

# Школа производства ГПИС.

## Фотолитография. Второй этап — передача рисунка на слой резиста

Точность полученного в процессе фотолитографии (ФЛ) топологического рисунка в первую очередь определяется прецизионностью процесса формирования фоторезистивной маски.

Максим Шмаков

mxm-shmakov@yandex.ru

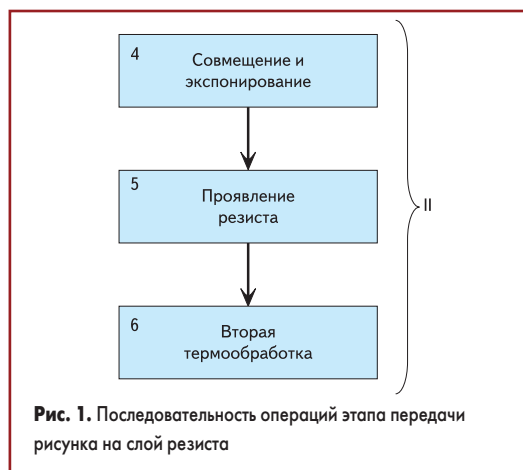
Валерий Паршин, к.т.н.

Передача рисунка на слой резиста (т. е. формирование фотомаски (ФР)) — технологический этап, на котором в фотослое создается топологический рисунок [1]. Данный этап состоит из следующих операций (рис. 1):

- 1) совмещение и экспонирование;
- 2) проявление;
- 3) термообработка (2-я сушка).

Изготовление фоторезистивной маски следует выполнять без перерывов. В обоснованных случаях допускаются перерывы между сушкой фоторезистивного слоя и совмещением и экспонированием рисунка, а также между проявлением фоторезистивной маски. При этом длительность каждого перерыва не должна превышать 3 суток, в течение которых подложки должны находиться в светонепроницаемой таре, помещенной в устройство для хранения деталей в защитной среде [2].

В соответствии с принципами локальности и полноты технологических обработок в процессе изготовления структур микросхем ФЛ проводится несколько раз, в зависимости от количества формируемых технологических слоев. Начиная со второй ФЛ необходимо совмещать рисунок шаблона с рисунком на подложке, полученном при формировании предыдущего технологического слоя [1].



### Совмещение и экспонирование

#### Совмещение фотошаблона (ФШ) с подложкой

Совмещение выполняют на той же установке, что и последующее экспонирование, путем наложения рисунков ФШ и подложки [1].

Современное производство предъявляет очень жесткие требования к точности совмещения ( $\pm 0,5$  мкм и менее). Сложность процесса состоит в том, что приходится с высокой точностью совмещать элементы малых размеров на большой площади.

Точность совмещения зависит от следующих факторов [3]:

- точность совмещения ФШ в комплекте;
- точность воспроизведения форм и размеров элементов рисунков в процессе ФЛ;
- качество подложек и слоев ФР;
- способ автоматического совмещения, качество и сохраняемость в ТП фигур автоматического совмещения;
- разрешающая способность микроскопа;
- совершенство механизма совмещения установки;
- индивидуальные способности оператора.

Существуют три метода совмещения ФШ с подложкой:

- 1) базовый (используется в основном при первой ФЛ, когда поверхность подложки еще однородна и точность совмещения слоев не требуется), при применении которого выбранный участок подложки — «базу» (сторону) устанавливают в определенном фиксированном положении; этот метод дает точность совмещения  $\pm 10$  мкм;
- 2) визуальный (преобладает), когда оператор совмещает ФШ с подложкой, наблюдая за контрольными отметками; этот метод обеспечивает точность совмещения от 0,25 мкм до 1 мкм и зависит от возможности установки;
- 3) автоматизированный (фотоэлектрический) с помощью фотоэлектронного микроскопа, обеспечивающего погрешность совмещения не более 0,03–0,3 мкм.

На сегодняшний день наибольшее применение нашли 2-й и 3-й методы, поскольку начиная со второй ФЛ, когда на подложках сформированы топологические слои, рисунок ФШ необходимо ориентировать относительно рисунка предыдущего слоя с высокой точностью. Поэтому наиболее подробно остановимся именно на них.

**Визуальный способ совмещения**

Данный метод заключается в одновременном наблюдении в неактивном свете с помощью микроскопа рисунка на пластине и рисунка ФШ.

Для предотвращения царапания, сколов и стирания поверхности ФШ и фотослоя между ними устанавливают микрозазор. Максимальная ширина микрозазора, как говорилось выше, ограничена глубиной резкости микроскопа при необходимом увеличении. Например, при увеличении 100–200 можно установить микрозазор 10–30 мкм. С увеличением требований к точности совмещения необходимы микроскопы с большим увеличением, соответственно микрозазор уменьшается.

Для визуального совмещения необходимы микроскопы с достаточно высокими разрешающей способностью и глубиной резкости, так как эти параметры определяют минимальный видимый размер элемента рисунка и обеспечивают четкое изображение как на ФШ, так и на подложке при наличии между ними микрозазора. Для совмещения элементов рисунка размерами 2–5 мкм необходим микроскоп с увеличением 200. Если нужна глубина резкости 10–15 мкм, то наблюдаемое поле составляет 1–3 мкм, что не позволяет качественно выполнить совмещение по площади всей подложки. Именно поэтому для совмещения используют двухпольные микроскопы, позволяющие одновременно наблюдать два отдаленных друг от друга участка подложки.

