



**Уральский  
федеральный  
университет**

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

**Институт  
материаловедения  
и металлургии**

**Д. Ю. КРУЧИНИН  
Е. П. ФАРАФОНТОВА**

# **ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ**

Учебное пособие

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Д. Ю. Кручинин, Е. П. Фарафонтова

# **ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ**

*Рекомендовано методическим советом УрФУ  
в качестве **учебного пособия** для студентов,  
обучающихся по программе специалитета и бакалавриата  
по направлению подготовки 200204 и 200400 «Опtotехника»*

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2014

УДК 776:681.7.02(075.8)  
ББК 37.83я73+22.34я73  
К84

Рецензенты: начальник оптического производства М. О. Фамильцев (ОАО «Производственное объединение “Уральский оптико-механический завод” имени Э. С. Яламова»); главный технолог канд. техн. наук А. Е. Печорских (научно-производственная компания «Очки для Вас»)

Научный редактор проф., д-р техн. наук В. А. Дерябин

**Кручинин, Д. Ю.**

К84 Фотолитографические технологии в производстве оптических деталей : учебное пособие / Д. Ю. Кручинин, Е. П. Фарафонтова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 51, [1] с.

ISBN 978-5-7996-1110-1

Изложены основы фотолитографии, виды и способы изготовления оптических шкал. Рассмотрены оптические детали, требующие формирования топологии на поверхности.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Оптехника», аспирантов и научных сотрудников, интересующихся фотолитографическими технологиями.

Библиогр.: 8 назв. Табл. 1. Рис. 4.

УДК 776:681.7.02(075.8)  
ББК 37.83я73+22.34я73

ISBN 978-5-7996-1110-1

© Уральский федеральный университет, 2014

## ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Литографией называется процесс формирования на поверхности подложки с помощью чувствительного материала защитного рельефного покрытия с изображением элементов топологии и последующего переноса изображения на подложку. В зависимости от длины волны применяемого излучения различают оптическую (фотолитографию), рентгеновскую (0,1–10 нм), электронную (0,1 нм) и ионную литографию (0,1–0,5 нм). Фотолитография в свою очередь использует ближнее ультрафиолетовое излучение (360–450 нм), среднее ультрафиолетовое излучение (300–360) и дальнее ультрафиолетовое излучение (100–300 нм). Фотолитография, использующая ближнее ультрафиолетовое излучение, позволяет получать элементы топологии размером до 0,5 мкм. Дальняя ультрафиолетовая фотолитография позволяет получить минимальную ширину элемента топологии до 0,045 мкм. Фотолитография по сравнению с другими способами является хорошо изученным, более дешевым и производительным процессом, для всех этапов которого в микроэлектронной промышленности разработаны разные виды оборудования, как для изготовления самих микросхем, так и для изготовления фотошаблонов. В оптической промышленности фотолитография находит широкое применение при изготовлении оптических деталей, особенно при изготовлении оптических шкал. В оптических шкалах не используются элементы топологии шириной менее 1,5 мкм, поэтому для их производства наиболее целесообразно использовать именно фотолитографию.

Фотолитографический процесс состоит в следующем: на поверхности подложки формируют тонкую пленку фоторезиста, экспонируют эту пленку, т. е. облучают ее актиничным светом (ультрафиолетовым излучением) через фотошаблон с изображением топологии, затем проявляют. Это основа всех техпроцессов фотолитографии. Они могут сильно различаться между собой и иметь большое количество операций, которых нет в других техпроцессах.

## Основные термины

Приведем основные термины, используемые в технологических процессах фотолитографии в оптической промышленности.

Фотолитография – процесс формирования на поверхности подложки элементов топологии с помощью чувствительных к ультрафиолетовому излучению покрытий, способных воспроизводить заданное взаимное расположение и конфигурацию этих элементов.

Топология – чертеж, определяющий взаимное расположение, конфигурацию и размеры его элементов (штрихов, цифр, знаков и др.).

Фотошаблон – стеклянная или иная пластина либо полимерная пленка со сформированными на ее поверхности элементами топологии из материала, не пропускающего актиничное излучение.

Рабочий фотошаблон – фотошаблон, предназначенный для экспонирования фоторезиста на поверхности подложки.

Фотошаблон-оригинал, или эталонный фотошаблон – фотошаблон, предназначенный для экспонирования фоторезиста на поверхности рабочего фотошаблона при его изготовлении.

Негативный фотошаблон – фотошаблон, на котором изображение темных элементов топологии представлено в виде светлых элементов, а изображение светлых элементов топологии в виде темных.

Позитивный фотошаблон – фотошаблон, на котором изображение темных элементов топологии представлено в виде темных элементов, а светлых соответственно в виде светлых.

Подложка – стеклянная, кристаллическая или другая оптическая деталь, на одной из поверхностей которой, как правило, плоской, формируется топология.

Негативный техпроцесс – технологический процесс фотолитографии, в результате которого темные элементы топологии на фотошаблоне переносятся на подложку в виде светлых элементов.

Позитивный техпроцесс – технологический процесс фотолитографии, в результате которого темные элементы топологии на фотошаблоне переносятся на подложку в виде темных элементов.

Фоторезист – светочувствительный материал, изменяющий свои свойства, прежде всего растворимость в проявителе, под воздействием актиничного излучения.

Актиничное излучение – световое излучение, воздействующее на фоторезист, вызывающее протекание фотохимических реакций и изменение растворимости облученных участков покрытия.

Экспонирование – облучение актиничным излучением пленки фоторезиста, сформированной на подложке, через фотошаблон или с помощью управляемого луча.

Проявление фоторезиста – обработка экспонированной пленки фоторезиста в целях удаления облученных или необлученных участков для создания рельефного изображения.

Травление – удаление материала подложки или материала покрытия на подложке с участков, не защищенных пленкой фоторезиста.

## Фоторезисты

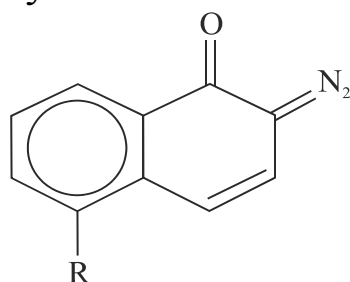
Фоторезисты могут быть негативными и позитивными. Если слой фоторезиста, сформированный на подложке, под воздействием актиничного излучения теряет растворимость, то такой фоторезист является *негативным*. Если слой фоторезиста под воздействием актиничного излучения приобретает растворимость, то такой фоторезист является *позитивным*. Негативные фоторезисты редко используются для изготовления оптических шкал, так как имеют низкую разрешающую способность и неприменимы для обратной фотолитографии.

Основные требования к фоторезистам: высокая светочувствительность, необходимая спектральная чувствительность, высокая разрешающая способность, однородность по всей поверхности подложки, беспористость, высокая адгезия к материалу подложки, стабильность слоя фоторезиста во времени, получение резкой границы между участками, защищенными и не защищенными фоторезистом, устойчивость к химическому воздействию, отсутствие загрязнений продуктами фотохимических превращений, безопасность применения, стабильность свойств фоторезиста в период срока хранения.

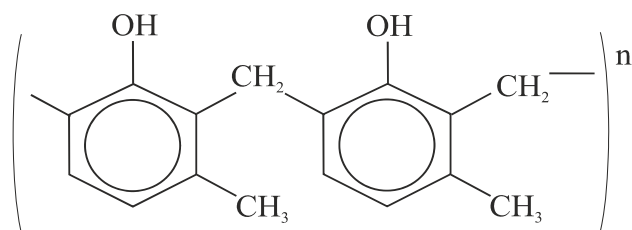
В качестве источника актиничного излучения в фотолитографии применяются ртутные лампы. Из спектра излучения ртутных ламп используются три пика, имеющие длины волн 365, 405 и 435 нм, которые обозначаются буквами *i*, *h*, *g* соответственно. Фоторезисты могут быть предназначены для экспонирования излучением с какой-либо одной длиной волны, двумя или тремя длинами волн [1].

Наибольшее распространение среди позитивных фоторезистов получили диазохиноновые фоторезисты (ДХН) [1]. ДХН-фоторезис-

ты состоят из новолачной смолы, смешанной с небольшим количеством нафтохинондиазидовой фотоактивной добавкой. Всё это находится в виде раствора в каком-либо растворителе. Нафтохинондиазид имеет следующую формулу:

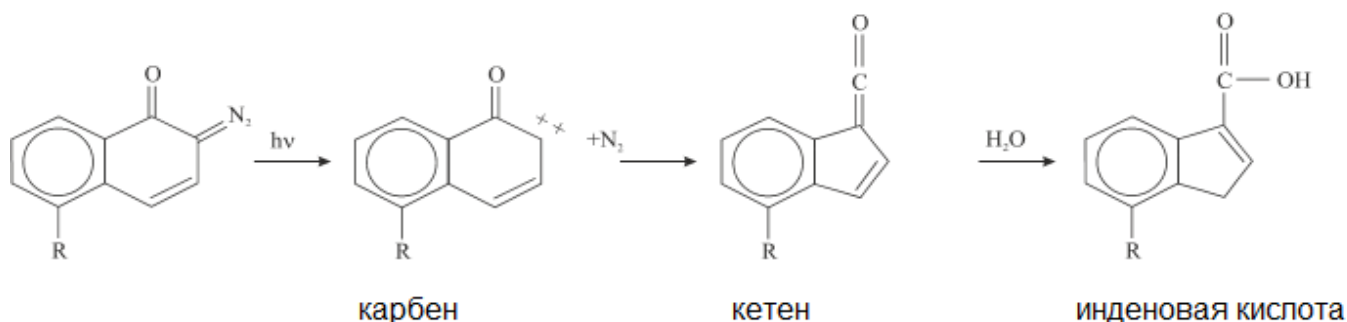


где R – производные фенолформальдегидных смол, оксибензофенонов и др. Новолачная смола имеет следующую формулу:

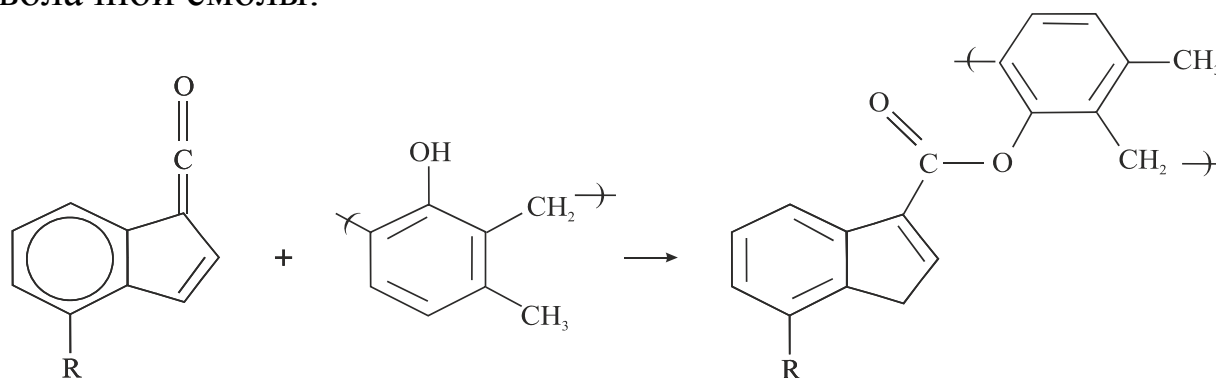


Позитивные фоторезисты на основе новолачных смол соответствуют основным требованиям к фоторезистам, кроме того, они пригодны для обратной фотолитографии, допускают допроявление, легко удаляются, возможно обращение изображения для получения негативного изображения. Недостатком является низкая адгезия к стеклу.

При облучении актиничным излучением происходит фотолиз нафтохинондиазидов. При этом образуется карбен и азот, карбен превращается в кетен, который реагирует с водой с образованием инденовой кислоты. Фоторезист при этом переходит из гидрофобного в гидрофильное состояние и легко смачивается водным проявителем. Инденовая кислота реагирует со щелочным проявителем, в результате чего засвеченные области слоя фоторезиста растворяются.



Если экспонирование проводится в отсутствие воды (при низкой влажности или в вакууме), то кетен взаимодействует с ОН-группой новолачной смолы:



Таким образом, негативное изображение (обращение) можно сформировать путем экспонирования излучением в отсутствие влаги, с последующей сушкой перед проявлением и (или) сплошной оптической засветкой и проявлением в слабой щелочи.

