

ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77

Исследование технологического процесса устранения прозрачных дефектов маскирующего покрытия фотошаблонов

В.А.Овчинников

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Установлены закономерности изменения ширины линии осажденного материала в зависимости от скорости перемещения координатного стола установки и энергии лазерного излучения. Определены технологические режимы процесса устранения прозрачных дефектов на фотошаблоне.

Топология современной интегральной схемы представляет собой сложную структуру, состоящую из десятков и сотен миллионов геометрических фигур. Технологический процесс формирования топологического рисунка интегральных схем на фотошаблонах, которые используются для переноса изображения на кремниевую пластину методом проекционной печати, является важнейшим в обеспечении кристалльного производства. Безошибочное (бездефектное) 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 автоматического контроля топологии на соответствие проектным данным и поиска недопустимых дефектов, а также операция их устранения [1].

В связи с высокой стоимостью фотошаблонов и сложностью их производства (стоимость одного фотошаблона может исчисляться тысячами долларов) изготовители стремятся использовать все возможности для исправления («ремонта») дефектов маскирующего покрытия фотошаблонов [2].

С точки зрения «ремонта» фотошаблонов все обнаруженные недопустимые дефекты можно подразделить на два больших класса – прозрачные дефекты, исправление которых осуществляется путем формирования фрагментов металлизированной фотомаски, и непрозрачные дефекты, исправление которых выполняется путем удаления лишних фрагментов. Известно, что для устранения прозрачных дефектов используется, как правило, ионно-лучевая установка, а для устранения непрозрачных дефектов – электромеханическая установка с микрозондом [3]. Более дешевой и эффективной является технология, основанная на устранении прозрачных и непрозрачных дефектов на одной лазерной установке. При этом непрозрачные дефекты устраняются путем испарения ненужных участков хрома при помощи импульсного лазера с малой длительностью импульса, а прозрачные – путем лазерно-стимулированного осаждения металлоорганического вещества из газообразной фазы.

Технологический процесс устранения прозрачных дефектов фотошаблонов на установке лазерной ретуши включает в себя две основополагающие операции: автоматический контроль топологии и поиска недопустимых дефектов и непосредственный ремонт топологического рисунка в маскирующем слое фотошаблона. Технологический процесс устранения прозрачных дефектов характеризуется необходимостью обеспечения двух основных параметров, характеризующих качество технологического процесса – степенью адгезии осаждаемого вещества к подложке фотошаблона и точностью местоположения ремонтируемого фрагмента топологии фотошаблона. Для обеспечения воспроизводимости этих параметров на допустимом уровне исследован и разработан технологический процесс устранения прозрачных дефектов маскирующего покрытия фотошаблонов на установке лазерной ретуши ЭМ-5001Б, производства РУП «КБТЭМО» (Минск, Беларусь).

Операция автоматического контроля топологии и поиска дефектов. Очевидно, что качество операции поиска недопустимых дефектов определяет качество технологического процесса устранения дефектов в целом. Дополнительной сложностью при этом является необходимость оценки степени критичности обнаруживаемых дефектов для выполнения последующих операций проекционного переноса изображений с фотошаблона на кремниевую пластину. Решить проблему поиска недопустимых дефектов маскирующего слоя фотошаблона можно, применяя операцию автоматического контроля топологического рисунка фотошаблона (рис.1) на соответствие проектным данным, так как только этот метод позволяет обнаруживать все типы дефектов геометрии маскирующего покрытия согласно классификации SEMI [4]. При этом контроль выполняется для всех фотошаблонов без исключения (100%-ный контроль). Принцип контроля заключается в формировании при помощи специального программно-аппаратного комплекса изображения топологического рисунка фотошаблона и сравнении его с эталонными проектными данными. Все несовпадения топологического рисунка фотошаблона и проектных данных классифицируются как дефекты (рис.2.) [5], которые необходимо устранить, так как даже один недопустимый дефект на поверхности маскирующего покрытия может пропечататься на кремниевой пластине во время формирования топологического рисунка и привести к неработоспособности интегральной микросхемы.