Совмещение рисунков проходит в два этапа.

После установки микрозазора оператор, одновременно наблюдая через микроскоп рисунок подложки и ФШ, производит точное наложение. Сначала рисунки совмещаются по меткам грубоприближенного совмещения в пределах достаточно больших перемещений подложки. Роль таких меток выполняют отсутствия одного или нескольких кадров на ФШ, которые позволяют правильно наложить при совмещении соответствующие строки и столбцы. Затем выполняется точное совмещение в пределах существенно меньших перемещений с помощью фигур совмещения с контролируемым зазором по контуру (рис. 2). Точность визуального совмещения зависит от разрешающей способности и глубины резкости микроскопа, плавности и точности перемещений и их фиксации, типа знаков совмещения [1].

Если говорить подробнее, то знаки совмещения с контролируемым зазором обеспечивают наиболее высокую точность совмещения при прочих одинаковых условиях. Это обусловлено тем, что при наложении отметок сов-

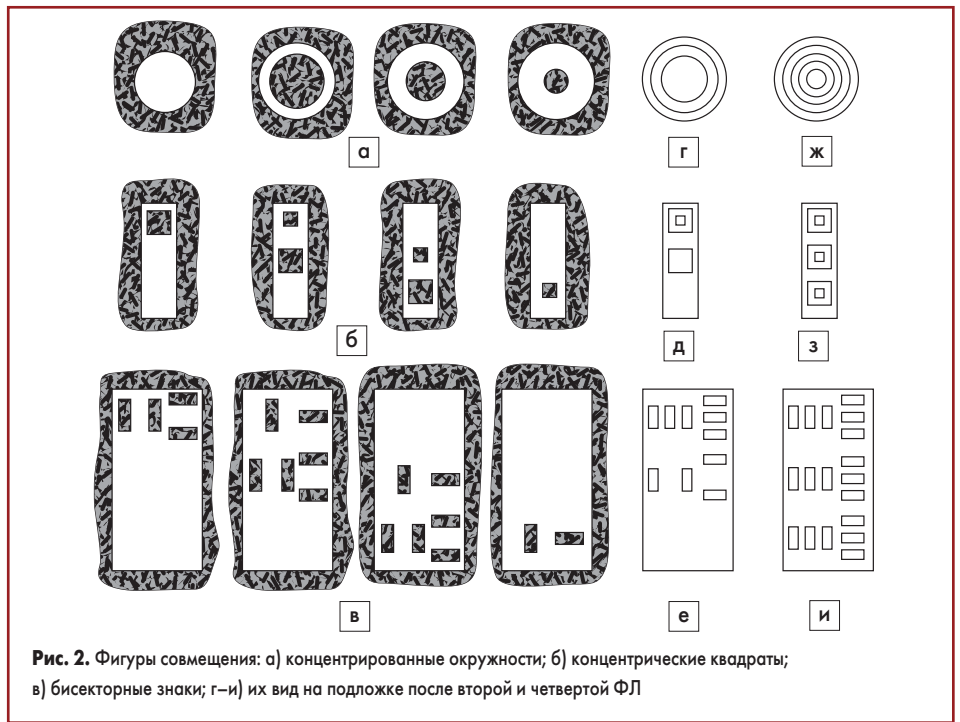


Рис. 2. Фигуры совмещения: а) концентрированные окружности; б) концентрические квадраты; в) бисекторные знаки; г–и) их вид на подложке после второй и четвертой ФЛ

мещения, одинаковых по конфигурации, но отличающихся по размерам на величину  $\delta$ , задача оператора заключается только в том, чтобы сохранить некоторый зазор между отметками по всему контуру. При этом совмещение знаков должно быть осуществлено на двух противоположных краях подложки, что исключает разворот рисунков вокруг оси, перпендикулярной плоскости изображений. В этом случае несовмещение отметок не превышает  $\pm\delta$ , что определяет и точность совмещения рисунков при условии идеальной совмещаемости смежной пары групповых ФШ. В действительности же из-за различия в шаге расположения отдельных изображений по горизонтали и вертикали погрешность совмещения превышает величину  $\pm\delta$ . (Под совмещаемостью ФШ понимают максимально возможное взаимное смещение соответствующих изображений любой пары ФШ комплекта при идеальном совмещении центральных изображений.) Величину  $\delta$  устанавливают исходя из наиболее жесткого допуска на элементы рисунка, но  $\delta$  не должен быть меньше разрешающей способности микроскопа (расстояния между двумя разрешающими точками) [4].

**Автоматизированный (фотоэлектрический) способ**

Данный метод является более объективным в отличие от визуального способа, определяемого индивидуальными способностями оператора и ручным манипулированием при перемещении подложки. После предварительного грубого совмещения с помощью оптического микроскопа производится точное совмещение с помощью фотоэлектрического микроскопа, который фиксирует разницу освещенности между метками совмещения подложки и ФШ и преобразует полученную информацию в команды для перемещения столика с подложкой. Для автоматической фотоэлектрической регистрации применяются знаки совмещения в виде вы-

травленных канавок на подложках и непрозрачных штрихов на ФШ.

Одна из основных трудностей обеспечения точного совмещения — создание механизмов плавных перемещений подложек на расстоянии менее 1 мкм [3].