Основные характеристики фоторезистов: вязкость, толщина слоя фоторезиста, разрешающая способность, содержание твердых веществ, область спектральной чувствительности, кислотостойкость и др.

Срок хранения фоторезистов ограничен и может составлять около 6 месяцев при соблюдении требований по температуре хранения. При хранении в фоторезисте могут происходить различные химические реакции. В результате свойства фоторезиста меняются: появляются гели и нерастворимые продукты, меняется скорость проявления и время экспонирования, вязкость и толщина пленок и др.

В России производятся фоторезисты марок ФП-383, ФП-РН-7, ФП-051Ш, ФП-051Т, ФП-051МК и др. Основные производители фоторезистов за рубежом: фирмы SHIPLEY (США) и CLARIANT (Германия). Фоторезисты фирмы SHIPLEY выпускаются под торговой маркой MICROPOSIT, MEGAPOSIT и др., фирмы CLARIANT – под торговой маркой AZ. Эти фирмы изготавливают фоторезисты для экспонирования в широком диапазоне, для экспонирования в диапазонах отдельных линий, для экспонирования дальним ультрафиолетом. Фоторезисты поставляются в готовом для употребления виде.

## Основные технологические операции

1. *Чистка (обезжиривание) поверхности деталей перед нанесением покрытий (хрома, фоторезиста и др.).* Эта операция проводится с целью удаления загрязнений и придания поверхности необходимых адгезионных свойств.



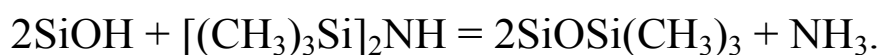
Любое загрязнение приводит к образованию дефектов на детали, поэтому частицы размером более 0,2 мкм должны быть удалены. Загрязнения меняют и адгезионные свойства поверхности стекла. Как правило, подложки, поступающие на участок фотолитографии, имеют гидрофобную поверхность. Поверхность очищенного стекла имеет гидрофильные свойства. На подложках могут быть как органические, так и неорганические вещества. Причиной загрязнений могут быть остатки полирующих материалов; вещества, содержащиеся в растворах, используемых при промывке подложек после полирования; вещества, оставшиеся после высыхания органических веществ и воды; отпечатки пальцев; вещества, осаждающиеся из воздуха и др.

Для чистки деталей перед напылением хрома в оптическом производстве используют хромовую смесь или азотную кислоту. Детали выдерживают в течение 1–2 ч в хромовой смеси или 30–40 мин в азотной кислоте, после чего детали промывают в воде и протирают обезжиренной батистовой салфеткой. Хромовая смесь – это раствор, состоящий из смеси концентрированной серной кислоты и насыщенного раствора калия двуххромовокислого. Непосредственно перед напылением хрома детали протираются обезжиренной салфеткой, смоченной перегнанным обезвоженным спиртом. Также производится протирка деталей между напылением слоев хрома. Часто чистка производится только обезжиренной батистовой салфеткой, смоченной перегнанным обезвоженным спиртом, без использования хромовой смеси и азотной кислоты, так как их использование не подходит для чистки деталей, имеющих высокий класс чистоты и изготовленных из химически неустойчивых стекол. Чистка с использованием батистовой салфетки и спирта применяется перед нанесением фоторезиста.

К современным способам проведения операции чистки можно отнести мегазвуковую обработку и гидромеханическую чистку [2]. В первом случае производится обработка подложки жидкостью, в которой генерируются колебания частотой 1 МГц. Во втором случае производится механическая чистка поверхности подложки материалом, не повреждающим стекло, в присутствии чистящей жидкости. Оба способа позволяют очистить подложку от всех загрязнений. Эти способы можно применять в условиях чистого помещения.

Качество проведения операции чистки контролируется под микроскопом в проходящем и отраженном свете и по смачиваемости водой: поверхность после чистки должна хорошо смачиваться водой.

2. *Обработка адгезивом.* ДХН-фоторезисты являются органическими жидкостями и, как результат, плохо смачивают гидрофильную поверхность чистого стекла. Это приводит к тому, что в процессе фотолитографии слой фоторезиста может отслаиваться от поверхности стекла. Для создания требуемых адгезионных свойств подложки обрабатываются специальными веществами (адгезивами), которые могут наноситься погружением, распылением, центрифугированием или осаждением из газовой фазы. Одним из наиболее распространенных способов повышения адгезии стекла к фоторезисту, т. е. создания гидрофобной поверхности стекла, является обработка в парах ГМДС (гексаметилдисилозан). Обработка проводится в замкнутом объеме при повышенной температуре [2]. При этом на поверхности стекла протекает следующая реакция:



В результате обработки подложки в парах ГМДС поверхность стекла приобретает гидрофобные свойства, т. е. поверхность не смачивается водой [1].

3. *Термостабилизация.* Термостабилизацию необходимо проводить после любых операций, связанных с нагревом, что делает все последующие операции более стабильными за счет постоянства свойств, скоростей физических процессов и химических реакций, уменьшения влияния термического расширения стекла и др.

4. *Нанесение фоторезиста.* Свойства фоторезистивных пленок определяются не только составом используемых светочувствительных материалов, но и применяемыми способами их формирования. К операции нанесения фоторезиста предъявляются следующие требования [3]:

- формирование бездефектных пленок контролируемой и воспроизводимой толщины;
- реализация широкого диапазона толщин покрытий;
- формирование пленок, имеющих высокую равномерность по толщине при обязательном устранении или уменьшении валика, образующегося по краям подложки;
- создание покрытий, обладающих максимально высокой адгезией к подложке, сохраняющих исходные значения светочувствительности и разрешающей способности применяемых фоторезистов.

Способы формирования пленок фоторезиста:

- распыление;
- погружение или вытягивание;
- заливка;
- накатка;
- центрифугирование.

**Распыление (пультверизация).** Способ заключается в диспергировании фоторезиста сжатым газом и нанесении его на подложку в виде мелкодисперсного аэрозоля. Способ позволяет формировать покрытия в большом интервале толщин с достаточно высокой воспроизводимостью и разбросом по толщине в 15–20 %, при высокой производительности и высоком коэффициенте использования фоторезиста утолщения по краям подложки (валик) отсутствуют.

**Вытягивание.** При этом способе подложку погружают в фоторезист и вытягивают из него с регулируемой скоростью. Наиболее однородные покрытия получаются при скорости вытягивания от 6 до 150 мм/с. Неравномерность толщины составляет 20–30 % – сверху и снизу подложки образуются утолщения (примерно в два раза). Способ удобен в случае формирования двусторонних покрытий. Более медленное вытягивание дает более тонкое и более однородное покрытие. Способ позволяет наносить фоторезист на подложки с высоким коэффициентом использования фоторезиста (20–30 % и выше), требует одновременного использования большого объема фоторезиста.

**Заливка.** Способ заключается в том, что на поверхность подложки наливается доза фоторезиста, которая затем распределяется по поверхности с помощью каких-либо движений. При указанном способе получаются большие толщины и большая неравномерность толщины покрытия.

**Накатка.** Метод в оптическом производстве не применяется, так как не обеспечивает требуемую точность воспроизведения элементов топологии; используются специальные фоторезисты.

**Центрифугирование.** Этот способ в настоящее время является основным при изготовлении оптических шкал способами фотолитографии [3]. Способ является универсальным и позволяет наносить разнообразные покрытия на поверхности, в том числе оптические покрытия. Достоинствами способа являются высокая равномерность

слоя фоторезиста (разброс толщин фоторезиста не более 5 %), чистота покрытия (загрязнения частично удаляются за счет центробежных сил), высокая производительность, контролируемость процесса. Недостатки: коэффициент использования фоторезиста составляет менее 1 %, по краям детали и на внутренней границе пленки фоторезиста образуется валик, т. е. утолщение слоя фоторезиста, который может составлять 2–3 толщины основного слоя. Для определения толщины пленки используется следующая эмпирическая формула [2]:

$$t = \frac{kP^2}{\sqrt{W}}, \quad (1)$$

где  $t$  – толщина пленки фоторезиста, мкм;  $k$  – константа центрифуги, зависящая от типа фоторезиста, вида подложки, ускорения и др.;  $P$  – содержание сухих компонентов фоторезиста, %;  $W$  – частота вращения центрифуги, об/мин.

Для каждого фоторезиста имеется определенная критическая скорость вращения, превышение которой не вызывает уменьшения толщины слоя. Толщина пленки не зависит от радиуса подложки.

Увеличение ускорения способствует формированию более тонких, но более однородных по толщине пленок, хотя в основном толщина пленки определяется скоростью вращения центрифуги для конкретного фоторезиста. После подачи дозы фоторезиста на подложку происходит интенсивное испарение растворителя и увеличение вязкости фоторезиста. Поэтому чем выше ускорение, тем при меньшей вязкости происходит формирование пленки, тем меньше толщина пленки и больше ее однородность. Также имеет значение промежуток времени и его постоянство между моментом подачи дозы фоторезиста и началом ускорения.

5. *Предэкспозиционная термообработка или сушка.* Операция сушки заключается в физическом удалении растворителя из пленки без разрушения светочувствительных компонентов [1]. Так как процесс сушки влияет на последующие операции экспонирования и проявления, он должен быть точным и воспроизводимым, обеспечивать равномерный прогрев подложки. При высоких температурах происходит разрушение светочувствительных компонентов, что приводит к увеличению времени экспонирования и проявления или к полной потере светочувствительности и невозможности проведения экспонирования и проявления. При низких температурах сушки

остатки растворителя могут также повлиять на проведение экспонирования и проявления, вызвать прилипание фоторезиста к фотошаблону и отслоение фоторезиста от подложки при проявлении. Также операция сушки оказывает влияние на дефектность и адгезию покрытия. При проведении сушки нужно учитывать массу, толщину подложки, материал подложки, ее форму и конструкцию (сборка), необходимость использования оправы.

Сушка начинается уже в процессе нанесения фоторезиста. Подложку после нанесения фоторезиста необходимо выдержать при комнатной температуре в течение 10–30 мин. Это способствует повышению адгезии и снижению напряжений в пленке. С увеличением толщины пленки увеличивается и время выдержки. Без проведения такой выдержки при термообработке может происходить растрескивание пленки.

Для сушки используются следующие способы: конвекционный способ, ИК-сушка, «горячая плита».

Конвекционный способ. При этом способе подложка с нанесенным слоем фоторезиста помещается в сушильный шкаф при температурах 80–100 °С на время 10–30 мин в зависимости от самой подложки, вида фоторезиста и толщины пленки фоторезиста. В некоторых случаях используется многоступенчатая термообработка с выдержкой при нескольких температурах и постепенным охлаждением. Необходимо учитывать, что при этих температурах происходит разложение светочувствительной добавки. Так, при температуре 100 °С в течение 1 часа вся светочувствительная добавка может разложиться. Необходимая точность поддержания температуры  $\pm 2$  °С. Способ характеризуется низкой производительностью, неравномерностью температуры по высоте и глубине сушильного шкафа, что сказывается на точности переноса элементов топологии.

Способ ИК-сушки. Способ заключается в облучении подложки с нанесенным на нее слоем фоторезиста инфракрасным излучением, что дает более высокую производительность.

«Горячая плита». Это новый высокопроизводительный способ сушки, который заключается в том, что термообработка производится с помощью подогреваемой металлической плиты [2]. Этот способ позволяет повысить производительность сушки, поддерживать температуру с точностью  $\pm 1$  °С и время выдержки с точностью  $\pm 1$  с. Подбор режимов сушки производится экспериментально по времени экспонирования и качеству отпечатка. Но контактный нагрев на горя-

чей плите при производстве шкал используется не всегда. Такой нагрев возможен, например, для заготовок фотошаблонов типа пластин ППХ. Для подложек оптических деталей часто используется нагрев на горячей плите с зазором. Это обусловлено тем, что оптические шкалы имеют высокие требования к чистоте обратной стороны подложки. Кроме того, конструктивные особенности установки термообработки требуют использования специальных оправок, особенно для деталей небольших размеров. Время сушки в результате увеличивается.

