

ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77

Методы устранения дефектов топологии интегральных микросхем на фотошаблонах

В.А.Беспалов, В.А.Овчинников, Д.В.Базанов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

С.М.Аваков

Научно-производственное республиканское унитарное предприятие
«КБТЭМ-ОМО» (Минск, Беларусь)

Проанализированы методы устранения дефектов топологии интегральных микросхем на фотошаблонах. Выявлены наиболее эффективные методы устранения прозрачных и непрозрачных дефектов при производстве фотошаблонов под уровень ИС с нормами до 90 нм.

Технологический процесс формирования топологии интегральных схем на фотошаблонах является основой при производстве ИМС. Топология современной интегральной схемы представляет собой сложную структуру, состоящую из десятков и сотен миллионов геометрических фигур. Генерирование такой структуры на металлизированном фотошаблоне в точном соответствии с проектными данными за один цикл фотолитографии представляет собой неразрешимую задачу. Поэтому неотъемлемой частью технологического процесса изготовления фотошаблонов является операция устранения обнаруженных дефектов, так как наличие лишь только одного пропущенного дефекта в одном слое интегральной схемы делает ее неработоспособной и, следовательно, приводит к многомиллионным убыткам [1].

Оборудование для устранения дефектов маскирующего покрытия фотошаблонов, так же как и оборудование для автоматического контроля соответствия топологического рисунка фотошаблона проектным данным и поиска дефектов, является достаточно дорогостоящим, особенно при использовании технологии раздельного устранения прозрачных и непрозрачных дефектов. При этом для устранения прозрачных дефектов используется, как правило, ионно-лучевая или электронно-лучевая установки, а для устранения непрозрачных дефектов – электромеханическая установка с микрозондом или импульсный лазер с малой длительностью импульса.

Каждый конкретный вид дефектов маскирующего покрытия фотошаблона является следствием нарушения технологических процессов при формировании скрытого изображения топологического рисунка фотошаблона на генераторе изображения (ГИ), химической обработки проэкспонированной пластины, нарушения выполнения требований вакуумной гигиены в чистых производственных помещениях, а также зависит от качества фотошаблонных заготовок и применяемых материалов. Характерные дефекты и причины их появления на фотошаблонах представлены в табл.1.

Таблица 1

Основные виды дефектов фотошаблонов и причины их появления

Вид дефекта	Предполагаемые причины появления дефектов
Разрыв, перемычка на топологическом элементе фотошаблона	Повышенная запыленность в помещении, дефект маскирующего покрытия фотошаблонной заготовки, низкая адгезия маскирующего покрытия к стеклянной подложке фотошаблонной заготовки
Остатки маскирующего покрытия	Нарушение условий вакуумной гигиены, дефекты и включения в фоторезисте, загрязнения химических растворов (проявителя, травителя маскирующего покрытия), нарушение технологических режимов травления
Прокол маскирующего покрытия	Дефект маскирующего покрытия шаблонной заготовки, дефект фоторезистивной маски, ошибка режима химической обработки проэкспонированных пластин, например, неправильно выбраны концентрация проявителя, время проявления фоторезиста
Вырыв на краю элементов топологического рисунка фотошаблона	Низкая адгезия маскирующего покрытия к стеклу фотошаблонной заготовки, низкая адгезия фоторезиста к маскирующему покрытию фотошаблона
Отсутствие элемента	Повышенная запыленность в производственных помещениях во время экспонирования фоторезиста, включения в фоторезисте, наличие инородных частиц на поверхности фоторезиста

В зависимости от сложности изготавливаемого фотошаблона и наличия специального технологического оборудования можно использовать различные технологические процессы поиска и устранения дефектов. Методы обнаружения и устранения дефектов при производстве фотошаблонов представлены в табл.2