**Экспонирование**

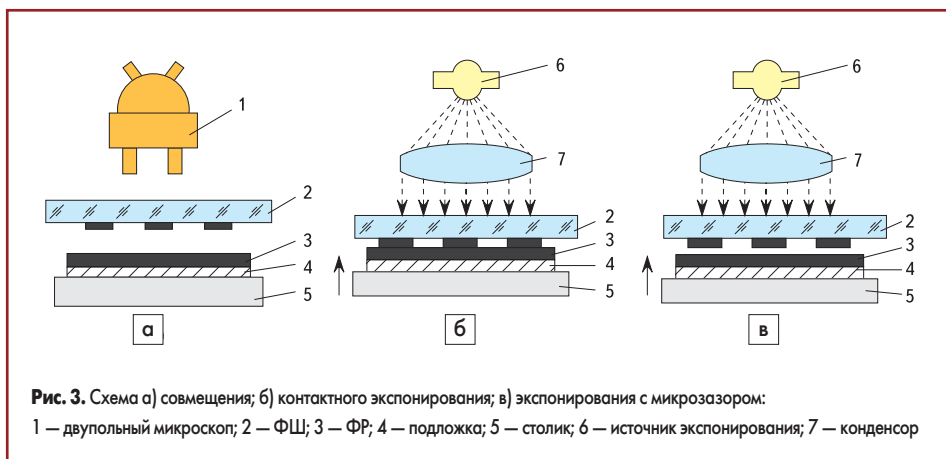
Существуют три способа экспонирования:

- экспонирование контактным способом (соответственно и весь процесс ФЛ называют контактной ФЛ);
- экспонирование с микрозазором;
- проекционное экспонирование.

**Экспонирование контактным способом**

Выполняется после совмещения рисунков и устранения зазора до полного контакта шаблон–подложка (рис. 3). Нужное усилие контакта создается вакуумным или пневматическим прижимом. ФР имеют узкую спектральную область поглощения (310–450 нм) и относительно низкую фоточувствительность. Поэтому в качестве источников УФ-излучения применяют ртутно-кварцевые лампы, обеспечивающие высокую освещенность (до десятков тысяч люкс). Для согласования спектров поглощения ФР и излучения источника применяют светофильтры. Параллельность пучка излучения, необходимая для равномерной освещенности экспонируемой поверхности фотослоя, обеспечивается системой конденсоров, имеющих 1–5 кварцевых линз. Разброс освещенности в пределах рабочего поля подложки не должен превышать 5%.

При тщательной стабилизации освещенности и плотном контакте ФШ– подложка на практике процесс экспонирования контролируют временем облучения. Необходимое время экспонирования обеспечивается электромагнитным затвором, время открывания и закрывания шторки которого составляет 0,05–0,1 с, что в интервале времен экспониро-



**Рис. 3.** Схема а) совмещения; б) контактного экспонирования; в) экспонирования с микроазором:  
1 — двупольный микроскоп; 2 — ФШ; 3 — ФР; 4 — подложка; 5 — столик; 6 — источник экспонирования; 7 — конденсор

вания (1 с ... 2 мин) обеспечивает хорошую точность.

У системы затвор-дозатор погрешность дозы при экспонировании не более 5%.

Режимы проявления слоя ФР зависят от времени экспонирования. Необходимую экспозицию устанавливают, учитывая тип и светочувствительность ФР, а также толщину его слоя [3].

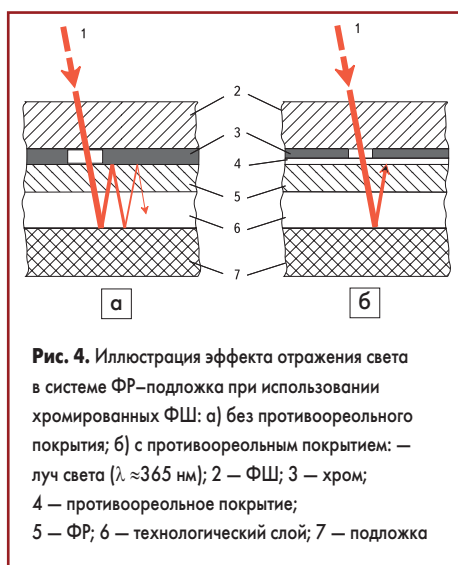
Существенным ограничением контактной фотолитографии является неизбежность механических повреждений рабочих поверхностей ФШ и подложки, так как эти поверхности при совмещении находятся на близком расстоянии (10–15 мкм), а при экспонировании плотно прижаты друг к другу. Из-за механического износа пленочного рисунка необходима частая замена ФШ, которая требует остановок оборудования и делает нецелесообразным автоматизацию процесса экспонирования.

При контактировании ФШ вдавливает в фотослой пылинки, микрочастицы стекла и др. На ФШ налипают ФР. Кроме того, любые непрозрачные для УФ-излучения частицы, попавшие между ФШ и фотослоем, также являются причиной появления дефектов фотомаски.

Получение полного плотного контакта между ФШ и подложкой представляет собой практически неразрешимую задачу из-за изогнутости пластин, неидеальности плоскости контактируемых поверхностей, наличия между ними посторонних частиц, из-за неравномерности толщин различных пленок и фотослоя и др. Частичные воздушные зазоры приводят к усилению дифракционных эффектов и обуславливают дополнительное расширение размеров получаемого изображения.