*б. Экспонирование.* Цель операции экспонирования заключается в том, чтобы обеспечить совмещение фотошаблона и подложки, а также воспроизвести в фоторезисте топологию фотошаблона с необходимой точностью. Совмещение производится с помощью специальных упоров, наклеенных на фотошаблон, при контактном экспонировании или с помощью специальных оправок при проекционном экспонировании. Для экспонирования используются ртутные лампы.

Реакции, происходящие в фоторезисте, были рассмотрены ранее. Доза энергии излучения [2] определяется по формуле

$$H = Et, \quad (2)$$

где  $H$  – доза излучения;  $E$  – интенсивность излучения (освещенность), Вт/см<sup>2</sup>;  $t$  – время, с.

Эта формула характеризует собой закон взаимозаместимости, который для фоторезиста ФП383 действует в интервале освещенностей  $25\text{--}300 \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Время экспонирования зависит от освещенности, типа фоторезиста, толщины слоя фоторезиста, сохранности светочувствительной добавки и др.

Экспонирование может быть контактным, с зазором и проекционным.

**Контактный способ экспонирования.** Способ, при котором фотошаблон и подложка с нанесенным слоем фоторезиста находятся в плотном контакте. При идеальной контактной печати интенсивность излучения или освещенность распределяется, как представлено на рис. 1, *а*. При печати с фотошаблона, имеющего непрозрачное маскирующее покрытие, интенсивность распределяется, как представлено на рис. 1, *б*. При печати с фотошаблона, имеющего покрытие, частично пропускающее актиничное излучение, интенсивность распределяется, как представлено на рис. 1, *в*.

На рис. 1, в видно, что, начиная с определенной дозы излучения в точке 1, будет происходить проявление фоторезиста, в результате чего около основной линии появится еще одна тонкая линия. Это явление называется «двойной край». Если дозу излучения уменьшать, то начиная с определенного момента в точке 2 дозы не будет хватать для удаления фоторезиста при проявлении в этом месте. В результате внутри линии может появиться тоже «двойной край». Контактный способ экспонирования позволяет получать элементы топологии шириной 0,5 мкм.

Экспонирование с зазором. Такой способ экспонирования позволяет увеличить срок службы фотошаблона. Для непрозрачного маскирующего покрытия интенсивность излучения распределяется таким же образом, как и для контактного экспонирования (рис. 1, б). Минимальная ширина элемента топологии составляет 3–4 мкм, также увеличивается неровность края и неравномерность ширины.

Проекционное экспонирование. Способ характеризуется тем, что фотошаблон и деталь находятся друг от друга на значительном расстоянии. Это позволяет использовать фотошаблон в течение неограниченного промежутка времени. Интенсивность распределяется, как представлено на рис. 2.

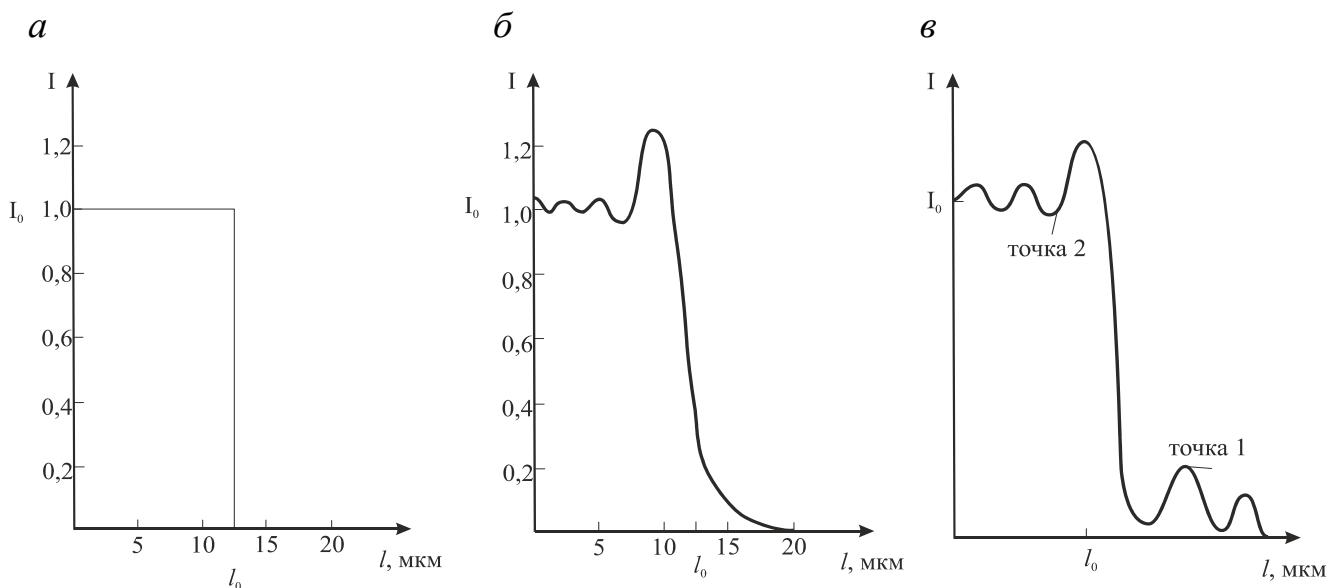


Рис. 1. Распределение интенсивности излучения при контактном экспонировании

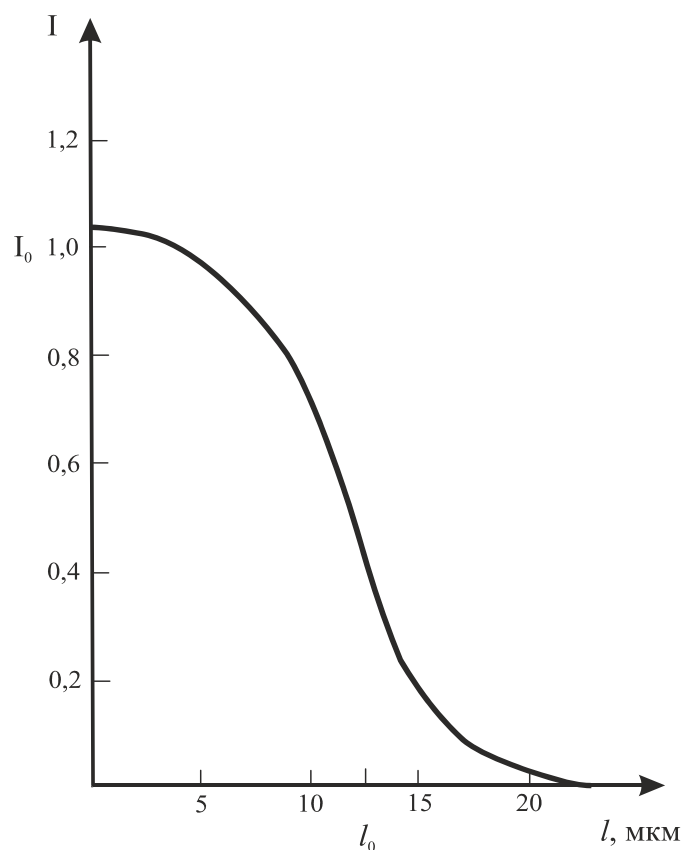


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения при проекционном экспонировании

Установки для проекционного экспонирования отличаются особой сложностью. Минимальная ширина элементов топологии составляет 2 мкм.

7. *Термообработка после экспонирования.* Цель проведения термообработки – уменьшить результат воздействия на фоторезист стоячих волн за счет диффузии. Температура обработки примерно на 20 °С выше температуры сушки, но необходимо учитывать возможность разложения светочувствительных добавок. Эта операция не является обязательной. Обычно после экспонирования сразу проводят операцию проявления, но в некоторых случаях после экспонирования делают термообработку.

При экспонировании часть света достигает поверхности подложки и отражается от нее, а затем от маскирующего покрытия фотошаблона. В результате отражения, дифракции и интерференции возможно образование стоячих волн. Кроме того, доза, полученная фоторезистом, увеличивается. Эффект возникновения стоячих волн в фоторезистах заключается в появлении по толщине пленки слоев, получивших различную дозу энергии. Это выражается в появлении бугров

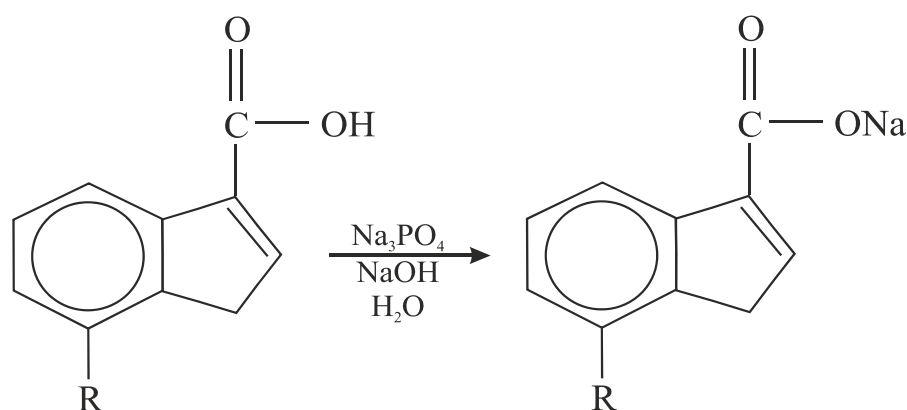


и неровностей в пленке позитивных фоторезистов. Использование для экспонирования всех трех длин волн ртутной лампы уменьшает влияние эффекта стоячих волн. Также можно уменьшить влияние отражения: уменьшить отражение от пленки хрома или перейти от техпроцесса прямой фотолитографии к обратной. В случае прямой фотолитографии с травлением хрома фоторезист наносится на хромированную подложку, отражение от которой составляет 50–60 %. В случае обратной фотолитографии фоторезист наносится на стекло, отражение от которого составляет 4 % (К8).

Также термообработка после экспонирования может применяться для обращения изображения. В этом случае делается повторное экспонирование.

Для термообработки после экспонирования можно использовать те же способы, что и для сушки: конвекционный способ, ИК-сушка, «горячая плита».

8. *Проявление.* Окончательное формирование в пленке фоторезиста изображения элементов топологии происходит при обработке соответствующими растворами экспонированных покрытий. Для позитивных ДХН-фоторезистов процесс проявления основан на протекании химического процесса взаимодействия продуктов фотолиза со щелочными составами и на последующем физико-химическом удалении продуктов реакции [3]:



Образующаяся соль инденовой кислоты растворима в воде и при проявлении переходит в раствор. Скорость реакции проявления определяется по формуле

$$V = k \left( C_{\text{OH}^-} \right)^n, \quad (3)$$

где  $k$  – константа скорости реакции;  $C_{\text{OH}^-}$  – концентрация гидроксильных ионов (моль/л);  $n$  – порядок реакции, который для фоторезистов имеет значение около 3.

Чем выше скорость растворения облученных участков пленки  $V_0$  и одновременно ниже скорость растворения необлученных участков  $V_H$ , тем избирательнее работает проявитель. Кроме того, на избирательность действия проявителя существенное влияние оказывает величина индукционного периода растворения необлученных участков пленки  $T$  – времени, в течение которого не наблюдается внешне обнаруживаемых признаков взаимодействия необлученных участков пленки с проявителем. Индукционный период облученных участков всегда очень мал (менее 1 с). Селективность проявления должна быть обеспечена либо увеличением  $V_0/V_H$ , либо небольшими значениями этого отношения, но при индукционном периоде, равном или превышающем время растворения облученных участков.

На параметры процесса проявления существенное влияние оказывает состав проявителя. По мере понижения pH проявителя уменьшение  $V_H$  происходит значительно быстрее, чем  $V_0$ , и их отношение возрастает (рис. 3) [3].