Таблица 2

Методы обнаружения и устранения дефектов фотошаблонов

Тип фотошаблона		
Фотошаблон в масштабе 10:1 для технологии уровня 1,5 мкм и более	Фотошаблон в масштабе 5:1 для технологии уровня от 0,8 до 1,5 мкм	Фотошаблон в масштабе 5:1 или 4:1 для технологии уровня менее 0,8 мкм
Методы поиска дефектов		
1. Визуальный контроль при помощи микроскопа с увеличением не менее 200 ^x . 2. Телевизионная микроскопия. 3. Оптическое наложение изображений, сравнение двух модулей одного фотошаблона. 4. Обнаружение дефектов топологического рисунка фотошаблона методом сравнения с исходными проектными данными на установке автоматического контроля	1. Оптическое наложение изображений, сравнение двух модулей одного фотошаблона. 2. Обнаружение дефектов топологического рисунка фотошаблона методом сравнения с исходными проектными данными на установке автоматического контроля	1. Обнаружение дефектов топологического рисунка фотошаблона методом сравнения с исходными проектными данными на установке автоматического контроля

Тип фотошаблона		
Фотошаблон в масштабе 10:1 для технологии уровня 1,5 мкм и более	Фотошаблон в масштабе 5:1 для технологии уровня от 0,8 до 1,5 мкм	Фотошаблон в масштабе 5:1 или 4:1 для технологии уровня менее 0,8 мкм
Методы устранения прозрачных дефектов		
1. Объемная ретушь. 2. Маскирование полупрозрачными материалами. 3. Двойное маскирование. 4. Обратная литография. 5. Лазерно-стимулированное осаждение металлоорганического вещества из газообразной фазы. 6. Электронное стимулированное осаждение металлоорганического вещества. 7. Формирование ионным лучом фазовых решеток, призм в области прозрачного дефекта	1. Обратная литография. 2. Маскирование полупрозрачными материалами 3. Лазерно-стимулированное осаждение металлоорганического вещества из газообразной фазы. 4. Электронное стимулированное осаждение металлоорганического вещества 5. Формирование ионным лучом фазовых решеток, призм в области прозрачного дефекта	1. Лазерно-стимулированное осаждение металлоорганического вещества из газообразной фазы. 2. Электронное стимулированное осаждение металлоорганического вещества. 3. Формирование ионным лучом фазовых решеток, призм в области прозрачного дефекта
Методы устранения непрозрачных дефектов		
1. Удаление участков хрома (непрозрачных дефектов) электромеханическим микрозондом. 2. Испарение участков хрома (непрозрачных дефектов) импульсным лазером. 3. Устранение непрозрачных дефектов фотошаблона методом ионного распыления. 4. Распыление участков хрома (непрозрачных дефектов) при помощи реагента, стимулированного электронным лучом		

Методы обнаружения дефектов фотошаблонов с использованием визуального контроля при помощи микроскопа, телевизионной микроскопии, оптического наложения изображения характеризуются высокой трудоемкостью, достоверностью контроля не более 90%, проблемой точного определения координат дефектов. Для рассмотренных методов минимальный обнаруживаемый дефект составляет 1 мкм.

При обнаружении дефектов топологического рисунка фотошаблона методом сравнения с исходными проектными данными все несовпадения классифицируются как дефект с точным указанием его размера и местоположения на поверхности фотошаблона. Величина обнаруживаемого дефекта зависит от технических характеристик установки. Например, на установке автоматического контроля ЭМ-6329 («КБТЭМ-ОМО», Беларусь) минимальный обнаруживаемый дефект равен 0,25 мкм, время контроля одного фотошаблона 1 ч, достоверность контроля 99,9%.

Методы устранения прозрачных дефектов маскирующего покрытия фотошаблона. Для устранения обнаруженных прозрачных дефектов используются следующие методы: объемная ретушь, маскирование полупрозрачной пленкой, двойное маскирование, обратная литография, лазерно-стимулированное осаждения металлоорганического вещества из газообразной фазы, электронное стимулированное осаждение металлоорганического вещества, формирование ионным лучом фазовых решеток, призм в области прозрачного дефекта.

Метод устранения дефектов при помощи объемной ретуши представляет собой самый простой способ устранения дефектов маскирующего покрытия. Обнаруженные при визуальном контроле дефекты типа прокол, вырыв устраняются при помощи объемной ретуши на основе эпоксидных смол с наполнителями, не пропускающими свет с длиной волны $\lambda = 436$ нм, после чего фотошаблон подвергается температурной обработке (рис.1).