Предельная точность совмещения при контактной ФЛ ограничена сложностью создания системы фиксации перехода от положения «зазор» к положению «контакт», поэтому при переходе от совмещения к экспонированию возможно смещение ФШ относительно подложки. Ошибки могут появиться также из-за того, что оператор совмещает рисунки ФШ и подложки, находящиеся в разных плоскостях.

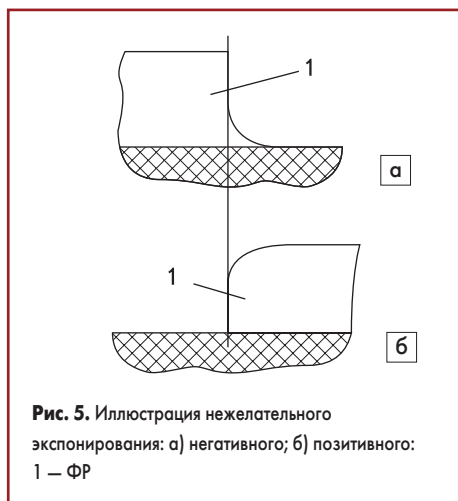
Важным оптическим эффектом при экспонировании является прохождение УФ-излучения через пленку ФР. Световой поток, прохо-



**Рис. 4.** Иллюстрация эффекта отражения света в системе ФР-подложка при использовании хромированных ФШ: а) без противорефлектного покрытия; б) с противорефлектным покрытием: — луч света ( $\lambda \approx 365$  нм); 2 — ФШ; 3 — хром; 4 — противорефлектное покрытие; 5 — ФР; 6 — технологический слой; 7 — подложка

дя через слой ФР, рассеивается в нем, а достигая подложки, отражается от нее и возвращается обратно в слой ФР. Дойдя до поверхности ФШ, световой поток отражается под углом от его металлизированных непрозрачных участков и через прозрачные участки попадает в слой ФР на подложке (рис. 4).

Эти отражения светового потока приводят к нежелательному дополнительному экспонированию участка слоя ФР находящимися под ним непрозрачными участками ФШ (рис. 5). Интенсивность отраженного потока света зависит от коэффициентов отражения подложки и ФШ. Для снижения эффекта отражения при контактной ФЛ используют цветные ок-



**Рис. 5.** Иллюстрация нежелательного экспонирования: а) негативного; б) позитивного:  
1 — ФР

сидные ФШ, имеющие малый коэффициент отражения.

ФШ с хромовым маскирующим покрытием имеют коэффициент отражения УФ-излучения (350–450 нм) 0,65, при использовании специальных низкоотражающих оксидных слоев он снижается до 0,04–0,08; у ФШ с железоксидным слоем коэффициент отражения 0,15–0,35.

Контактная ФЛ широко применяется в настоящее время и является наиболее отработанным методом, отличается высокой производительностью и невысокой стоимостью. Вследствие тесного контакта ФШ — подложка достигаются высокие разрешения. На фотослой позитивного ФР толщиной 0,5 мкм можно передать элементы размерами 1 мкм. Тем не менее в связи с приведенными ограничениями контактной ФЛ дальнейшее совершенствование технологии получения топологии элементов ИМ, вызванное необходимостью повышения степени их интеграции, развивается в направлении применения бесконтактных методов экспонирования и уменьшения дифракционных явлений.

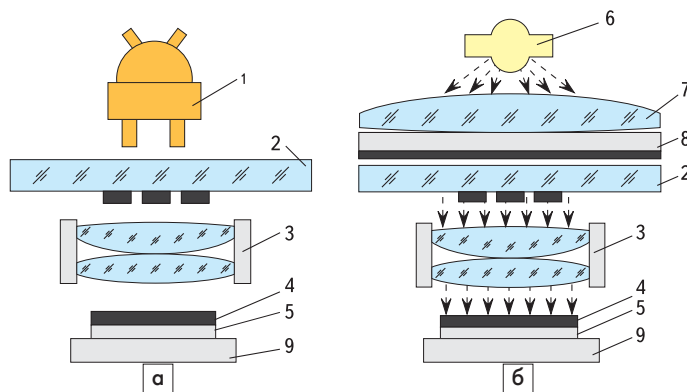
#### Экспонирование с микроазором

Данный метод отличается от контактного экспонирования только тем, что после совмещения между подложкой и шаблоном имеется зазор 10–25 мкм, при котором и осуществляют облучение фотослоя (рис. 3в).

Этот наиболее простой процесс бесконтактного экспонирования можно проводить на тех же установках, что и контактное экспонирование, например на установке ЭМ-576. Наличие зазора при экспонировании увеличивает влияние дифракции света на передачу рисунка, что приводит к искажению формы и размеров элементов и обусловлено проникновением света в область геометрической тени. Достигаемые минимальные размеры элемента при этом увеличиваются и составляют 2–4 мкм. Зазор при экспонировании значительно уменьшает повреждения шаблона и увеличивает срок его службы [1].