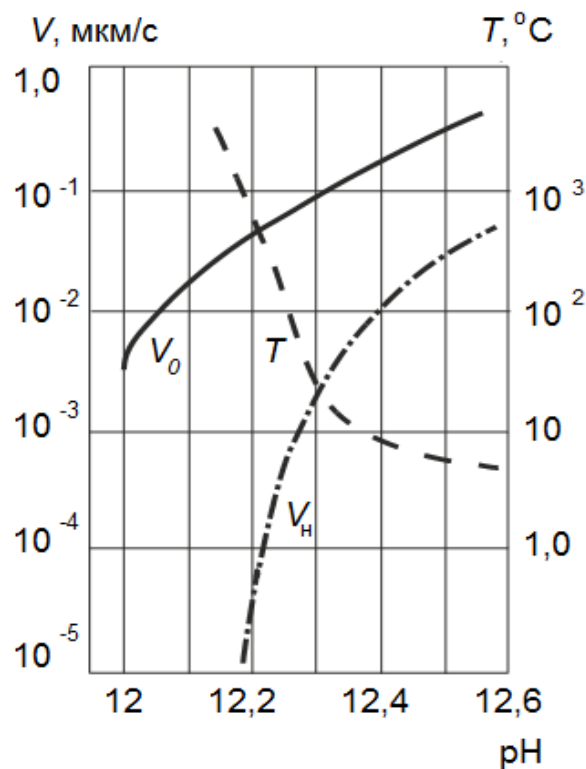


Рис. 3. Скорость растворения облученной  $V_0$  и необлученной  $V_H$  пленки фоторезистов в проявителе

Одновременно с этим увеличивается индукционный период растворения. Стабильность геометрических размеров элементов топологии при проявлении зависит от следующих факторов:

- химического состава фоторезиста;
- концентрации и температуры проявителя;
- качества пленки фоторезиста и ее адгезии к поверхности подложки и, следовательно, режимов нанесения и сушки фоторезиста и др.;
- времени экспонирования, способа экспонирования, вида тех-процесса и применяемого оборудования;
- индукционного периода и скорости растворения необлученных участков пленки.

Места попадания дифрагированного и отраженного света в область геометрической тени можно рассматривать как потенциально опасные участки с увеличенной скоростью растворения необлученной пленки и уменьшенным индукционным периодом. При увеличении времени проявления возникает опасность разрушения пленки фоторезиста на этих участках.

В зависимости от экспонирования и проявления могут быть следующие профили пленки фоторезиста: отрицательный, вертикальный и положительный наклоны (рис. 4) [1].

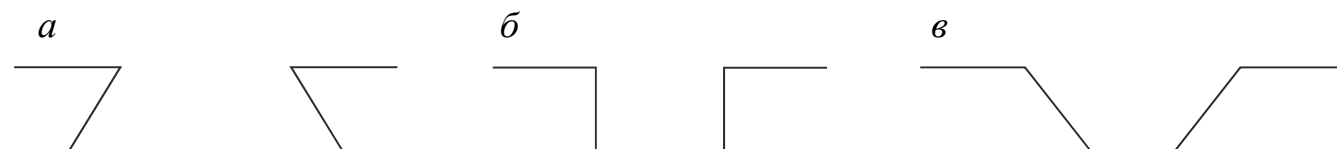


Рис. 4. Профили в пленке фоторезиста:  
*a* – отрицательный наклон; *б* – вертикальный наклон;  
*в* – положительный наклон

Отрицательный наклон имеет место при переэкспонировании, положительный наклон – при недоэкспонировании.

Проявители. В состав проявителей входят вещества, способные образовывать водные растворы с  $\text{pH} = 12\text{--}13$ . Также в составе проявителя могут быть добавки, введенные в целях повышения чувствительности, контрастности, разрешения и др. Наиболее распространенные составы проявителей: 2%-ный водный раствор  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  и 0,7%-ный водный раствор КОН. При нахождении проявителя в контакте с воздухом  $\text{pH}$  проявителя уменьшается в результате взаи-

модействия углекислого газа со щелочным раствором. При этом скорость проявления уменьшается и с определенного момента проявление может совсем прекратиться. Температура проявителя влияет на скорость проявления и изменение размеров элементов топологии, так как при изменении температуры изменяется концентрация гидроксильных ионов и увеличиваются скорости химических реакций.

Способы проявления. Обычно используются два основных способа проявления фоторезиста – окунания и центрифугирования. При первом способе деталь помещается в проявитель, затем в емкость с водой, промывается и высушивается с помощью сжатого воздуха. Качество проявления определяется визуально или на микроскопе в отраженном свете (для хромированных заготовок) или в проходящем свете. Недостатками этого способа являются сложность автоматизации, контакт проявителя и воды с воздухом (изменение рН и попадание загрязнений), нестабильность и субъективность проведения операции, большая загрязненность проявленных деталей. Эти недостатки отсутствуют при использовании способа центрифугирования [2]. При этом способе деталь помещается на центрифугу, затем на вращающуюся деталь подается последовательно проявитель и вода в течение определенного времени. После этого производится сушка также при вращении центрифуги. Контроль проявления проводится или визуально, или на микроскопе. Основным достоинством проявления на центрифуге является высокая чистота проявленных деталей. В некоторых случаях используется комбинация из указанных способов.

*9. Термообработка после проявления* (полимеризация, задубливание). Операция предназначена для улучшения адгезии и защитных свойств проявленной пленки фоторезиста перед травлением хромового или другого покрытия.

Условия термообработки подбираются с учетом следующих факторов:

- толщина пленки;
- марка фоторезиста;
- вид травителя и условия травления;
- вид маскирующего покрытия;
- способ нанесения хрома или другого маскирующего покрытия;
- размеры элементов топологии и допуски на размеры;
- требования последующих этапов технологического процесса, например легкость удаления фоторезиста.

При термообработке ДХН-фоторезистов при температурах 100–150 °С происходят следующие изменения:

- 1) испарение остаточного растворителя, поглощенной воды;
- 2) возгонка и декомпозиция неизрасходованной светочувствительной добавки;
- 3) усадка и расплывание пленки;
- 4) внутри- и межмолекулярные реакции с участием смолы и светочувствительной добавки;
- 5) окисление смолы.

При термообработке повышается адгезия пленки фоторезиста, повышается кислотостойкость или стойкость к кислотам травителям, происходит изменение размеров элементов топологии и затягивание небольших проколов в результате расплавления фоторезиста (135 °С), возможно приподняtie края пленки из-за напряжений, возникающих в результате различия коэффициентов термического расширения стекла и фоторезиста. При температурах задубливания до 150 °С пленка фоторезиста достаточно легко снимается растворителями, например ацетоном. При температурах задубливания 160–180 °С фоторезист не снимается или для его снятия необходимо использовать более сложные способы.

Для термообработки после проявления используются те же способы, что и для сушки: конвекционный способ, ИК-сушка, «горячая плита».

*10. Нанесение маскирующих и других оптических покрытий.* Покрытия, как правило, наносятся напылением в вакууме резистивным, электронно-лучевым или магнетронным способами. Также возможно нанесение покрытий химическими способами. Наиболее распространенным маскирующим покрытием является хромовое покрытие, так как оно широко применяется при изготовлении оптических шкал.

*11. Травление покрытий.* Операция травления покрытий является завершающей операцией формирования элементов топологии оптических деталей в техпроцессе прямой фотолитографии и предназначена для удаления покрытия на участках, не защищенных пленкой фоторезиста. Требования, предъявляемые к операции травления:

- минимальное изменение геометрических размеров элементов топологии;
- полное удаление покрытия на участках, не защищенных пленкой фоторезиста;
- возможность управления.

Наиболее часто травление производится в растворе. Такое травление является изотропным, т. е. травление по всем направлениям идет с примерно одинаковой скоростью. Уширение светлых элементов топологии будет составлять не менее двух толщин маскирующего покрытия.

На конечном результате травления сказываются все предыдущие операции. Протекание процесса травления и геометрические размеры элементов топологии определяются видом маскирующего покрытия, видом травителя, температурой травителя, толщиной покрытия, качеством подготовки поверхности перед напылением, химическим составом пленки, термообработкой и др.

При анизотропном травлении уширения элементов топологии не происходит. Примером анизотропного травления является ионное травление.

*12. Снятие фоторезиста.* При проведении снятия фоторезиста необходимо учитывать марку фоторезиста, растворимость его в определенных растворителях, предыдущие операции (термообработки, напыление покрытий), возможность применения механического воздействия и устойчивость материала подложки к растворителям. Основным технологическим приемом удаления пленки фоторезиста является обработка подложек в соответствующих растворителях. Наиболее легко растворяются пленки позитивных фоторезистов в ацетоне, диоксане, диметилформамиде и воднощелочных растворах. Но если процессу снятия фоторезиста предшествовала высокотемпературная обработка, то для удаления фоторезиста требуется дополнительно либо механическое воздействие, либо применение окислителей. Например, плазмохимический способ. Он заключается во взаимодействии фоторезиста с атомарным кислородом плазмы, в результате которого образуется двуокись углерода, вода и летучие окислы. Удаление фоторезиста при этом способе не зависит от его термообработки.

## **Фотошаблоны**

Требования к маскирующему покрытию фотошаблонов

1. Коэффициент отражения актиничного излучения должен быть минимальным. Чем больше коэффициент отражения покрытия, тем в большей степени может происходить увеличение размеров элементов топологии. Этот фактор более критичен при фотолитографии с травлением хрома (прямая), так как при этом значительное количество света отражается от хромированной подложки, а затем от покрытия

фотошаблона. Также при большом отражении может проявляться эффект стоячих волн, что может быть важно для процессов, в которых имеет значение профиль края.

2. Пропускание на длинах волн, при которых производится экспонирование, должно быть менее 1 %. С увеличением пропускания допуски на размеры элементов топологии будут увеличиваться.

3. Износостойкость является параметром, характеризующим долговечность фотошаблона и возможность его чистки. Этот параметр наиболее важен для контактной фотолитографии. Его можно характеризовать группой механической прочности по ОСТ 3-1901, а также числом контактов, которые выдерживает фотошаблон, до бракования. В зависимости от требований к фотошаблону по дефектам число контактов может иметь разные значения.

4. Минимальная ширина элементов топологии, которую может обеспечить маскирующее покрытие.

Для изготовления фотошаблонов используются специальные *стандартные заготовки*. Заготовки фотошаблонов выпускаются следующих видов: ППХ – пластина прецизионная хромированная; ППХФ – пластина прецизионная хромированная фоторезистовая; ППХ-Н – пластина прецизионная хромированная низкоотражающая; ППХФ-Н-К – пластина прецизионная хромированная низкоотражающая на полированной кварцевой заготовке.

Пластины выпускаются следующих размеров: 76×76, 102×102, 127×127, 153×153 мм и др. Диаметры рабочей зоны составляют соответственно 62, 78, 102 и 127 мм. По неплоскостности пластины разделяются на три группы А, Б1 и Б2. Для пластин 102×102 мм неплоскостность составляет 4, 7 и 15 мкм, для пластин 127×127 – 5, 10 и 20 соответственно. Толщина пластин может быть 2,2 или 3 мм. Материал пластин – стекло листовое, ГОСТ 111 или импортное. Для пластин с индексом К используется стекло кварцевое КУ-1 и КУ-2 (ГОСТ 15130) не хуже 3-й категории по показателю поглощения в ультрафиолетовой области спектра. Плотность дефектов размером более 1,5 мкм по слою хрома составляет не более 0,15 шт/см<sup>2</sup> для групп А и Б1 и 0,3 для группы Б2. Суммарная плотность дефектов размером более 1,5 мкм по слою хрома и пленке фоторезиста составляет 0,2 шт/см<sup>2</sup> для групп А и Б1 и 0,5 для группы Б2. Оптическая плотность по слою хрома на пластине при длинах волн 450–550 нм составляет 2,0 или 2,7. Толщина пленки фоторезиста составляет

0,4–1,0 мкм. Коэффициент отражения пластин ППХ-Н составляет не более 5 %.

Кроме указанных пластин в оптической промышленности используют *нестандартные заготовки* фотошаблонов. В качестве материала подложки используют стекло К8 (ГОСТ 3514), можно использовать кварцевое стекло (ГОСТ 15130). Эти материалы пропускают актиничное излучение, имеют высокую твердость (к сошлифовыванию) и химическую устойчивость. Класс чистоты поверхности подложки фотошаблона должен быть не хуже I (ГОСТ 11141), отклонение от плоскости N (цвет) должно быть не больше 3 мкм или 12 колец,  $\Delta N$  не больше 1. При изготовлении подложек для фотошаблонов должен применяться способ глубокой шлифовки-полировки.