Преимуществами данного метода являются простота и низкая стоимость технологической операции, а недостатками – большая неровность края формируемых элементов и неконтролируемое разрушение нанесенного покрытия при отмывке фотошаблона. Кроме того, минимальный размер капли ретуши составляет 30–50 мкм, что позволяет устранять дефекты только на фотошаблонах для ИС малой степени интеграции. Указанные недостатки обуславливают ограниченность применения данного метода.

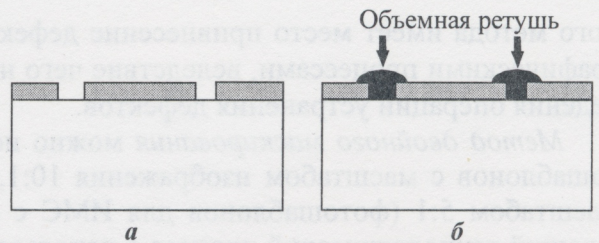


Рис. 1. Устранение дефектов при помощи объемной ретуши на основе эпоксидных смол: а – обнаруженные дефекты при визуальном контроле фотошаблона; б – нанесение объемной ретуши в область дефекта с последующей термообработкой

Метод устранения локальных дефектов при помощи маскирования полупрозрачной пленкой окиси железа может использоваться для исправления дефектов фотошаблонов с масштабом изображения 10:1, а также для некоторых фотошаблонов с масштабом 5:1 (фотошаблонов для ИМС с малой степенью интеграции). Размер минимального элемента для таких фотошаблонов не может быть меньше 5 мкм. Соответствующий технологический процесс схематично представлен на рис.2. До начала визуального контроля на поверхность фотошаблона с проколами в маскирующем слое наносится полупрозрачная пленка окиси железа методом пиролитического осаждения из пентакарбонила железа или напылением в вакуумной установке. Обнаруженные дефекты при визуальном контроле маскируются при помощи фоторезиста или объемной ретуши на основе эпоксидной смолы и после межоперационной термообработки фотошаблон передается на операцию травления. При проведении операции жидкостного травления уничтожается вся пленка полупрозрачного материала кроме замаскированных областей, после чего фоторезист или эпоксидная смола удаляется.

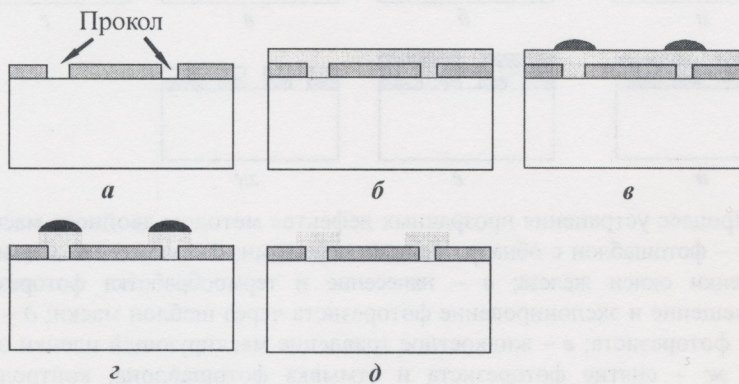


Рис. 2. Устранение прозрачных дефектов методом маскирования полупрозрачной пленкой: а – обнаруженные дефекты типа прокол; б – нанесение маскирующей пленки окиси железа; в – нанесение фоторезиста или объемной ретуши в область дефекта и термообработка; г – жидкостное травление маскирующей пленки окиси железа; д – снятие с поверхности фотошаблона фоторезиста или объемной ретуши

Преимуществами метода являются хорошая адгезия наносимого материала и принципиальная возможность устранения дефектов на краях элементов топологии, а недостаток – необходимость использования дополнительной установки пиролитического осаждения или установки вакуумного напыления. Кроме того, при использовании дан-

ного метода имеет место привнесение дефектов, связанных с дополнительными литографическими процессами, вследствие чего необходим вторичный контроль после проведения операции устранения дефектов.