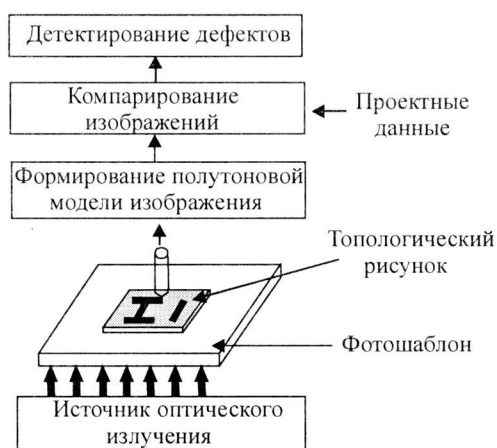


Рис.1. Схема контроля топологического рисунка фотошаблона на соответствие проектным данным

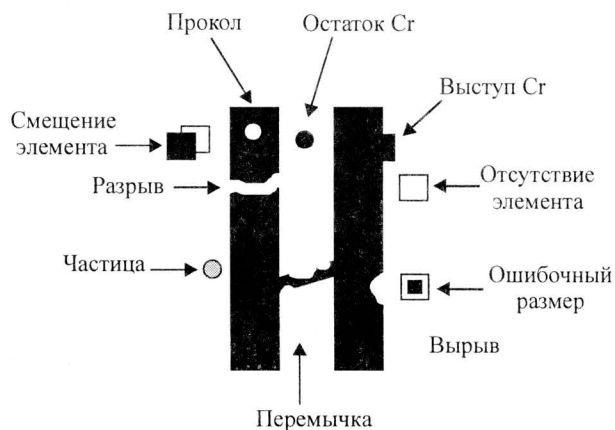


Рис.2. Дефекты качества, наблюдаемые при изготовлении фотошаблонов

Очевидно, что каждый конкретный вид дефекта является следствием нарушения процесса формирования топологического рисунка на генераторе изображения (ГИ), процесса химической обработки, качества фотошаблонных заготовок, состояния и класса чистых производственных помещений. Перечень характерных дефектов и возможные причины их появления представлены в табл. 1, выбор технологических операций показан в табл.2.

Таблица 1

Примеры дефектов топологии и возможные причины их появления

Вид дефекта	Предполагаемые причины появления дефектов
Смещение элемента	Сбой работы ГИ, электропроводки по сети питания, ошибка проектирования топологии
Разрыв, перемычка	Повышенная запыленность в помещении, дефект маскирующего покрытия, низкая адгезия маскирующего покрытия к стеклянной подложке
Частица	Запыленность в помещении, загрязнения в химических растворах
Прокол	Дефект шаблонной заготовки, дефект фоторезистивной маски, ошибка режима химической обработки, например неправильно выбрана концентрация проявителя
Вырыв	Низкая адгезия маскирующего покрытия к стеклу фотошаблонной заготовки, низкая адгезия фоторезиста к маскирующему покрытию
Ошибочный размер	Ошибка при проектировании, неверно задана технологическая коррекция, нарушение технологического процесса химической обработки
Отсутствие элемента	Повышенная запыленность, включения в фоторезисте, сбой технологической установки ГИ
Выступ хрома, остаток хрома	Нарушение условий вакуумной гигиены, дефекты и включения в фоторезисте, загрязнения в химических растворах

Зная природу возникновения дефектов и проводя мониторинг технологического процесса изготовления фотошаблонов для производства СБИС, можно принять соответствующие меры по снижению исходной дефектности фотошаблонов, что существенно снижает трудоемкость ремонта.

Таблица 2

Выбор технологической операции в зависимости от типа обнаруженного дефекта

Наименование дефекта	Действия	Используемое оборудование
Прокол, разрыв, вырыв	Лазерно-стимулированное осаждение металлоорганического вещества из газовой фазы. Фотошаблон после «ремонта» годен для эксплуатации	Лазерная установка ремонта фотошаблонов
Перемычка, выступ, остаток	Испарение фрагментов маскирующего слоя лазерным лучом. Фотошаблон после «ремонта» годен для эксплуатации	То же
Глобальное смещение, отсутствие, элементов топологии, несоответствие размеров элементов топологии проектным данным	Неустраняемый дефект. Фотошаблон бракуется	Установка контроля топологии и поиска дефектов
Большое количество посторонних частиц, высокий уровень загрязнений	Отмывка фотошаблона	Установка отмывки фотошаблонов

Контроль топологического рисунка фотошаблона на соответствие проектным данным и поиск дефектов проводился на автоматической установке контроля топологии и поиска дефектов ЭМ-6029Б производства РУП «КБТЭМ-ОМО» (Минск, Беларусь). В результате получена дефектная ведомость фотошаблона, классифицированная по классу дефекта, с точным указанием координаты, размера, тональности (прозрачный или непрозрачный) дефекта. Анализ дефектной ведомости и характера дефекта позволяет принять решение о выборе технологической операции устранения дефектов.