В процессе экспонирования топология фотошаблона переносится на фоторезистивное покрытие в зеркальном изображении. Поэтому топология фотошаблона должна быть зеркальным изображением топологии детали. Если предполагается топологию на деталь наносить с помощью позитивного технологического процесса, то рабочий фотошаблон должен быть позитивным фотошаблоном. Если предполагается топологию на деталь наносить с помощью негативного технологического процесса, то рабочий фотошаблон должен быть негативным фотошаблоном. Кроме того, любой технологический фотолитографический процесс может вносить изменение в размеры и положение элементов топологии и технические характеристики топологии. Поэтому возможные изменения элементов топологии должны быть учтены путем ужесточения или изменения допусков элементов топологии рабочего фотошаблона и его технических характеристик.

### **Фотолитографическое оборудование**

В оптической промышленности, как правило, фотолитографическое оборудование разрабатывается и изготавливается каждым предприятием самостоятельно с учетом собственных технологий. Поэтому оборудование отличается большим разнообразием. Наиболее современным является оборудование, разработанное на базе аналогичного оборудования, применяемого в микроэлектронной промышленности, и состоящее из следующих модулей:

- установка мегазвуковой отмывки;
- установка обработки в парах ГМДС с использованием «горячей плиты»;



- установка нанесения фоторезиста методом центрифугирования;
- установка проявления фоторезиста методом центрифугирования;
- установка термообработки фоторезиста методом «горячая плита».

Оборудование предназначено для обработки подложек из стекла следующих размеров:

максимальный наружный диаметр, мм .....	150
максимальная сторона квадрата, мм .....	102
максимальная толщина, мм .....	8

Технические характеристики применяемых центрифуг:

диапазон задания скоростей вращения центрифуги, об/мин.....	100–6000
дискретность задания скорости вращения центрифуги, об/мин.....	10
точность поддержания скорости вращения центрифуги не хуже:	
в диапазоне скоростей 300–1000 об/мин, об/мин.....	±20
в диапазоне скоростей 1000–3000 об/мин, об/мин.....	±40
при скоростях более 3000 об/мин, % .....	±1
диапазон ускорений вращения центрифуги, об/мин/с.....	10–15000
дискретность задания времени, с.....	0,1

Технические характеристики «горячей плиты»:

диапазон регулирования температуры, °С.....	50–180
точность регулирования температуры, °С.....	±1,0
дискретность задания температуры, °С.....	1,0
дискретность задания времени, с.....	0,1

Для контактного экспонирования используются установки экспонирования ЭМ576, ЭМ583 и другие, также изготовленные для микроэлектронной промышленности и доработанные в соответствии с требованиями технологических процессов фотолитографии, применяемых в оптической промышленности.

Технические характеристики установки ЭМ-576КЭ:

минимальный размер элемента топологии, мкм.....	1,5
неравномерность освещенности рабочего поля Ø105 мм, не более, %.....	6
освещенность, лк.....	20000–30000
размеры используемых фотошаблонов.....	127×127 102×102

## **Чистота воздушной среды, микроклимат, специальные условия производства**

Обязательным условием проведения технологических операций обработки оптических деталей является выполнение требований к чистоте воздушной среды, температуре и влажности. Требования к чистоте воздушной среды и микроклимату обусловлены классом чистоты оптических полированных деталей, необходимостью выполнения требований чертежа по отклонению от заданной поверхности и требований к линейным размерам элементов топологии, угловой точности расположения элементов топологии, а также адгезионными свойствами поверхностей, участием молекул воды в химических реакциях, необходимостью поддержания постоянной вязкости основных и вспомогательных материалов и др.

При изготовлении фотошаблонов любая пылинка препятствует воздействию лазерного луча на хромовое покрытие, в результате чего образуется дефект типа «прокол», который при проведении операций фотолитографии приведет в зависимости от вида технологического процесса к появлению дефекта типа «точка» или «прокол» на каждой детали. Для устранения дефектов такого типа необходимо приложить дополнительные усилия. Другим результатом попадания пылинки на фотошаблон может быть его бракование.

Наиболее критичными деталями по отношению к чистоте воздушной среды являются геодезические лимбы и шкалы, имеющие нулевые классы чистоты полированных поверхностей. При их изготовлении способом обратной фотолитографии частицы могут вызывать дефекты типа «прокол» и разрывы элементов топологии. Попадание частиц между фотошаблоном и деталью при проведении операции экспонирования приведет к образованию зазора и, следовательно, к изменению линейных и угловых параметров, увеличению неровности края. Также попадание частиц между деталью и фотошаблоном может привести к бракованию детали и фотошаблона. Повышение запыленности воздуха выше определенного уровня приведет к полной остановке производства, т. е. выхода годных деталей не будет. Чистота воздушной среды особенно важна для способа обратной фотолитографии.

Основным средством поддержания требуемой чистоты воздушной среды и микроклимата является чистое помещение [4].

Чистым помещением называется помещение, в котором контролируется концентрация взвешенных в воздухе частиц, построенное и

используемое так, чтобы свести к минимуму поступление, выделение и удержание частиц внутри помещения, и позволяющее, по мере необходимости, контролировать другие параметры, например температуру, влажность и давление.

Частицей называется твердый или жидкий объект, имеющий размер в диапазоне 0,1–5,0 мкм. Размер частиц – это диаметр сферы, которая в контролирующем приборе дает отклик, равный отклику оцениваемой частицы.

Класс чистоты – это уровень чистоты по взвешенным в воздухе частицам, применимый к чистому помещению или чистой зоне, который определяет максимально допустимые концентрации (частиц на кубический метр) для заданных диапазонов размеров частиц. Классы чистоты могут быть от 1 до 9 ИСО (см. таблицу).

Класс ИСО	Максимально допустимые концентрации частиц, частиц/м <sup>3</sup> , с размерами, равными или большими следующих значений, мкм					
	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	5,0
1	10	2	–	–	–	–
2	100	24	10	4	–	–
3	1000	237	102	35	8	–
4	10000	2370	1020	352	83	–
5	100000	23700	10200	3520	832	29
6	1000000	237000	102000	35200	8320	293
7	–	–	–	352000	83200	2930
8	–	–	–	3520000	832000	29300
9	–	–	–	35200000	8320000	293000

Температура в помещениях, где проводятся операции фотолитографии, должна составлять  $(21 \pm 1) ^\circ\text{C}$ . Такие требования по температуре воздушной среды обусловлены необходимостью создания комфортных условий для работы персонала, поддержания постоянной вязкости фоторезиста, постоянства скоростей химических реакций и физических процессов, что в результате сказывается на качестве деталей и выходе годных деталей. Температура в помещении, где изготавливаются фотошаблоны с помощью лазерного генератора изображений CLWS-300, может иметь более широкий диапазон, но в процессе записи допустимые изменения температуры составляют  $\pm 0,2 ^\circ\text{C}$ . Это связано с возникновением напряжений в генераторе, которые приводят к ухудшению технических характеристик получаемых фотошаблонов.

Относительная влажность в помещениях, где проводятся операции фотолитографии, должна составлять  $(45 \pm 5) \%$ . Верхняя граница

обусловлена тем, что при относительной влажности более 50 % происходит образование на полированной поверхности стекла слоя воды. Эта вода будет препятствовать созданию требуемых адгезионных свойств поверхности – ухудшать сцепление стекла и покрытий, что может привести к появлению бракованных деталей. Кроме того, в помещениях проводится сушка после промывки водой в операциях обезжиривания и проявления. Нижняя граница относительной влажности обусловлена тем, что в химических реакциях, проходящих в фоторезистивном покрытии, участвуют молекулы воды. Уменьшение количества воды в воздухе может привести к изменению направления прохождения химических реакций и, следовательно, к ухудшению качества изображения или его изменению. Также установленные границы относительной влажности и температуры являются комфортными для работы персонала.

К специальным условиям производства при проведении технологических операций фотолитографии следует в первую очередь отнести требования по освещению помещений. Помещение для нанесения, термообработки, экспонирования и проявления фоторезиста должно иметь неактиничное освещение ( $\lambda > 0,58$  мкм, желтый свет), так как при обычном освещении происходит засветка фоторезиста, что может приводить к ухудшению технических характеристик деталей или браку. К специальным условиям производства также можно отнести требования по температуре сжатого воздуха, подаваемого на генератор изображений, скорости воздуха в чистом помещении, в котором работает генератор изображений, и др.

## ОПТИЧЕСКИЕ ШКАЛЫ

### Виды оптических шкал

Оптические шкалы можно разделить на следующие виды:

- геодезические или штриховые лимбы;
- кодовые лимбы;
- сетки;
- миры и тест-таблицы.

*Геодезические или штриховые лимбы.* Лимбы применяются для визуального считывания отсчета, как правило, в оптико-механических геодезических приборах. Они представляют собой стеклянную полированную подложку в виде кольца, на которой нанесена круговая шкала, состоящая из темных штрихов и расположенных около них цифр в нарастающем, убывающем или другом порядке, а также прямом или зеркальном изображении в соответствии с чертежом. Лимбы могут быть градусными (окружность состоит из 360 градусов) или градовыми (окружность состоит из 400 гон). Ширина штрихов находится в пределах, как правило, 1,5–10 мкм, ширина обводки цифр находится в пределах 4–12 мкм. Кроме штрихов и цифр на лимбах может иметься центрировочная окружность. Классы чистоты могут быть от 0–10 до 0–40, которые относятся ко всей полированной поверхности или определяются отдельно по зонам (в виде колец и секторов). Дефекты штрихов (разрывы и утолщения) определяются отраслевым стандартом и чертежом.

*Кодовые лимбы и круговые растры.* Лимбы применяются для автоматического считывания отсчета. Они представляют собой стеклянную полированную подложку в виде кольца, на которой нанесены круговые шкалы, состоящие из чередующихся темных и светлых штрихов. Кодовые лимбы могут иметь несколько таких шкал (разрядов), в каждом из которых количество штрихов увеличивается в два раза, начиная от двух. Круговые растры имеют одну шкалу, состоящую из, например, 4 096 или 8 192 светлых и темных штрихов (двоичный код), или 10 000 штрихов, или другого количества

чередующихся штрихов. Для некоторых видов лимбов темные и светлые штрихи могут иметь разную ширину, а также переменную ширину. Ширина штрихов, а также шаг (расстояние между центрами соседних светлых или темных штрихов) задаются в угловых значениях. Дополнительно могут задаваться и линейные размеры: ширина штрихов, разность ширины темных и светлых штрихов, неравномерность ширины светлых или темных штрихов. Светлые штрихи могут иметь прямоугольную форму, что характерно для лимбов и фотошаблонов лимбов, изготовленных механическим способом, или лимбов, отпечатанных с таких фотошаблонов. Темные штрихи в этом случае имеют форму трапеции. Также светлые и темные штрихи могут иметь радиальные кромки. На лимбах могут иметься вспомогательные выносные элементы топологии. Классы чистоты могут быть II–V.

*Сетки.* К сеткам можно отнести следующие виды оптических шкал: шкала, диафрагма, шкала-коллектив, сетка. Шкала представляет собой прямоугольную плоскую полированную подложку, на которой нанесена линейная оцифрованная шкала. Диафрагма представляет собой круглую плоскую полированную подложку, по периметру одной из сторон которой нанесено кольцо маскирующего покрытия. Шкала-коллектив представляет собой круглую полированную подложку, на плоской стороне которой нанесено маскирующее покрытие, в котором имеются прозрачные окна и знаки, в окнах имеется линейная или круговая оцифрованная шкала, обратная сторона имеет форму выпуклой сферы. Сетка представляет собой круглую полированную подложку, плоскую или имеющую форму выпуклой сферы с одной стороны, на плоской стороне которой имеется какая-либо топология (штрихи, цифры, диафрагма и др.). Классы чистоты сеток могут быть от 0–10 до II.

*Миры и тест-таблицы.* Мира представляет собой прямоугольную или круглую плоскую полированную подложку, на одной из сторон которой имеется специальная топология, предназначенная для контроля телевизионных систем или других приборов. Тест-таблица представляет собой прямоугольную или круглую плоскую полированную подложку, на одной из сторон которой нанесена специальная топология, имеющая окна с разным пропусканием и предназначенная для контроля и настройки телевизионных систем или других приборов. Классы чистоты могут быть от 0–10 до V.