Метод двойного маскирования можно использовать для устранения дефектов фотошаблонов с масштабом изображения 10:1, а также для некоторых фотошаблонов с масштабом 5:1 (фотошаблонов для ИМС с малой степенью интеграции). Соответствующий технологический процесс с использованием установок контактной печати схематично представлен на рис.3. До начала технологической операции устранения дефектов необходимо изготовить технологическую маску промежуточного шаблона с топологическим рисунком, аналогичным тому, который необходимо ремонтировать, но с зеркальным изображением, а также нанести полупрозрачную пленку окиси железа методом пиролитического осаждения из пентакарбонила железа или напылением в вакуумной установке и пленку фоторезиста. Для компенсации ошибки ориентации промежуточного шаблона и маски на установке совмещения и экспонирования размеры топологических элементов делают большими на 0,8 мкм на сторону по сравнению с ремонтируемым фотошаблоном. На установке контактной печати проводится совмещение и экспонирование фотошаблона и маски. После проявления фоторезиста, жидкостного травления пленки окиси железа, снятия фоторезиста и отмывки фотошаблон необходимо проверить на наличие остатков маскирующего покрытия. Данный метод можно использовать, применяя генераторы изображения, где изображение шаблона маски формируется по заданной управляющей информации.

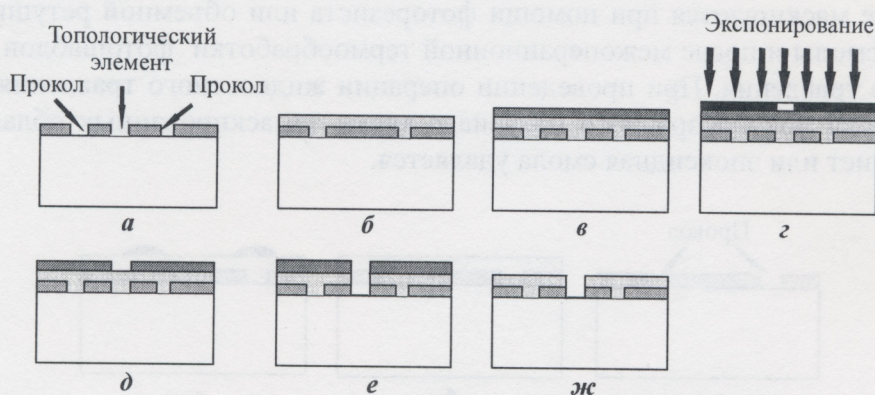


Рис.3. Процесс устранения прозрачных дефектов методом двойного маскирования: а – фотошаблон с обнаруженными дефектами; б – нанесение маскирующей пленки окиси железа; в – нанесение и термообработка фоторезиста; г – совмещение и экспонирование фоторезиста через шаблон маски; д – проявление фоторезиста; е – жидкостное травление маскирующей пленки окиси железа; ж – снятие фоторезиста и отмывка фотошаблона, контроль на наличие недопустимых дефектов типа остатки маскирующего покрытия

Преимуществами метода являются хорошая адгезия наносимого материала, устранение всех проколов маскирующего покрытия без проведения операции поиска этих дефектов, а недостатками – необходимость изготовления фотошаблона маски, использование дополнительной установки пиролитического осаждения или установки вакуумного напыления, установки нанесения и сушки фоторезиста. Кроме того, возможно привнесение дефектов типа остатки маскирующего покрытия при травлении защитной пленки полупрозрачного материала, поиск которых затруднен из-за ее полупрозрачности, так как отсутствует резкий контраст изображения. Качество и величина ремонтируемых краевых дефектов определяется точностью совмещения фотошаблона и маски, а также величиной технологической коррекции на размеры топологических элементов.

Метод устранения прозрачных дефектов обратной литографией (*lift-off process*) достаточно распространен при ремонте фотошаблонов масштабом 5:1, изготавливаемых для технологии производства ИС уровня от 0,8 до 1,5 мкм (рис.4). При контроле рабочего поля фотошаблона фиксируются координаты расположения дефектов типа прокол, вырыв. На поверхность фотошаблона наносится фоторезист, который подвергается термообработке. Селективное экспонирование в зоне дефекта осуществляется через прямоугольную диафрагму лазерной установки устранения дефектов, например ЭМ-551Б. В процессе операции проявления фоторезист в зоне экспонирования удаляется. При напылении хрома по всей поверхности фотошаблона происходит заполнение проявленных областей, а при взрывном удалении фоторезиста в растворителе, оставшийся фоторезист удаляется вместе с лишним металлом, так что хром остается только в тех местах, где были отверстия с напыленным металлом.