#### Проекционное экспонирование

Проекционный метод отличается от теневых способов тем, что основан не на экранировании от равномерного потока света, а на проецировании, т. е. получении изображения, соответствующего топологии шаблона, на поверхности фотослоя с помощью оптической системы со специальным объективом (рис. 6). Шаблон расположен на значительном расстоянии от подложки, его износ полностью исключен. Основные ограничения проекционного экспонирования: сложность создания высоко разрешающих объективов с большими полями (разброс освещенности в пределах рабочего поля подложек не должен превышать 1,5–2%), невозможность сохранения плоскостности поверхности подложек на всех технологических обработках. Высокие требования предъявляются к равномерности и воспроизводимости толщины фотослоя. Этим объясняется преимущественное применение способа шагового мультиплицирова-



**Рис. 6.** Схема совмещения и проекционного экспонирования: а) совмещение; б) экспонирование:  
1 — двупольный микроскоп; 2 — ФШ; 3 — объектив; 4 — ФР; 5 — подложка; 6 — источник экспонирования;  
7 — конденсор; 8 — фильтр; 9 — столик

ния с уменьшением масштаба. Фотошаблоны, называемые промежуточными фотооригиналами (ПФО), содержат увеличенное в 4–20 раз изображение топологии одного или нескольких кристаллов. После экспонирования столик установки перемещают на один шаг и в новом положении подложки производят экспонирование следующего участка. И так до полного экспонирования всей подложки. При экспонировании совмещение можно осуществлять на каждом шаге или до экспонирования по двум знакам совмещения, расположенным на противоположных участках подложки. Первый способ обеспечивает более высокую точность. Увеличение производительности совмещения и экспонирования достигается автоматизацией процессов.

Достоинства шагового проекционного экспонирования: высокая точность совмещения — до 0,1 мкм, относительно малая чувствительность к неплоскости подложки, высокая разрешающая способность, позволяющая получать элементы до 1 мкм.

При выполнении совмещения и экспонирования рисунка схемы размещения рисунка на подложках, за исключением полиамидных, производить так, чтобы по краям подложки оставалась свободной технологическая зона шириной не менее 500 мкм [2].

**Оборудование для совмещения и экспонирования**

Операции совмещения и экспонирования выполняются на одних и тех же установках, представляющих собой сложные оптико-ме-

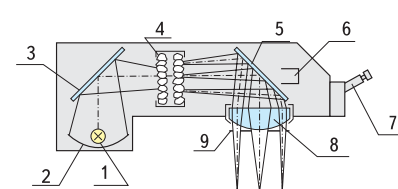


**Рис. 7.** Установка контактного совмещения и экспонирования ЭМ-576

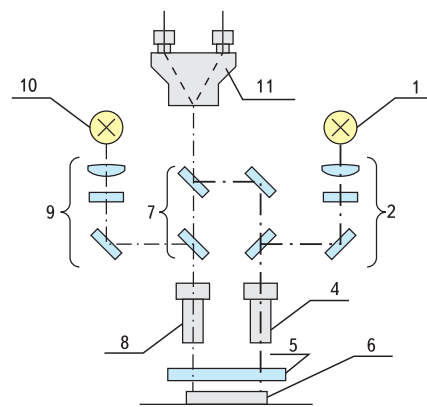
ханические комплексы. Погрешность совмещения и производительность зависят от выбранного метода. В отечественных установках контактного совмещения и экспонирования (ЭМ-576 (рис. 7), ЭМ-5026 (табл. 1)) используется принцип контактной печати с наложением ФШ на подложку. При идеальной плоскостности ФШ и подложки передача изображения осуществляется с минимальными искажениями при большой производительности [3].

Рассмотрим упрощенную схему работы блока экспонирования установки ЭМ-576 (рис. 8).

В качестве источника используется ртутно-кварцевая лампа 1, излучение которой рефлектором 2 направляется на зеркало 3 и далее в блок линзовых растров 4. Зеркало 5 направляет расходящиеся пучки излучения на конденсор 8, преобразующий его в параллельный (в пределах угла коллимации (9 — коллиматор)) поток актиничного излучения. Фотоприемник 6 служит для контроля дозы экспонирования.



**Рис. 8.** Блок экспонирования



**Рис. 9.** Схема двупольного микроскопа

нирующего излучения. На корпусе блока экспонирования крепится микроскоп 7.

Микроскоп установки выполнен по двупольной системе и включает две самостоятельные оптические ветви (рис. 9), изображение от которых поступает в одно поле зрения. Каждая ветвь содержит осветительную систему 7, 2, 3 и 7, 9, 10, а также объективы 4 и 8.

Изображение от объективов передается через полупрозрачные зеркала 3 и 7 и системе линз в наклонный тубус, а затем в окуляры бинокулярной насадки 11. При последовательном включении двух источников света 1