## Подложки оптических шкал

Для изготовления подложек оптических шкал, как правило, используются стекла марок К8 (К108) и БК10 (БК110). Стекло БК10 разработано специально для получения шкал способом механического деления по воску и травления в парах или растворах плавиковой кислоты с последующим заполнением запуском, характеризуется низкой химической устойчивостью к кислым и щелочным растворам, а также к воде. Использование стекла БК10 для изготовления подложек шкал способами фотолитографии возможно с учетом того, что поверхность подложки может быть повреждена применяемыми растворами, следовательно, класс чистоты будет ухудшаться. Более вероятно использование стекла БК10 для способа обратной фотолитографии, чем для прямой фотолитографии, так как при этом применяются менее агрессивные растворы. Также стекло БК10 имеет невысокую твердость, что способствует образованию дефектов поверхности подложки и ухудшению класса чистоты. Стекло К8 является основным материалом подложек, используемых для нанесения шкал способами фотолитографии. Стекло К8 имеет достаточно высокую твердость, высокую химическую устойчивость, устойчиво к воде, непродолжительному воздействию щелочных и кислых растворов.

В связи с широким применением приборов, работающих в инфракрасном диапазоне, в качестве подложек стали применяться оптические кристаллы: лейкосапфир, фтористый барий, фтористый кальций, селенид цинка. Для изготовления шкал на подложках, изготовленных из фтористого бария, фтористого кальция и селенида цинка можно использовать только обратную фотолитографию, что обусловлено их низкой химической устойчивостью и твердостью.

Возможно использование других марок стекол и кристаллов в качестве материала подложки шкал, изготавливаемых способами фотолитографии. Эти материалы должны быть устойчивы к воде, проявителю (щелочной раствор), травителю (кислый раствор), ацетону и спирту, а также к воздействию температур до 150 °С. Для техпроцесса обратной фотолитографии устойчивость к кислым растворам не требуется, так как операция травления хрома отсутствует, максимальная температура также может быть снижена.

## Требования к подложкам оптических шкал

**Отклонение от плоскости или цвет  $N$ ,  $\Delta N$ .** Этот параметр влияет на неравномерность ширины элементов топологии, угловые погрешности, ограничивает минимальный размер элемента топологии. Для высокоточных лимбов (накопленная угловая погрешность расположения диаметров осей штрихов 3 угловые секунды) и шкал, имеющих элементы топологии шириной 1,5 мкм и неравномерность ширины элементов топологии не более 0,4 мкм, неплоскостность не должна превышать 3 мкм или  $N < 12$ . Местная ошибка ( $\Delta N$ ) не должна превышать значение 2. Большие значения  $N$  и особенно  $\Delta N$  могут привести к ухудшению технических характеристик.

**Классы чистоты.** Классы чистоты для подложек шкал устанавливаются, как правило, от 0–10 до V. Любые технологические процессы, связанные с подготовкой поверхности, нанесением оптических покрытий, другими видами обработки, приводят к ухудшению класса чистоты полированной поверхности. Техпроцессы фотолитографии и нанесения хромового покрытия могут снижать класс чистоты на 1–2 класса. С учетом этого класс чистоты подложки перед нанесением шкалы должен быть выше, чем после нанесения шкалы. Такое ужесточение класса чистоты должно быть учтено в техпроцессе полировки. Техпроцесс прямой фотолитографии с травлением хрома сильнее снижает класс чистоты по сравнению с техпроцессом обратной фотолитографии, т. е. шкалы, имеющие высокие классы чистоты, целесообразно изготавливать способом обратной фотолитографии. Шкалы, имеющие II–V классы чистоты можно изготавливать способом прямой фотолитографии. Для шкал, имеющих высокий класс чистоты, фотолитография приводит к появлению брака, связанного со снижением класса чистоты. Поэтому часть деталей возвращается на повторную полировку, а часть бракуется. Допустимое количество таких деталей регламентируется отраслевым стандартом и характеризуется коэффициентом повторяемости и коэффициентом запуска.

**Допуски на геометрические размеры подложки.** Толщина подложки является тем фактором, который определяет возможность переполитровки. Если толщина подложки находится на нижнем пределе допуска, то при переполитровке толщина выйдет за пределы допуска.

**Смещение центра рисунка (топологии) от центра внутренней или внешней окружности или наружных габаритных размеров,** которое имеет значения, как правило, 0,05–0,15 мм. Поле допуска на



базовый размер (внутренний диаметр или внешний диаметр) не должно превышать поле допуска на смещение центра рисунка, а поле допуска на габаритный размер для прямоугольных подложек не должно превышать удвоенного поля допуска на смещение центра рисунка. Это обусловлено совмещением детали с рисунком на фотошаблоне.

### **Маскирующие покрытия**

При изготовлении оптических шкал механическими способами в качестве маскирующего материала используется в случае деления по лаку хромовое покрытие, в случае деления по воску с последующим травлением в растворе или в парах плавиковой кислоты используется черный, белый или другой запуск, который втирается в углубления на стекле, в случае деления по серебряному покрытию используется соответственно серебряное покрытие. При изготовлении шкал способами фотолитографии в качестве маскирующего материала используется, как правило, хромовое покрытие. В некоторых случаях используется алюминиевое и никелевое покрытия, а также запуск. Возможно использование других маскирующих материалов.

### **Фотолитографические технологии**

В середине прошлого века основными способами изготовления оптических шкал являлись механические способы. Эти способы заключались в том, что на поверхность подложки наносилось защитное лаковое или восковое покрытие. Затем с помощью резцов и специального оборудования формировалась топология в защитном покрытии. Потом на поверхность лакового покрытия наносилось маскирующее покрытие, а детали с восковым покрытием травилась в парах или растворах плавиковой кислоты. После удаления лакового покрытия на поверхности подложки остается топология шкалы. После удаления воскового покрытия производится втирание запуска в углубления на поверхности подложки, образованные в процессе травления, в результате чего происходит окончательное формирование топологии шкалы. Начиная с 1960-х годов стали применяться фотолитографические технологии для изготовления оптических шкал. Эти технологии были заимствованы из микроэлектронной промышленности. До настоящего времени происходил постепенный переход от механических способов изготовления оптических шкал к

фотолитографическим способам. Наибольшую сложность при таком переходе на фотолитографические способы изготовления представляли собой детали, в которых в качестве маскирующего вещества используется белый запуск, который нельзя заменить другими маскирующими покрытиями, например хромовым. Это обусловлено тем, что светочувствительное покрытие (фоторезист) не обладает защитными свойствами по отношению к парам и растворам плавиковой кислоты.

Имеется два основных фотолитографических технологических процесса изготовления оптических шкал:

– техпроцесс фотолитографии с травлением маскирующего покрытия (прямая фотолитография – технология является позитивным процессом);

– техпроцесс обратной фотолитографии (технология является негативным процессом).

### **Техпроцесс изготовления кодовых лимбов способом прямой фотолитографии с травлением хрома**

Технические характеристики процесса: минимальная ширина элемента топологии составляет 5 мкм, допуск ширины элементов топологии составляет  $\pm 1,5$  мкм, отклонения ширины светлых элементов топологии от соответствующего размера на фотошаблоне 0–2 мкм, неравномерность ширины штрихов не более 1 мкм, накопленная угловая погрешность расположения диаметров осей штрихов не более 6 угловых секунд для диаметра 90 мм.

Технологические операции:

1. *Обезжиривание.* Обезжиривание производится в хромовой смеси или азотной кислоте. Затем детали промываются дистиллированной водой, сушатся и чистятся обезжиренной батиновой салфеткой, смоченной обезвоженным спиртом. Детали после обезжиривания должны хорошо смачиваться водой.

2. *Испарение хрома.* Хромовое покрытие наносится на вакуумной установке резистивным способом с промежуточной чисткой деталей между напылениями слоев хрома.

3. *Контроль качества хромового покрытия и его плотности или пропускания.* Проверяется по «свидетелю».

4. *Обезжиривание перед нанесением фоторезиста.* Обезжиривание поверхности деталей производится ватным тампоном, смоченным в спиртоэфирной смеси.

5. *Нанесение фоторезиста.* Фоторезист наносится способом центрифугирования. Слой фоторезиста должен иметь блестящую однородную поверхность без вкраплений и пузырей.

6. *Сушка.* Детали выдержать при комнатной температуре в течение 20–60 мин. Затем сушить при температуре 100 °С в течение 15 мин.

7. *Экспонирование.* Протереть поверхность хромового фотошаблона ватным тампоном, смоченным спиртоэфирной смесью или ацетоном. Установить деталь на фотошаблон – слой фоторезиста должен прилегать к маскирующему покрытию фотошаблона. Установить фотошаблон с деталью на предметное стекло или на оправу установки. Провести экспонирование. Время экспонирования подбирать опытным путем по результатам проявления.

8. *Проявление рисунка.* В качестве проявителя использовать 2%-ный раствор тринатрийфосфата. Опустить деталь в раствор. Проявить изображение. Температура раствора (20 ± 2) °С. Вынуть деталь из раствора через 0,5–1,5 мин. Промыть детали питьевой фильтрованной водой, затем дистиллированной водой. Сушить деталь на центрифуге или очищенным сжатым воздухом.

9. *Ретуширование.* Эта операция проводится с целью уменьшить дефектность темных элементов топологии. Провести ретушь всех дефектов, специальным лаком с помощью кисточки. Слой фоторезиста не должен иметь не закрытых ретушью повреждений.

10. *Термообработка.* Операция проводится при температуре 120–130 °С в течение 40 мин.

11. *Вытравливание рисунка.* Налить в чашку раствор для травления хрома. Опустить деталь в раствор. Ввести в раствор алюминиевую палочку, слегка касаясь хромового покрытия при травлении раствором на основе концентрированных растворов хлоридов кальция и цинка и соляной кислоты. Травить хром, протирая поверхность детали ватным тампоном. Промыть деталь водой. Сушить детали очищенным сжатым воздухом. Проверить под микроскопом качество травления и дефектность (точки, царапины, вырывы, проколы). Провести замеры ширины штрихов на микроскопе.

12. *Исправление дефектов.* Устранить местным травлением хромовые точки, имеющиеся на светлых участках детали. Дефекты деталей не должны превышать размер и количество дефектов, указанных в технических требованиях.

13. *Снятие лака.* Удалить лак с поверхности детали ватным тампоном, смоченным в бензине или растворителе. Промыть деталь водой. Высушить деталь очищенным сжатым воздухом. Проверить поверхность детали на отсутствие лака.

14. *Удаление покрытия.* Удалить с поверхности детали защитное фоторезистивное покрытие ватным тампоном, смоченным в спирте, ацетоне или растворе щелочи. Промыть деталь в воде. Сушить деталь очищенным сжатым воздухом. Положить деталь под микроскоп. Проверить поверхность детали на отсутствие фоторезиста.

15. *Контроль.* Проверить дефектность прозрачных и непрозрачных участков на соответствие требованиям чертежа. Проверить соответствие ширины и неравномерности ширины элементов топологии требованиям чертежа. Остальные параметры обеспечиваются паспортизацией фотошаблона.

16. *Контроль.* Проверка угловой погрешности кодовых лимбов проводится на установке контроля лимбов АС700 (УКЛ).

Способом прямой фотолитографии можно изготавливать и другие оптические шкалы (сетки, миры и др.). Для каждого вида деталей, топологии, размера подложки, а также в зависимости от технических требований режимы проведения технологических операций будут меняться. Технические характеристики способа прямой фотолитографии можно улучшить, но наилучшие характеристики оптических шкал получаются при использовании способа обратной фотолитографии.

### **Технологический процесс изготовления геодезических лимбов способом прецизионной обратной фотолитографии**

Технические характеристики процесса [4]: минимальная ширина элемента топологии 1,5 мкм, неравномерность ширины элементов топологии 0,3 мкм (с учетом того, что на фотошаблоне неравномерность 0,2 мкм), допуск ширины элементов топологии  $\pm 0,5$  мкм, отклонения ширины элементов топологии от соответствующего размера на фотошаблоне  $\pm 0,3$  мкм, накопленная угловая погрешность расположения диаметров осей штрихов не более 3 угловых секунд для диаметра 90 мм.

Технологические операции:

1. *Предварительное обезжиривание.* Протереть каждую подложку безворсовой салфеткой, смоченной в ацетоне. Установить подложку в кассету. Кассету с подложками передать в чистое помещение (ЧП).