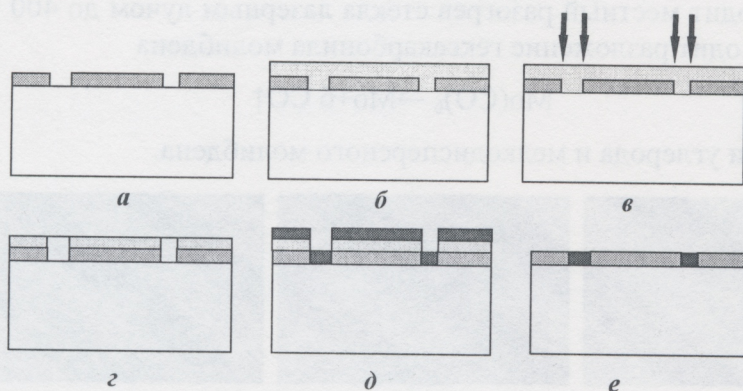


Рис.4. Процесс устранения прозрачных дефектов методом обратной литографии: а – фотошаблон с обнаруженными прозрачными дефектами; б – нанесение фоторезиста и термообработка; в – селективное экспонирование фоторезиста в зоне дефекта лазером; г – проявление фоторезиста; д – напыление хрома по всей поверхности фотошаблона; е – взрывное удаление фоторезиста в растворителе

Преимуществом метода является высокая степень адгезии напыленного металла, при этом формируется «планарная заплатка» толщиной, соизмеримой с толщиной основного маскирующего слоя, что обеспечивает возможность устранения краевых дефектов элементов топологии. К недостаткам следует отнести длительность и сложность процесса, что часто приводит к порче шаблона из-за привнесения дополнительных дефектов во время проведения литографических операций.

Метод устранения прозрачных дефектов с помощью ионно-лучевой установки используется для вытравливания в стеклянном шаблоне с помощью ионного луча оптических микроструктур – фазовых решеток, призм и различных линзоподобных структур, которые становятся «непрозрачными» для ультрафиолетового излучения установок проекционной печати, так как призматическая структура блокирует падающее излучение настолько же эффективно, как и хромовое покрытие (рис.5).

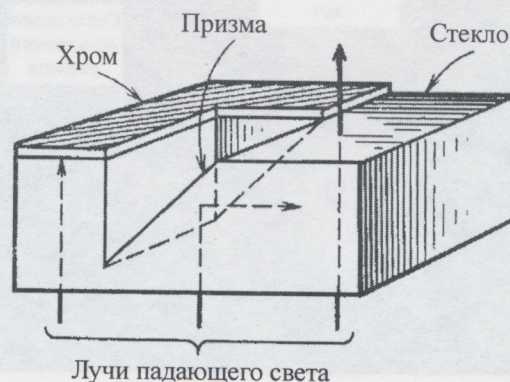
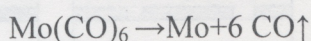


Рис.5. Призматическая структура, вытравленная в стеклянной поверхности

Преимуществами метода являются стабильный характер ремонта, невозможность случайного удаления структуры, высокая точность позиционирования (100 нм) возможность «залечивания» прозрачных дефектов с субмикронной точностью [2]. К недостаткам следует отнести необходимость рассчитывать форму призматических линз для различных типов стекла шаблона (кварц, щелочное) и учитывать такие процессы, как ионная имплантация, радиационное повреждение или распыление материала поверхности шаблона.

Метод устранения прозрачных дефектов с использованием лазерно-стимулированного осаждения металлоорганического вещества из газообразной фазы является одним из основных для ремонта дефектов сложных фотошаблонов [3]. Осаждение металла на прозрачный дефект осуществляется путем лазерного стимулирования, например, гексакарбонила молибдена из газообразной фазы (рис.6). При этом в зоне осаждения происходит местный разогрев стекла лазерным лучом до 400 °С, в результате которого происходит разложение гексакарбонила молибдена



с выделением окиси углерода и мелкодисперсного молибдена.