**Таблица.** Характеристики установок совмещения и экспонирования серии 5026

	ЭМ-5026А	ЭМ-5026Б	ЭМ-5026М
Производительность (при t <sub>эксп.</sub> = 5 с, без учета времени совмещения)	120 пластин/час	10 пластин/час	10 пластин/час
Погрешность совмещения по координатам X и Y	±0,1 мкм	±2,0 мкм	±0,1 мкм
Фотолитографический предел разрешения	0,4–1 мкм	1,0 мкм	0,4–0,6 мкм
Диапазоны рабочих длин волн	225–260 нм 280–335 нм 350–450 нм	225–260 нм 280–335 нм 350–450 нм	225–260 нм 280–335 нм 350–450 нм
Неравномерность освещенности рабочего поля диаметром 100 мм	5%	5%	3%
Диаметр обрабатываемой пластины в режиме автоматической загрузки	76 мм	76 мм (толщина 0,3–0,65 мм)	60 мм
Отклонение от плоскостности рабочей поверхности пластин при вакуумном креплении	Не более 1 мкм	Не более 1 мкм	Не более 1 мкм
Размеры фотошаблонов 127×127×3, 102×102×3	Согласно стандарту SEMI	Согласно стандарту SEMI	4"×4" (102 мм×102 мм) Толщина 3 мм
Режим экспонирования	В контакте (усилие сжатия регулируется)	В контакте (усилие сжатия регулируется)	В контакте (усилие сжатия регулируется)
Масса установки	400 кг	500 кг	350 кг

и 10 в поле зрения окуляра четко видно изображение, поступающее от соответствующего объектива.

В микроскопе расстояние между осями объективов регулируется. Возможна также замена объективов микроскопа, поэтому увеличение в установке ЭМ-576 можно изменять от  $94^{\times}$  до  $312^{\times}$ . Диаметр поля зрения при этом уменьшается от 1,85 до 0,45 мм.

### Проявление ФР

*Проявление ФР* — процесс удаления «лишних» (экспонированных — позитивный ФР или неэкспонированных — негативный ФР) в фоторезистивном слое участков в соответствии с локальным облучением при экспонировании [1].

#### Проявление негативных ФР

Проявление негативных ФР представляет собой процесс растворения необлученных участков.

Основными факторами, определяющими качество изображения при проявлении негативных ФР, являются тип проявителя и полнота реакции полимеризации ФР при экспонировании.

Проявитель должен обладать хорошей растворяющей способностью и минимальным воздействием на облученные участки фотослоя. Проявители для негативных ФР представляют собой органические растворители: толуол, бензол, уайт-спирит, трихлорэтилен, толубензол, диоксан и др.

При неправильно выбранной экспозиции облученные участки сильно набухают, что приводит к искажению рисунка. Проникая между молекулами ФР, растворитель вызывает набухание слоя. При формировании прецизионных фоторезистивных масок набухание приводит к смещениям, смыканиям и деформациям элементов рисунка. Недоэкспонирование негативных ФР приводит к увеличению набухания при проявлении и, следовательно, к уменьшению разрешающей способности ФЛ-процесса. Если экспонирование выполнено при оптимальной экспозиции, перепроявление негативного ФР не опасно, поэтому процессы проявления легко автоматизировать.

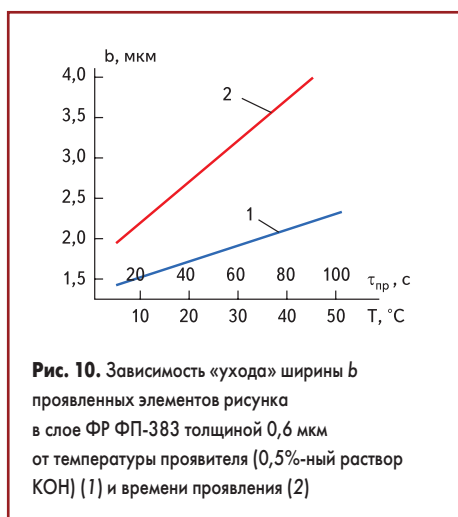
Отсутствие ионов щелочных металлов является ценным фактором при проявлении негативных ФР.

#### Проявление позитивных ФР

Проявление позитивных ФР представляет собой процесс удаления облученных при экспонировании участков резистивного слоя.

Основными факторами, определяющими качество изображения при проявлении позитивных ФР, являются:

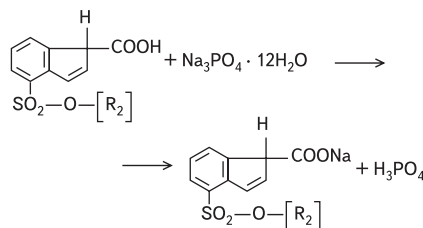
- концентрация проявителя;
- значение pH проявителя<sup>1</sup>;
- температура проявителя (рис. 10, кривая 2);
- время проявления (рис. 10, кривая 1).



**Рис. 10.** Зависимость «ухода» ширины  $b$  проявленных элементов рисунка в слое ФР ФП-383 толщиной 0,6 мкм от температуры проявителя (0,5%-ный раствор KOH) (1) и времени проявления (2)

При проявлении позитивных ФР используются растворы неорганических и органических оснований.

