – С.68-73.
8. Шмаков М., Паршин В. Школа производства ГПИС. Фотолитография. Третий этап – передача рисунка на материал интегральной микросхемы // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – №5. – С.72-77.
9. Цветков Ю.Б. Управление топологической точностью фотолитографии: Учебное пособие по курсу «Элионные технологии». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 176 с.

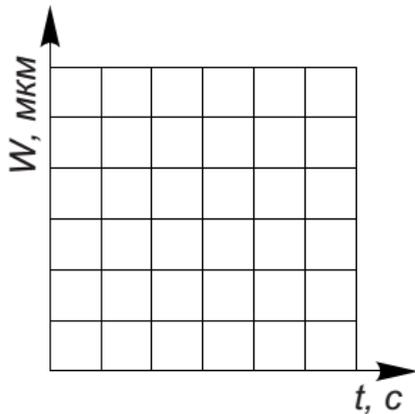
СТУДЕНТ..... ГРУППА МТ 11 - 6... ДАТА 20... г.

ОТЧЕТ
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 1
«ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
КОНТАКТНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ»

1. Клиновой растр



2. Зависимость разрешения от времени экспонирования:



Оптимальное время экспонирования: _____

Максимальное разрешение: _____

Разрешение при экспонировании "эмульсией вверх":

Проявитель: _____

Температура проявления: _____

3. Номер экспонирования по шкале "Ordyl": _____

Необходимое время экспонирования: _____

Выводы о взаимосвязи разрешающей способности процесса фотолиитографии и времени экспонирования

Выполнил _____

Проверил _____

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

КАФЕДРА МТ -11

ЛАБОРАТОРИЯ "МИКРОТЕХНОЛОГИЯ"

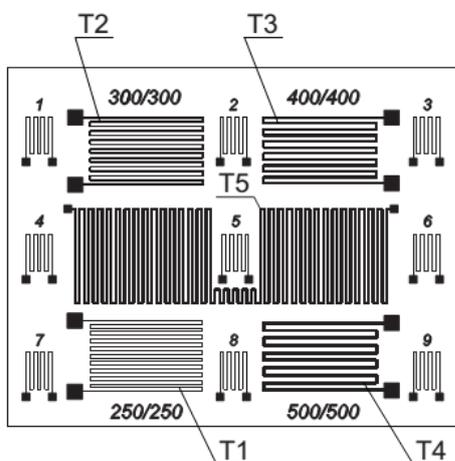
СТУДЕНТ.....

ГРУППА МТ 11 - 6...

ДАТА 20... г.

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 2 «ОЦЕНКА БОКОВОГО ПОДТРАВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР»

1. Тестовый шаблон



2. Распределение электрического сопротивления структур №1-№9 по полю заготовки

R1= _____	R2= _____	R3= _____
R4= _____	R5= _____	R6= _____
R7= _____	R8= _____	R9= _____

3. Данные из лабораторной работы «Изучение процесса нанесения тонких пленок методом магнетронного распыления»

$h =$ _____ мкм

$v_0 =$ _____ нм/мин

$\rho_{Cu} =$ _____ Ом·м

Выбрать ρ_{Cu} из таблицы:

Скорость осаднения v_0 , нм/мин	Удельное сопротивление меди ρ_{Cu} , Ом·м
$\gg 24$	$1,7 \cdot 10^{-8}$
24	$1,8 \cdot 10^{-8}$
12.8	$2,7 \cdot 10^{-8}$
7.5	$3,1 \cdot 10^{-8}$
3.8	$3,6 \cdot 10^{-8}$

Выводы о распределении толщины тонкой пленки по подложке, причинах неоднородности и т.д.

4. Оценка бокового подтрав тонкопленочных структур

	Структура			
	T1	T2	T3	T4
Длина l, мм	314	253	193	163
Ширина b, мкм	250	300	400	500
Площадь сечения проводника проектная, $S_{пр}$, мкм ²				
Сопротивление измеренное $R_{изм}$, Ом				
Площадь сечения проводника косвенно измеренная, $S_{изм}$, мкм ²				
Оценка бокового подтрав $\left(\frac{S_{изм}}{S_{пр}}\right) \cdot 100\%$				

Выводы о влиянии конфигурации проводников на боковой подтрав, минимизации бокового подтрав и т.д.

5. Контрольные задания

1) По сопротивлению $R_5 =$ _____ Ом определить длину l_5 (мм) структуры T5.

2) По времени травления $t =$ _____ определить скорость травления $v_T =$ _____ нм/с.

Выполнил _____ Проверил _____