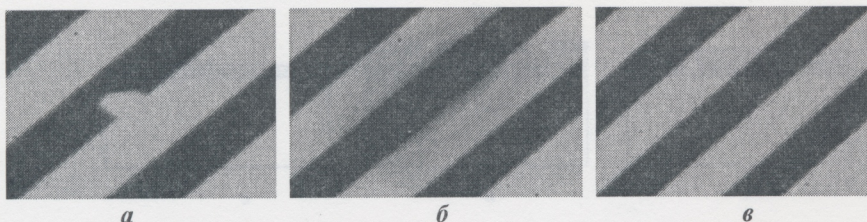


Рис.6. Устранение прозрачного дефекта методом осаждения металлоорганического вещества из газообразной фазы: а – обнаруженный дефект маскирующего покрытия типа вырыв; б – осаждение металлоорганического вещества из газообразной фазы; в – удаление краевого распыления осаждаемого вещества с помощью лазерного испарения

Преимуществами метода являются хорошая адгезия наносимого материала, возможность устранения дефектов на краях элементов топологии, возможность «залечивания» прозрачных дефектов с субмикронной точностью, стабильный характер процесса, поскольку осажденный металл нельзя удалить случайно или по небрежности. Недостатки – необходимость устранять распыленное вещество на краях элемента.

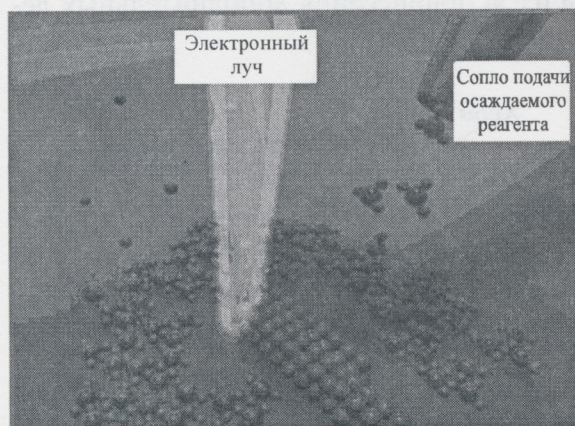


Рис.7. Осаждение металла на прозрачный дефект

Метод электронного стимулированного осаждения металлоорганического вещества используется для осаждения металла во время электронного стимулирования малой энергией специального вещества в зоне наличия дефекта [4]. Координаты и площадь ремонтируемого дефекта для осаждения задаются с рабочей станции оператора. В зону ремонта через сопло подается специальный реагент (рис.7).

Преимуществами метода являются хорошая адгезия наносимого материала, возможность устранения дефектов на краях элементов топологии, при этом из-

менение размера элемента топологического рисунка менее 3 нм, возможность «залечивания» прозрачных дефектов сложной конфигурации с субмикронной точностью. К недостаткам следует отнести сложность установки устранения дефектов, необходимость компенсации «паразитного» заряда электронов на поверхности фотошаблона.

Методы устранения непрозрачных дефектов. Непрозрачные дефекты фотошаблонов типа перемычка, выступ, остаток маскирующего покрытия устраняются при помощи специального технологического оборудования ремонта фотошаблонов: электронно-лучевой, ионно-лучевой, лазерной, электромеханической установок. Алгоритм работы перечисленных установок один – необходимо устранить ненужные участки хрома с заданной точностью в нужном месте, не повредив при этом соседние элементы топологического рисунка, стеклянную подложку, и обеспечить бездефектное изображение топологического рисунка фотошаблона.

Метод устранения непрозрачных дефектов при помощи ионно-лучевой установки основан на ионном распылении остатков маскирующего покрытия – хрома. Поскольку процесс является нетермическим, воздействию подвергаются только те участки фотошаблона, на которые непосредственно попадает ионный луч. Одно из преимуществ состоит в том, что ионный луч может быть сфокусирован в пятно диаметром 0,1 мкм и менее. Путем тщательного позиционирования ионного луча и управления скоростью распыления можно, например, с высокой точностью отрегулировать положение края линии. К недостаткам следует отнести ионную имплантацию, радиационное повреждение или распыление материала поверхности шаблона, так как ионный луч одновременно используется для отображения фрагментов шаблона и для выполнения ремонта. Кроме того, необходимо обеспечить нейтрализацию заряда в связи с тем, что стеклянные фотошаблоны являются очень хорошими изоляторами и обладают способностью поглощать заряд, а это может нарушать работу установки из-за отклонения луча.