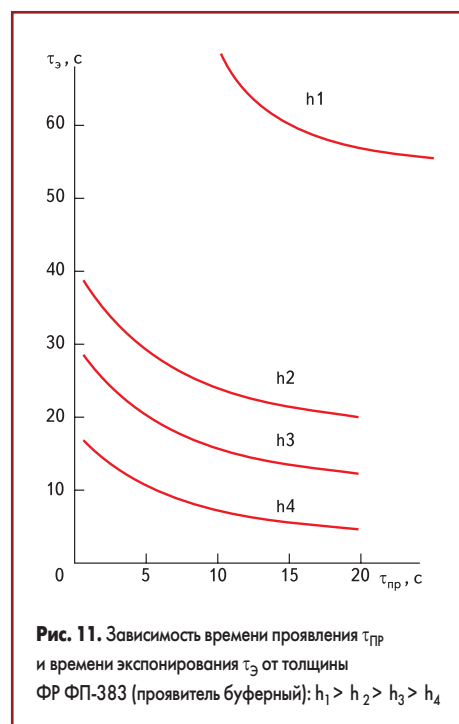
При проявлении ФР на основе НХД идет химическая реакция превращения полученной при экспонировании инденкарбоновой кислоты в хорошо растворимую соль, которая затем легко вымывается. После облучения поверхность позитивного ФР переходит из гидрофобного в гидрофильное состояние, поэтому облученные участки фоторезистивного слоя, в отличие от необлученных, хорошо смачиваются проявителем. В качестве проявителей применяются водные щелочные растворы (0,3–0,5%-ный раствор едкого кали, 1–2%-ный раствор тринатрийфосфата) или органические щелочи этанамини. Проявление в растворе тринатрийфосфата сопровождается химической реакцией:



Если слой проэкспонирован не полностью, раствор окрашивается в малиновый цвет, так как часть молекул инденкарбоновой кислоты превращается не в соль натрия, а соединяется с неразрушенными молекулами НХД, образуя краситель. Если молекулы НХД разрушены полностью на всю глубину фоторезистивного слоя, проявитель остается бесцветным.

С целью регулирования скоростей растворения в проявитель добавляют вещества, замедляющие процесс проявления. Такой проявитель называется *буферным*.

В технологии ИМС составы проявителей подбирают экспериментально. При этом параметрами качества ФР служат как характеристики изображения (точность воспроизведения рисунка и т. п.), так и показатели процесса, например производительность и выход годных [5].



**Рис. 11.** Зависимость времени проявления  $\tau_{пр}$  и времени экспонирования  $\tau_{э}$  от толщины ФР ФП-383 (проявитель буферный):  $h_1 > h_2 > h_3 > h_4$

На рис. 11 показана зависимость времени проявления и времени экспонирования для различных толщин ФР.

Положительной особенностью применения позитивных ФР является то, что при их проявлении практически отсутствует набухание необлученных участков слоя, поэтому позитивные ФР имеют большую разрешающую способность и меньшую ее зависимость от толщины фоторезистивного слоя по сравнению с негативными ФР.

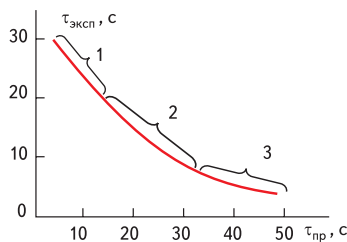
Незначительные изменения концентрации проявителя сильно влияют на точность передачи изображения. Время проявления стремятся свести к минимуму, так как в противном случае может происходить разрушение незасвеченных участков фоторезистивного слоя из-за наличия механических загрязнений, части разрушенных молекул НХД, а также из-за растворения в проявителе полимерной составляющей ФР. Для стандартных позитивных проявителей время проявления составляет 15–20 с.

Концентрация проявителя должна быть минимальна и обеспечивать необходимую производительность проявления. Уменьшение концентрации щелочного проявителя увеличивает контраст проявления, стабилизирует перенос изображения и снижает его дефектность.

Для каждого ФР существуют оптимальные сочетания экспозиции (времени экспонирования) и времени проявления, обеспечивающие наилучшую воспроизводимость размеров проявленных элементов рисунка. Увеличение экспозиции уменьшает время проявления. При этом размеры проявленных в позитивных ФР элементов рисунков увеличиваются, а в негативных — уменьшаются. При увеличении времени проявления растет число точечных дефектов в слое ФР и растравливание границ рисунка по контуру окон.

Наиболее благоприятное время проявления ФР должно подбираться в интервале 30–40 с.

<sup>1</sup> Величина pH — степень кислотности раствора, определяемая уравнением  $\text{pH} = -\lg\text{CH}$ , где CH — концентрация ионов водорода в растворе. Для нейтральных растворов (воды)  $\text{pH} = 7$ , для кислых —  $\text{pH} < 7$ , для щелочных —  $\text{pH} > 7$ .



**Рис. 12.** Зависимость между временем экспонирования  $t_{ЭКС}$  и временем проявления  $t_{ПР}$ , обеспечивающими наилучшую воспроизводимость проявленных элементов рисунка: 1, 3 — области неустойчивых режимов; 2 — область устойчивых режимов

Зависимость между временем экспонирования  $t_{ЭКС}$  и временем проявления  $t_{ПР}$ , обеспечивающими наилучшую воспроизводимость проявленных элементов рисунка, показана на рис. 12. На участке 2 кривой, соответствующем устойчивому воспроизведению размеров проявленного рисунка, при небольшом изменении одного из параметров, например  $t_{ЭКС}$ , происходят небольшие изменения другого параметра  $t_{ПР}$ . Участки 1 и 3 соответствуют неустойчивым режимам, так как незначительные изменения одного параметра вызывают большие изменения другого [3].

После проявления фоторезистивная маска не должна иметь сквозных дефектов, нарушающих ее целостность. Края маски должны быть четкими и ровными, а рисунок полностью соответствовать ФШ. На пробельных участках не должно быть остатков непроявленного ФР [2].