2. *Обезжиривание.* Переставить подложки в кассету с маркировкой «для ЧП». Кассету без маркировки вернуть обратно. Передача кассет и деталей производится с помощью передаточного окна. Подложку брать за торцы так, чтобы пальцы не касались рабочей зоны. Обработка поверхности подложек производится на установке проявления фоторезиста.

Ввести рецепт, по которому будет выполняться операция обработки подложки. Нажать клавишу «Работа». Установка находится в режиме ожидания подложки, столик центрифуги поднят. Установить диаметр подачи чистящего раствора и воды. Установить подложку на столик центрифуги, нажать клавишу «Пуск». Чистить подложку при подаче чистящего раствора. Снять подложку со столика центрифуги после полной отработки рецепта. Обработку подложки произвести с обеих сторон. В дальнейшем рабочей стороной является сторона подложки, обработанная последней. Установить подложку в кассету.

3. *Контроль.* Установить приспособление для контроля на предметный столик микроскопа, установить деталь в приспособление. Контролировать подложки на наличие загрязнений. Если обнаружены жировые загрязнения, остатки полирующих веществ, ворсинки и другие загрязнения, то подложки с выявленными загрязнениями направить на операцию 2.

4. *Обработка поверхности подложки адгезивом.* Операция производится на установке обработки в парах ГМДС. Ввести рецепт. Нажать клавишу «Работа». Установить подложку на оправу, нажать клавишу «Пуск». Снять подложку после полной отработки заданного рецепта. Установить подложку в кассету. Перед нанесением фоторезиста сделать выдержку подложек не менее 15 мин.

5. *Нанесение фоторезиста.* Операция производится на установке нанесения фоторезиста.

Включить на блоке управления дозатором режим «Прокачка», при заполнении трубопровода фоторезистом режим «Прокачка» отключить. Ввести рецепт. Нажать клавишу «Работа», установка находится в режиме ожидания подложки, столик центрифуги поднят. Установить диаметр подачи фоторезиста. Установить подложку на столик центрифуги, нажать клавишу «Пуск». Снять подложку со столика центрифуги после полной отработки рецепта. Контролировать качество нанесенного слоя фоторезиста визуально на каждой подложке. Слой должен быть сплошным, однородным, не должен иметь

проколов, трещин, радиально расходящихся лучей. При некачественном нанесении слоя фоторезиста подложку передать на операцию 1.

Установить подложку в кассету. Перед термообработкой сделать выдержку подложки в течение 10 мин.

6. *Термообработка.* Операция производится на установке термообработки. Ввести рецепт. Нажать клавишу «Работа». Установить подложку на оправу, нажать клавишу «Пуск». Снять подложку после полной отработки рецепта. Установить подложку в кассету. Сделать выдержку подложек не менее 10 мин.

7. *Экспонирование.* Операция производится на установке экспонирования ЭМ-576КЭ. Чистить фотошаблон безворсовой салфеткой, смоченной ацетоном. Установить подложку нанесенным слоем фоторезиста на фотошаблон, предварительно обдуть поверхности подложки и фотошаблона сжатым воздухом. Установить камеру на плиту шаблонодержателя. Задать время экспонирования декадным переключателем. Время экспонирования подбирается экспериментально. Повернуть плиту шаблонодержателя в зону экспонирования. Провести экспонирование. Повернуть плиту шаблонодержателя в исходное положение. Снять камеру. Снять подложку, установить в кассету.

8. *Проявление фоторезиста.* Операция производится на установке проявления фоторезиста. Ввести рецепт. Нажать клавишу «Работа», установка находится в режиме ожидания подложки, столик центрифуги поднят. Установить диаметр подачи проявителя. Установить подложку на столик центрифуги. Нажать клавишу «Пуск». Снять подложку с проявленным рисунком после полной отработки рецепта. Установить подложку в кассету. Раствор для проявления менять каждую смену.

9. *Контроль.* Установить приспособление для контроля на предметный столик микроскопа, установить деталь в приспособление. Измерить ширину штриха на первых трех деталях. Контролировать качество проявленной шкалы на всех деталях. При несоответствии проявленного изображения требованиям чертежа передать на операцию 1.

10. *Испарение хрома.* Операция производится на вакуумной установке ВУ-1А.

11. *Снятие фоторезиста.* Переставить подложки в кассеты без маркировки, перенести кассеты за пределы ЧП. Переставить подложки в кассеты для снятия фоторезиста. Погрузить кассету с подложками в ванну, наполненную ацетоном. Ванну закрыть крышкой. Выдержать подложки в течение 15 мин. Вынуть кассету с подложками

из ванны. Протереть каждую деталь батистовой салфеткой, смоченной ацетоном, и установить в кассету.

12. *Исправление дефектов.* Устранить с помощью раствора для травления хрома хромовые точки.

13. *Контроль ширины штрихов.* Произвести измерение ширины штрихов и цифр нанесенной шкалы в соответствии с требованиями чертежа с помощью микроскопа.

14. *Контроль угловых параметров лимбов.* Контролировать угловые параметры лимбов на соответствие требованиям чертежа с помощью установки контроля лимбов АС-700.

15. *Контроль качества штрихов.* Контролировать качество штрихов, цифр, чистоту поверхности в рабочей зоне в соответствии с требованиями чертежа с помощью микроскопа.

Способом обратной фотолитографии можно изготавливать кодовые лимбы, сетки, миры и др. Для каждого вида деталей, топологии, размера подложки, а также в зависимости от технических требований режимы проведения технологических операций будут меняться.

Выше рассмотрены два основных технологических процесса фотолитографии. Существует большое количество фотолитографических технологий, используемых для изготовления оптических шкал. Они могут отличаться по виду маскирующего покрытия шкалы и фотошаблона, по способам и режимам проведения операций, по применяемому фоторезисту и др. Но в основе их лежат технологические процессы прямой или обратной фотолитографии. Отдельно можно остановиться на фотолитографических технологиях, связанных с обращением изображения и с рельефным травлением стекла под запуск.

О возможности обращения изображения уже говорилось выше. Существуют фоторезисты, которые в зависимости от последовательности и условий проведения операций могут быть или позитивными, или негативными фоторезистами. Примером такого фоторезиста может быть фоторезист ФПН-20-ИЗО. Если его применять как позитивный фоторезист, то с его помощью можно реализовать технологические процессы прямой и обратной фотолитографии, которые были рассмотрены. Но если после экспонирования провести дополнительно термообработку и экспонирование без фотошаблона, то в результате проведения технологического процесса прямой фотолитографии можно получить негативное изображение, а в результате проведения

технологического процесса обратной фотолитографии можно получить позитивное изображение. Имеются специальные задачи, для решения которых не обойтись без применения обращения изображения. Кроме того, обращение изображения позволяет использовать один и тот же фотошаблон в технологическом процессе обратной фотолитографии для получения и негативного и позитивного изображения топологии на детали.

Ранее было сказано, что нельзя использовать фоторезист для создания рельефа в стекле под запуск из-за недостаточных защитных свойств фоторезистивного покрытия по отношению к парам и растворам плавиковой кислоты. Тем не менее эта задача решается и в настоящее время существует фотолитографическая технология, предназначенная для создания рельефа в стекле под запуск с использованием плавиковой кислоты или травителя в виде пасты [5]. По сравнению с механическим способом технология фотолитографии позволяет создать произвольную топологию на поверхности стекла с использованием запуска в качестве маскирующего покрытия. Кроме химического травления стекла для создания рельефа под запуск может быть использовано ионное травление.

## **Способы изготовления фотошаблонов оптических шкал**

### **Механические способы изготовления фотошаблонов оптических шкал**

Эти способы до недавнего времени были основными способами изготовления фотошаблонов в оптической промышленности.

Фотошаблоны кодовых лимбов и растров изготавливались на круговых делительных машинах ТКФ. Предварительно на подложки фотошаблонов наносилось серебряное покрытие химическим способом (реакция серебряного зеркала) в несколько слоев. На покрытие наносилось дополнительно защитное лаковое покрытие. Деление проводилось алмазным резцом по серебру через защитное покрытие. Алмазный резец затачивался на определенную ширину, например 16 мкм. При делении фотошаблона растра за один проход резца образуется светлый штрих прямоугольной формы. Такая форма штриха обусловлена только способом изготовления, так как для лимба более целесообразна форма штриха в виде трапеции, т. е. когда края штриха имеют радиальное направление. При необходимости остатки серебра в штрихах травятся азотной кислотой. Если штрихи имели



достаточную ширину, например 50 мкм, то границы светлых и темных участков могли иметь радиальное направление.

Фотошаблоны сеток, линейных шкал, мир и др. изготавливали делением на ручных микромашинках или универсальных измерительных микроскопах, доработанных для этих целей, по серебряному покрытию или покрытию защитного лака. Во втором случае после деления напыляли хром и снимали лак.

Механические способы изготовления фотошаблонов имеют следующие недостатки:

- невозможно изготовить фотошаблоны геодезических (штриховых) лимбов;
- большая трудоемкость изготовления фотошаблонов;
- невозможно изготовить фотошаблоны сложной формы;
- низкое качество и низкая износостойкость фотошаблонов, имеющих серебряное покрытие.

### **Изготовление фотошаблонов с помощью генераторов изображений**

Генератор изображений – это устройство, воспроизводящее в пленке фоторезиста топологию фотошаблона-оригинала или рабочего фотошаблона по информации, поступающей от компьютера. В микроэлектронной промышленности используются генераторы изображений, работающие в прямоугольной системе координат и воспроизводящие топологию в пленке фоторезиста, нанесенной на хромированную подложку. Использование таких генераторов изображений возможно в определенных случаях и в оптической промышленности. Основная проблема состоит в том, что при использовании прямоугольной системы координат очень сложно получить высокую угловую точность расположения элементов топологии в круговых оптических шкалах. Поэтому для изготовления фотошаблонов в оптической промышленности был разработан лазерный генератор изображений (круговая лазерная записывающая система) CLWS-300, работающий в полярных координатах [6]. Он позволяет изготавливать фотошаблоны круговых оптических шкал, имеющих высокую угловую точность расположения элементов топологии, а также прецизионные фотошаблоны, имеющие произвольную топологию. Достоинством генератора является также то, что в нем используется термохимическая технология записи [7]. Это означает, что хромовое

маскирующее покрытие заготовки фотошаблона одновременно выполняет функции и фоторезиста. Под воздействием лазерного луча происходит изменение свойств хромового покрытия, что приводит к селективности облученных и необлученных участков по отношению к специальному травителю. Из этого следует, что для изготовления фотошаблона с помощью генератора CLWS-300 не требуется дополнительно комплекта фотолитографического оборудования для нанесения, термообработки, проявления и снятия фоторезиста, работающего в чистых помещениях.

Технические характеристики лазерного генератора изображений CLWS-300 [6]:

угловая погрешность расположения элементов топологии, угловые секунды.....	±1
разрешающая способность системы радиальных перемещений, мкм.....	0,05
разрешающая способность системы угловых перемещений, угловые секунды.....	±0,2
пространственное разрешение, лин/мм.....	1000
неровность края штрихов круговых шкал, мкм.....	0,1
минимальная ширина штрихов, мкм.....	1,0
максимальная неравномерность ширины штрихов, мкм.....	0,2
максимальный размер рабочего поля, мм.....	285
материал записи.....	хром
материал подложки.....	стекло
максимальная толщина подложки, мм.....	25

Условия эксплуатации лазерного генератора изображений CLWS-300:

1. Генератор должен эксплуатироваться в ЧП класса 6 ИСО, ГОСТ 14644-1-2002.

2. Температура воздушной среды ( $22 \pm 2$ ) °С, относительная влажность воздуха ( $60 \pm 20$ ) %.

3. За время формирования топологии изменение температуры воздушной среды не должно превышать  $\pm 0,2$  °С.

4. Скорость движения воздуха не более 0,15 м/с.