Процесс устранения прозрачных дефектов фотошаблонов на установке лазерной ретуши ЭМ-5001Б. Для проведения исследований технологического процесса устранения прозрачных дефектов в работе использовалась лазерная установка ретуши ЭМ-5001Б, которая включает в себя оптико-механическое устройство, стойку управления, блок питания лазера, рабочее место оператора. Установка полностью совместима с установкой ЭМ-6029Б в части выхода координатного стола в область дефекта в соответствии с дефектной ведомостью. Характерной особенностью данной установки является сочетание двух рабочих лазеров (импульсного и непрерывного), которые позволяют устранять как непрозрачные, так и прозрачные дефекты фотошаблона в едином технологическом цикле.

Непрозрачные участки (остатки хрома) устраняются путем испарения при помощи лазера с малой длительностью импульса. Минимальный размер ремонтируемого непрозрачного участка маскирующего покрытия фотошаблона составляет 0,5 мкм. Для устранения прозрачных дефектов типа прокол, разрыв, вырыв установка используется в режиме «Осаждение» с применением лазера непрерывного действия. Осаждение металла на прозрачный дефект осуществляется путем лазерного стимулирования вещества из газообразной фазы. При этом газовая фаза создается устройством нагрева вещества – на основе гексакарбонила молибдена $\text{Mo}(\text{CO})_6$, который представляет собой твердое вещество белого цвета, сублимирующееся при температуре 30–40 °С и разлагающееся при температуре 150–400 °С. При нагреве пары металлоорганического вещества образуют газообразную фазу, которая при помощи инертного газа подается через специальный капилляр в зону осаждения.

Максимальные размеры ремонтируемых прозрачных и непрозрачных дефектов не регламентируются и дефекты устраняются путем наложения ремонтируемых участков.

С целью обеспечения качества технологического процесса при устранении недопустимого прозрачного дефекта (например, прокола или вырыва) важно обеспечить высокую степень адгезии осаждаемого материала к поверхности маскирующего покрытия фотошаблона и сформировать размер области осаждения, соизмеримый с величиной размера ремонтируемого элемента топологического рисунка. Установлено, что степень адгезии и размер осаждаемой области зависят от величины плотности энергии непрерывного лазера, скорости и шага перемещения координатного стола, времени нагрева в заданной точке, а также от материала стекла фотошаблонной заготовки (кварцевое или щелочное стекло). С целью определения параметров технологического процесса в режиме устранения прозрачных дефектов, в частности определения зависимости ширины линии осаждаемого материала от скорости перемещения координатного стола и энергии излучения, проводились исследования влияния режимов осаждения на степень адгезии и величину размера линии, получаемой путем осаждения металлоорганического вещества. Осаждение материала проводилось на фотошаблонные заготовки из кварцевого и щелочного стекла с хромовым маскирующим покрытием. Технологические режимы и результаты измерений при операции осаждения представлены в табл.3, фотографии осажденной области показаны на рис.3.

Технологические режимы и результаты измерений ширины линии осажженного материала на подложках из кварцевого и щелочного стекла

Скорость перемещения координатного стола v , мкм /с		Энергия излучения E , мДж		Ширина линии осажженного материала D , мкм	
Кварцевое стекло	Щелочное стекло	Кварцевое стекло	Щелочное стекло	Кварцевое стекло	Щелочное стекло
1	1	142	142	3	3
0,8	1	130	412	5	30
0,5	0,8	430	142	25	6
0,5	0,5	130	360	5	20
0,5	0,6	119	385	2	25
0,3	0,55	450	400	30	27