Метод устранения непрозрачных дефектов при помощи электронно-лучевой установки аналогичен методу устранения прозрачных дефектов. В качестве основного процесса при ремонте фотошаблонов используется химический процесс вытравливания остатков хрома при взаимодействии электронного луча со специальным реагентом, подаваемым через дозирующее сопло в зону дефекта. Координаты и площадь дефекта для травления задаются с рабочей станции оператора. Преимуществами метода является возможность устранять краевые дефекты с высокой точностью (7 нм) и различные маскирующие покрытия фотошаблонов (Cr, TaN, MoSi, SiC, Si). К недостаткам следует отнести необходимость обеспечить нейтрализацию заряда, так как стеклянные фотошаблоны являются очень хорошими изоляторами и обладают способностью накапливать заряд на поверхности фотошаблона, а это может привести к искажению формы электронного луча и погрешности позиционирования из-за его отклонения.

Метод устранения непрозрачных дефектов на электромеханической установке (например, SPR6300) в настоящее время используют некоторые зарубежные производители фотошаблонов. Принцип устранения дефектов основан на механическом скрайбировании участка с остатками маскирующего покрытия специальным алмазным зондом. В заданную координату расположения дефекта вводится алмазный зонд, который механическим воздействием устраняет дефект [5]. На рис.8. показана принципиальная схема устранения дефекта, фотографии образцов до и после устранения дефекта.

Преимуществом метода является возможность устранения любых металлов с поверхности фотошаблона, которые применяются для формирования маскирующего слоя и фазосдвигающих элементов – PSM (хром, силицид молибдена, соединения углерода). Недостатки – высокая стоимость, критичность оборудования к уровню настройки и соблюдению технологического процесса, так как имеется вероятность катастрофического повреждения стеклянной подложки фотошаблона.

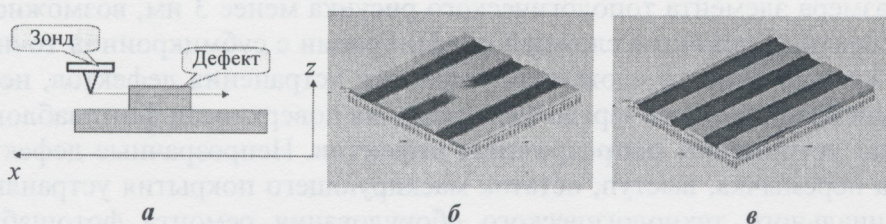


Рис.8. Устранение дефектов алмазным зондом: а – схема устранения дефекта; б – непрозрачный дефект маскирующего покрытия; в – дефект устранен

Метод лазерного испарения участка хрома при помощи лазера с малой длительностью импульса основан на принципе, когда металл сначала плавится, а затем испаряется (рис.9). Достоинством метода является простота и технологичность процесса. В зависимости от длины волны лазерного источника минимальный размер устраняемого дефекта может быть от 200 до 500 нм. Возможно устранение как отдельно стоящих дефектов, так и дефектов края по заданной программе. Малая длительность импульса лазера позволяет свести к минимуму неровность края ремонтируемого элемента и повреждения стеклянной подложки. К недостаткам следует отнести необходимость пробного испарения в нерабочей площади с целью соблюдения энергетических режимов на данной поверхности маскирующего покрытия фотошаблона.

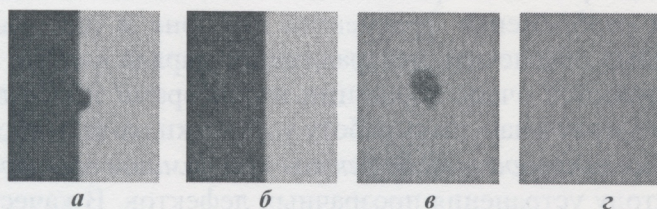


Рис.9. Устранение дефектов маскирующего покрытия лазером с малой длительностью импульса: а – обнаруженный дефект типа выступ на краю топологического элемента фотошаблона; б – дефект устранен; в – обнаруженный дефект типа остаток хрома; г – дефект устранен