### **Изготовление фотошаблонов с помощью фотолитографических технологий**

Генераторы изображений являются очень дорогостоящим оборудованием. Изготовление с их помощью фотошаблонов также достаточно трудоемко. Наиболее целесообразно изготавливать с помощью генератора фотошаблоны-оригиналы, а рабочие фотошаблоны изго-

тавливать копированием с помощью фотолитографических технологий. Применяемые для изготовления фотошаблонов фотолитографические технологии аналогичны рассмотренным выше. Некоторые отличия заключаются в режимах проведения технологических операций, что обусловлено разными формами подложек. Выбор конкретной технологии определяется ее техническими характеристиками, техническими возможностями оборудования, экономической целесообразностью и др. При изготовлении рабочих фотошаблонов и фотошаблонов-оригиналов необходимо учитывать, как будет меняться изображение при переходе от фотошаблонов-оригиналов к рабочим фотошаблонам и далее к деталям. Каждое экспонирование меняет изображение на зеркальное, поэтому все рабочие фотошаблоны имеют зеркальное изображение топологии относительно топологии детали, а фотошаблоны-оригиналы – соответственно прямое изображение. Также с учетом выбранных фотолитографических технологий топология фотошаблона может иметь негативное или позитивное изображение. Если деталь будет изготавливаться способом обратной фотолитографии, который является негативным технологическим процессом, изображение рабочего фотошаблона должно быть негативным. Если и рабочий фотошаблон будет изготавливаться способом обратной фотолитографии, то фотошаблон-оригинал должен иметь прямое изображение топологии относительно топологии детали. Также меняются допуски и технические характеристики при переходе от детали к рабочему фотошаблону и фотошаблону-оригиналу. Не всегда имеется возможность постепенно менять допуски и технические характеристики. Тогда наибольшие допуски и возможности изменения технических характеристик оставляют для технологического процесса изготовления деталей, так как их производство является крупносерийным. Фотошаблоны являются инструментами для изготовления деталей, а их производство является единичным. Поэтому имеется возможность отобрать фотошаблон с требуемыми характеристиками из нескольких фотошаблонов.

## **ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ, ТРЕБУЮЩИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИИ НА ПОВЕРХНОСТИ**

Наибольшее развитие фотолитографические технологии получили в производстве оптических шкал. Но существует ряд оптических деталей, на поверхности которых требуется сформировать элементы топологии с использованием какого-либо покрытия. На этих деталях элементы топологии формировались или механическим способом, или, там где это было возможно, с использованием механических масок при напылении покрытий. Использование высокопроизводительных фотолитографических технологий позволило уйти от трудоемких механических способов, повысить качество и выход годных оптических деталей.

### **Металлизированные зеркальные покрытия**

В качестве металлизированных зеркальных покрытий на оптических деталях используются, как правило, алюминиевое и серебряное покрытия. Указанные покрытия характеризуются высокими коэффициентами отражения и низкой механической прочностью. Низкая механическая прочность покрытий обусловила сложность работы с ними. Поэтому формировать элементы топологии с использованием металлизированных зеркальных покрытий наиболее целесообразно с использованием способа обратной фотолитографии. При использовании подложек, подобных подложкам, которые применяются для изготовления оптических шкал, применяемый технологический процесс обратной фотолитографии аналогичен процессу, рассмотренному выше. Но существуют оптические детали, имеющие сложную форму, на которые следует нанести металлизированные зеркальные покрытия. К одному из наиболее сложных видов таких деталей можно отнести призмы, на одной из граней которых, например гипотенузной, наносится зеркальное покрытие в виде зоны, ограниченной с трех сторон краями детали и с одной стороны границей в виде прямой линии [8]. Форма подложек и технические требования к

покрытиям выявили целый ряд технологических особенностей, возникающих при формировании топологии способом обратной фотолитографии:

1. При нанесении фоторезиста способом центрифугирования на краю призмы образуется утолщение (так называемый «валик»), от которого в процессе проявления надо полностью избавиться, так как рабочая зона с покрытием выходит на края детали.

2. При проявлении фоторезистивного покрытия способом центрифугирования на подложке, имеющей прямоугольную форму, в отличие от подложек сеток и лимбов, имеющих круглую форму, происходит сбрасывание проявителя и проявление происходит только в пределах вписанного круга.

3. Неравномерность термообработки при использовании способа «горячая плита», что обусловлено формой подложки.

4. Экспонирование фоторезиста в зоне, расположенной с противоположной стороны относительно рабочей зоны с покрытием в результате переотражения актиничного излучения, что приводит к проявлению фоторезиста в этой зоне.

5. Сложности совмещения подложки и фотошаблона из-за больших допусков на базовые размеры или отсутствия базовых размеров.

Все эти особенности потребовали внесения существенных изменений в технологический процесс обратной фотолитографии. Были значительно изменены скорости и ускорения вращения при нанесении и проявлении фоторезиста способом центрифугирования. Для термообработки способом «горячая плита» была разработана специальная оправка. Для напыления покрытия была также разработана специальная оправка, предотвращающая напыление в нерабочей зоне. При экспонировании для совмещения подложки и фотошаблона предложено использовать несколько фотошаблонов, у которых ограничительные упоры расположены так, чтобы охватить всё поле допуска базового размера. Комплексное решение всех вопросов, связанных с этими проблемами, позволило разработать технологический процесс обратной фотолитографии, с помощью которого возможно формирование элементов топологии металлизированных зеркальных покрытий на подложках в виде призм, отвечающих требованиям конструкторской документации.

## **Диэлектрические зеркальные покрытия**

Существует ряд оптических деталей, на часть плоской поверхности которой, а иногда и на сферической, требуется нанести диэлектрическое зеркальное покрытие. Подложки таких деталей могут иметь круглую форму, форму восьмиугольника или другую; толщина может достигать восьми и более миллиметров, а длина – ста и более миллиметров. Наносимые покрытия могут состоять из нескольких десятков слоев, а их толщина может достигать нескольких микрон. В качестве пленкообразующих веществ могут применяться оксиды кремния, циркония и др. Применение таких веществ исключает использование технологии прямой фотолитографии с травлением покрытия. Большая толщина диэлектрического зеркального покрытия затрудняет применение технологии обратной фотолитографии. Это связано с тем, что для проведения технологического процесса обратной фотолитографии толщина фоторезистивного покрытия должна быть больше толщины покрытия, с помощью которого формируются элементы топологии. В оптических шкалах толщина хромового покрытия составляет около 0,1 мкм, а толщина фоторезистивного покрытия при их изготовлении составляет около 0,5 мкм. В данном случае для увеличения толщины фоторезистивного покрытия необходимо использовать фоторезист, имеющий большую вязкость, и наносить его несколько раз на поверхность подложки. Всё это приводит к существенным изменениям режимов и последовательности технологических операций: нанесения фоторезиста, термообработки, экспонирования, проявления фоторезиста, удаления фоторезиста. Также существует технология фотолитографии с использованием технологического металлизированного покрытия, но она является более сложным и трудоемким процессом, чем обратная фотолитография.

### **Использование фотолитографии при изготовлении других деталей**

Существует большое количество оптических деталей, при изготовлении которых используется фотолитография. К одному из видов таких деталей относятся детали типа клин. На этих деталях требуется в нерабочей зоне, близкой к наружному диаметру, нанести риску, обозначающую направление клина. К основным проблемам, возникающим при нанесении риски, можно отнести необходимость совмещения риски с отметкой, указывающей направление клина и

расположение риски в узком кольце между краем детали и рабочей зоной. Для нанесения риски наиболее целесообразно использовать способ обратной фотолитографии, так как на деталях могут быть нанесены оптические покрытия, и указанный способ наиболее способствует их сохранению.

Нанесение риски требуется на некоторых деталях в целях их совмещения при сборке изделия. Нанесение риски хромовым маскирующим покрытием производится с использованием рассмотренных выше фотолитографических технологий. Для нанесения риски, представляющей собой углубление в стекле К8, используется фотолитографическая технология, предназначенная для создания рельефа в стекле с использованием плавиковой кислоты или травителя в виде пасты.

Создавать рельеф на поверхности требуется на призмах, которые соединяются с помощью глубокого оптического контакта, с целью получить полное внутреннее отражение. В этом случае топологию (круг) можно формировать с помощью фотолитографических технологий, а рельеф создавать также с использованием плавиковой кислоты или травителя в виде пасты.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Фотолитографические технологии нашли широкое применение в оптической промышленности при изготовлении оптических деталей разного назначения. В первую очередь это разнообразные оптические шкалы, а также другие детали, требующие формирования на поверхности топологии какого-либо покрытия. Наиболее высокие технические характеристики деталей позволяет получать способ обратной фотолитографии: минимальные угловые и линейные погрешности размеров элементов топологии и расположения элементов топологии, высокие классы чистоты полированных поверхностей. Способ обратной фотолитографии позволяет использовать для изготовления подложек различные оптические материалы, обладающие как высокой химической и механической устойчивостью, так и низкой химической и механической устойчивостью. Также указанный способ позволяет использовать в качестве маскирующего покрытия или покрытия, в котором необходимо сформировать топологию, большое количество разнообразных оптических покрытий. Необходимым условием реализации способа обратной фотолитографии является использование помещений с контролируемой чистотой воздушной среды и микроклиматом – чистых помещений.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моро У. Микролитография. В 2 ч. / У. Моро. М. : Мир, 1990. 1239 с.
2. Введение в фотолитографию / под ред. В. П. Лавринцева. М. : Энергия, 1977. 400 с.
3. Пат. 2370799 Российская Федерация, МПК G 02 В 27 / 00. Способ изготовления оптических шкал обратной фотолитографией / Кручинин Д. Ю. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение “Уральский оптико-механический завод” имени Э. С. Яламова» (ФГУП «ПО УОМЗ»). № 2008110272/28 ; заявл. 17.03.08 ; опубл. 20.10.09, Бюл. № 29. 8 с.
4. ГОСТ ИСО 14644-1-2002. Межгосударственный стандарт. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Ч. 1–7. М. : Изд-во стандартов, 2003.
5. Пат. 2430391 Российская Федерация, МПК G 02 В 27 / 32, G 03 F 7 / 004. Способ изготовления прецизионных оптических шкал методом фотолитографии с запуском (варианты) / Кручинин Д. Ю. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение “Уральский оптико-механический завод” имени Э. С. Яламова» (ФГУП «ПО УОМЗ»). № 2010107364/28 ; заявл. 27.02.10 ; опубл. 27.09.11, Бюл. № 27. 8 с.
6. Модернизация оптического делительного производства Уральского оптико-механического завода на основе современных лазерно-компьютерных и фотолитографических технологий / Абрамов Ю. Ф. [и др.] // Оптический журнал. 2006. Т.73, №8. С. 61–65.
7. Лазерная технология изготовления круговых шкал и кодовых дисков / Ведерников В. М. [и др.]. Новосибирск, 1986. 39 с.
8. Кручинин Д. Ю. Использование обратной фотолитографии для формирования топологии на призмах / Д. Ю. Кручинин, О. Б. Яковлев // Труды IX Международной конференции «Прикладная оптика – 2010». В 3 т. Т. 2. Оптические технологии и материалы. СПб. : ООР, 2010. С. 172–173.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ФОТОЛИТОГРАФИЯ .....	3
Основные термины .....	4
Фоторезисты .....	5
Основные технологические операции .....	7
Фотошаблоны .....	21
Фотолитографическое оборудование .....	23
Чистота воздушной среды, микроклимат, специальные условия производства .....	25
ОПТИЧЕСКИЕ ШКАЛЫ .....	28
Виды оптических шкал .....	28
Подложки оптических шкал .....	30
Маскирующие покрытия .....	32
Фотолитографические технологии .....	32
Способы изготовления фотошаблонов оптических шкал .....	39
ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ, ТРЕБУЮЩИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИИ НА ПОВЕРХНОСТИ .....	43
Металлизированные зеркальные покрытия .....	43
Диэлектрические зеркальные покрытия .....	45
Использование фотолитографии при изготовлении других деталей .....	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	48

*Учебное издание*

**Кручинин Дмитрий Юрьевич,  
Фарафонтова Елена Павловна**

**ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ**

Редактор *И. В. Коршунова*  
Компьютерная верстка *Т. С. Кринициной*

Подписано в печать 20.02.2014. Формат 60×90/16.  
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 3,25.  
Уч.-изд. л. 3,3. Тираж 50 экз. Заказ № 213.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8 (343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс: 8 (343) 358-93-06  
E-mail: press-urfu@mail.ru

*Для заметок*