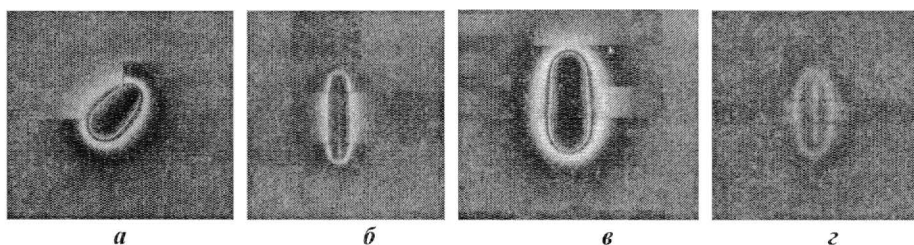


Рис.3. Фотографии области осаждения материала на кварцевом и щелочном стекле: *а* – кварцевое стекло ($v = 0,3$ мкм /с, $E = 450$ мДж, $D = 30$ мкм); *б* – кварцевое стекло ($v = 1$ мкм/с, $E = 142$ мДж, $D = 3$ мкм); *в* – щелочное стекло ($v = 0,5$ мкм/с, $E = 360$ мДж, $D = 20$ мкм); *г* – щелочное стекло ($v = 1$ мкм /с, $E = 142$ мДж, $D = 5$ мкм)

На рис.4 представлены графики, показывающие зависимость ширины линии осажженного материала от энергии лазерного излучения для кварцевого и щелочного стекла (рис.4,*а*) и от скорости перемещения координатного стола (рис.4,*б*).

В результате установленных зависимостей можно сделать вывод, что наименьшая ширина линии осаждаемого материала достигается на фотошаблонных заготовках, сделанных на основе подложек из кварцевого стекла. Объяснить данный эффект можно с точки зрения теплофизических свойств стекол, а именно теплопроводности. Теплопроводность обычного стекла при температуре до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $0,4\text{--}0,82$ Вт/(м \cdot °C). Наибольшую теплопроводность имеет кварцевое стекло – $1,340$ Вт/(м \cdot °C).

С целью определения технологических режимов осаждения металла для устранения краевых дефектов определена зависимость постоянной ширины линии осаждаемого материала на поверхности маскирующего покрытия от длины трассы как функции нагрева поверхности при лазерном стимулировании. Для формирования осаждаемой линии шириной 6 мкм в соответствии с графиком, показанным на рис.4,*а*, выбраны режимы осаждения: энергия излучения лазера $E = 137$ мДж, v – скорость перемещения координатного стола $0,8$ мкм/с.

Результаты измерений зависимости ширины линии осаждаемого материала на поверхности маскирующего покрытия от длины трассы представлены на рис.5. На рис.6 показаны длина трассы (задаваемая величина) $L_{\text{тр}}$ и длина участка осаждаемой линии шириной 6 мкм (измеренная величина) L_{max} .

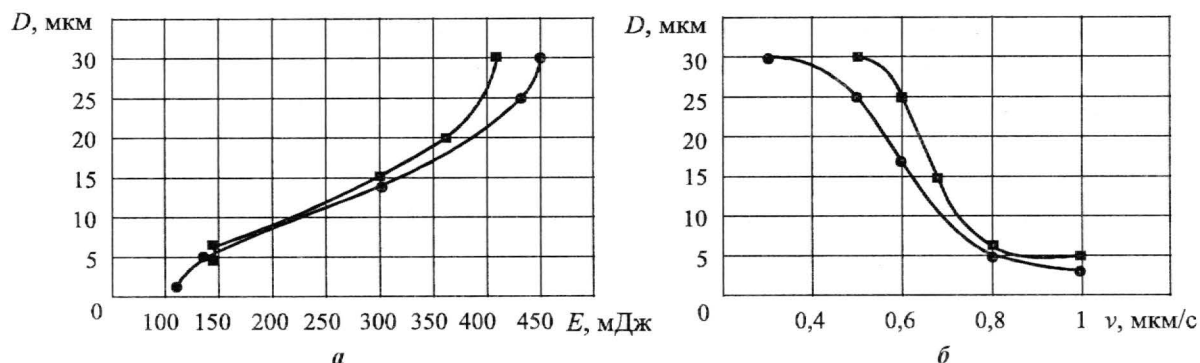


Рис.4. Зависимость ширины линии осажденного материала от энергии лазерного излучения (а) и скорости перемещения координатного стола (б): ● – кварцевое стекло; ■ – щелочное стекло

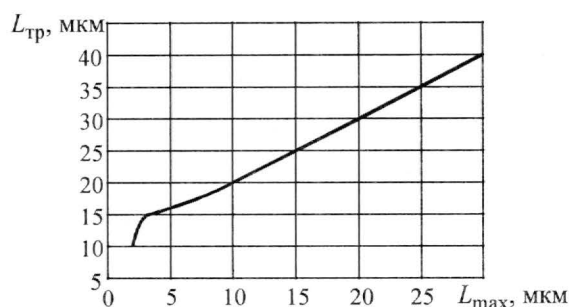


Рис.5. Зависимость постоянной ширины линии осажденного материала на поверхности маскирующего покрытия от длины трассы