Анализ методов устранения прозрачных и непрозрачных дефектов показал, что предпочтение при изготовлении бездефектных фотошаблонов в масштабе 5:1 или 4:1 для технологии изготовления ИМС уровня 0,8–0,09 мкм необходимо отдать электронно-лучевому и лазерному методам, так как, во-первых, эти методы обеспечивают процесс устранения прозрачных и непрозрачных дефектов с заданными техническими характеристиками, а во вторых, что очень существенно, устранение прозрачных и непрозрачных дефектов можно выполнять в едином технологическом цикле на одной установке. При этом надо учитывать, что электронно-лучевой метод, с одной стороны, обеспечивает высокое разрешение процесса, но с другой – характеризуется невысокой производительностью, сложностью технологического процесса. Лазерные методы, напротив, характеризуются высокой производительностью и относительной простотой технологического процесса и низкой стоимостью оборудования, но при этом обеспечивают менее высокое разрешение. Очевидно, что при этом необходимо отдать предпочтение методам, обеспечивающим меньший уровень затрат.

Например, на производственной линии Центра фотошаблонов МИЭТ при изготовлении фотошаблонов для ИМС с проектными номами до 0,25 мкм с успехом используется установка лазерной ретуши фотошаблонов ЭМ-5001Б («КБТЭМ-ОМО», Беларусь).

Размер минимального устраняемого непрозрачного дефекта составляет 400 нм, неровность края не превышает 500 нм, погрешность наведения луча лазера не более 0,5 мкм. Минимальный диаметр осаждаемого вещества на поверхность фотошаблона не более 2 мкм.

Для устранения дефектов маскирующего покрытия фотошаблонов под уровень ИС с проектными нормами 180–90 нм целесообразно использовать электронно-лучевую установку MeRiT® MG 45, которая имеет точность воспроизведения 7 нм (3 сигмы), изменение ширины линии CD < 3 нм и позволяет устранять дефекты маскирующих покрытий, применяемых при формировании фазосдвигающих элементов (PSM).

Литература

1. Аваков С.М., Карпович С.Е., Овчинников В.А., Титко Е.А. Операции контроля топологии в технологическом процессе изготовления фотошаблонов // Электроника инфо. – 2008. – № 1. – С. 43.
2. Ионно-лучевая установка для ремонта фотошаблонов // Электроника. – № 1. – 1986. – Т. 59. – С. 99, 100.
3. Оптико-механические комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм / С.М.Аваков, С.Е.Карпович, В.А.Овчинников и др. // Фотоника. – 2007. – № 6. – С. 35–37.
4. Ehrlich I.C., Edinger K., Boegli V., Kuschnerus P. Application data of the electron beam based photomask repair tool MeRiT MG // Lectures Held at the GMM Conference. EMLC. – 2005. – P. 125–129.
5. White R., Verbeek M., Bozak R., Klos M. Use of nanomachining as a technique to reduce scrap of high-end photomasks. // 21-st Annual BACUS Symposium on Photomask Technology / Ed. G.T. Dao, B.J. Grenon. – 2002. – Vol. 4562. – P. 213–224.

Статья поступила
28 июля 2008 г.

Овчинников Вячеслав Алексеевич – начальник отдела Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и элементно-компонентная база» МИЭТ. *Область научных интересов:* методы, модели, алгоритмы технологических процессов изготовления бездефектных фотошаблонов для сложных интегральных схем.

Беспалов Владимир Александрович – доктор технических наук, проректор МИЭТ по научной и инновационной деятельности. *Область научных интересов:* технология ИС на основе сложных полупроводников, фотоэлектроника, зондовая микроскопия.

Базанов Дмитрий Владимирович – инженер отдела Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и элементно-компонентная база» МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка технологических процессов изготовления фотошаблонов для сложных интегральных схем.

Аваков Сергей Мирзоевич – доктор технических наук, директор Научно-производственного республиканского унитарного предприятия «КБТЕМ-ОМО» (г. Минск, Беларусь). *Область научных интересов:* методы, модели, алгоритмы автоматического контроля топологии субмикронных планарных структур в производстве изделий микроэлектроники.