ФР проявляют пульверизацией или поливом. Эти методы обеспечивают необходимую чистоту процесса, достаточно полное удаление продуктов реакции и высокую производительность, а также возможность объединения в едином цикле на одной установке операций проявления, промывки и сушки на центрифуге.

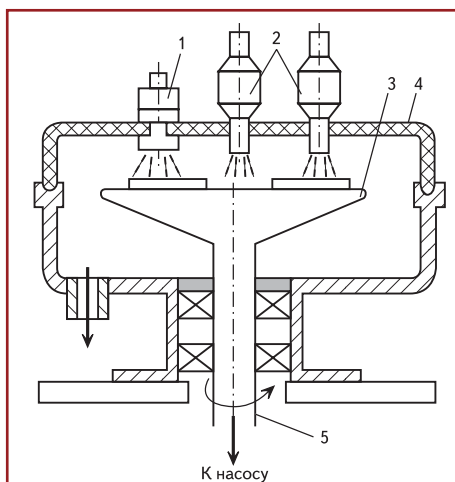
Пульверизация обеспечивает качественное проявление слоя ФР при изготовлении ИС с элементами малых размеров (менее 5 мкм). При дисперсионном проявлении ФР (рис. 13) подложки подаются на столик центрифуги и удерживаются на нем при вращении вакуумным присосом. При включении центрифуги на подложки подается под давлением мелкодисперсионная струя проявителя. После проявления слоя ФР подложки промывают водой и сушат [3].

На рис. 14 представлена автоматическая кластерная система для нанесения, сушки и проявления ФР — SUSS Gamma cluster system и некоторые ее технические характеристики.

**Технические характеристики системы**

Компактная кластерная архитектура с роботом, расположенным по центру, и модулями процессов, расположенными вокруг него, имеющая следующие характеристики:

- до трех наносящих/проявляющих модулей;



**Рис. 13.** Полуавтомат ППФ-2 дисперсного проявления ФР: 1 — форсунка сушки; 2 — пневматические форсунки проявления и отмывки; 3 — платформа; 4 — съемная крышка; 5 — ротор

- до трех температурных стеков, в каждом из которых до шести нагреваемых/охлаждающихся пластин;
- модуль AltaSpray для нанесения по сложной топографии;
- кассета Auto-Sizing с зеромеханическим изменением крепления между размерами подложек;
- круглые подложки от 2 дюймов до 200 мм и квадратные от 2 до 6 дюймов;
- параллельная потоковая функциональность с разными размерами подложек для оптимального использования мощностей системы;
- технология GYRSET — вращающийся купол;
- покрытие квадратных подложек без сбора ФР по углам;
- очистка края;
- нанесение ФР струйным способом и спреем для высокой равномерности распределения [7].

**Вторая термообработка (задубливание ФР)**

Проводится для удаления проявителя, воды, повышения химической стойкости и адгезии фотомаски к подложке. У негативных ФР сушка сопровождается термополимеризацией, у позитивных — разрушением молекул и последующим задубливанием. Чтобы не произошло ухудшения качества фотомаски, сушку проводят в два-три этапа с постепенным подъемом температуры до максимальной. Для большинства ФР максимальная температура второй сушки 150 °С. Выдержка при максимальной температуре должна быть небольшой, чтобы не произошли разрывы фоторезистивной маски, общее время 1–1,5 ч. Облучение перед второй сушкой большой дозой глубокого УФ устраняет пластическое течение ФР при термообработке и существенно улучшает качество фотомаски.

Термообработка во многом зависит от следующего метода травления.

- Термообработка фоторезистивной маски, используемой при химическом травлении



**Рис. 14.** Автоматическая кластерная система для нанесения, сушки и проявления ФР — SUSS Gamma cluster system

слоев, представляет собой двух-, трехступенчатый нагрев подложек с масками. При этом первая ступень представляет собой нагрев до температуры (90±5) °С с выдержкой не менее 10 мин, а последняя ступень — нагрев до температуры не более 160 °С с выдержкой, подбираемой в зависимости от толщины фоторезистивной маски и марки ФР.

Термообработка фоторезистивной маски, используемой при ионном травлении слоев, состоит из трех ступеней температуры нагрева [2]:

- 1) (100±5) °С — выдержка в течение (10±1) мин;
- 2) (150±5) °С — выдержка в течение (10±1) мин;
- 3) (180±5) °С — выдержка в течение (30±1) мин.

Этап создания фоторезистивной маски является основным этапом формирования топологического слоя, поскольку точность передачи рисунка на материал интегральной микросхемы (ИМС) во многом зависит от точности полученного на данном этапе фоторезистивного слоя (маски).

**Литература**

1. Малышева Н. А. Технология производства микроэлектронных устройств. М.: Высшая школа. 1991.
2. ОСТ 107.750878.001-87 Технология изготовления тонкопленочных плат.
3. Энциклопедия машиностроения. Том III-8. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении / Под ред. Ю. В. Панфилова. М.: Машиностроение. 2000.
4. Борисенко А. С. Технология и оборудование для производства микроэлектронных устройств. М.: Машиностроение. 1983.
5. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь. 1987.
6. Блохин В. Г. Технологии производства микроэлектронной аппаратуры: Лекции. М.: РГТУ-МАТИ им. К. Э. Циолковского. 2004–2005.
7. <http://www.tbs-semi.ru/companies/suss/Gamma.html>