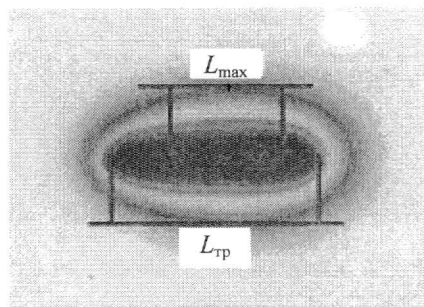


Рис.6. Области заданной и измеряемой величины

Используя установленные закономерности изменения ширины линии осажденного материала при изменении скорости перемещения координатного стола, энергии лазерного излучения, для фотошаблонов определены рабочие режимы осаждения металла и устранены дефекты маскирующего покрытия фотошаблона с учетом их величины, максимальной плотности осаждаемого материала по всей площади дефекта и минимального распыления материала на краях элемента (рис.7).

Экспериментальное определение степени адгезии осажденного материала как функции стойкости к механическому воздействию щетками и мегазвуковой обработке на установке отмытки фотошаблонов показало, что осажденный на дефект фотошаблона материал выдерживает не менее 40 «жестких отмывок», что полностью удовлетворяет требованиям технологического процесса.

В результате проведенных исследований установлена закономерность изменения ширины линии осаждаемого материала путем лазерного стимулирования из газообразной фазы в зависимости от скорости перемещения координатного стола установки и энергии лазерного излучения на поверхности маскирующего покрытия фотошаблона из кварцевого и щелочного стекла. Определены технологические режимы осаждения материала на прозрачный дефект фотошаблона, обеспечивающие максимальную плотность осаждаемого материала по всей площади ремонтируемого участка и минимальное распыление вещества на краях топологических элементов.

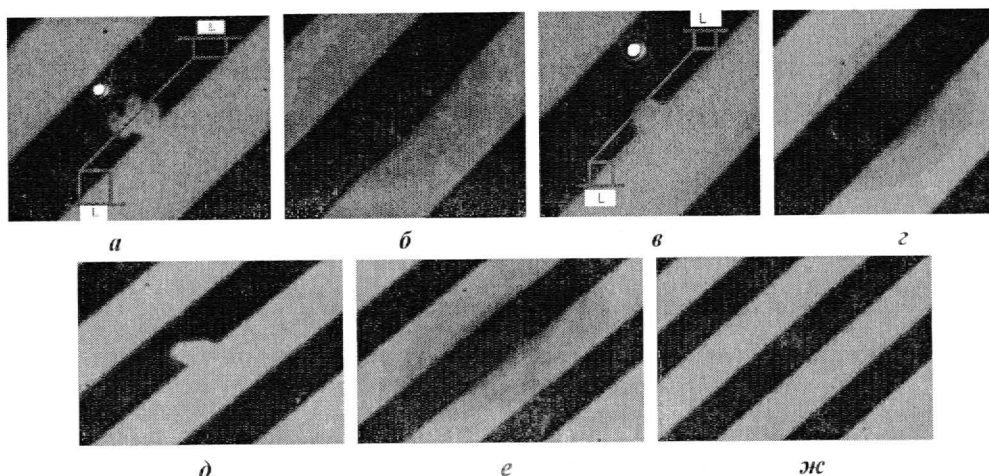


Рис.7. Технологический процесс устранения дефекта фотошаблона: *а* – дефект для пробного осаждения материала, отступ от края линии $L = 3$ мкм, $L_{\text{тр}} = 16$ мкм; *б* – устраненный дефект с распыленным материалом на краях элемента; *в* – второй дефект для пробного осаждения материала, отступ от края линии $L = 4$ мкм, $L_{\text{тр}} = 16$ мкм; *г* – устраненный дефект с распыленным материалом на краях элемента – распыление материала минимальное; *д* – выход в координату устраняемого дефекта фотошаблона; *е* – осаждение металла в область дефекта из газовой фазы металлоорганического вещества, отступ от края линии $L = 4$ мкм, $L_{\text{тр}} = 16$ мкм; *жс* – удаление распыленного материала на краю элемента методом испарения импульсным лазером

Полученные результаты опробованы и реализованы на производственной линии Центра коллективного пользования МИЭТ при изготовлении фотошаблонов для контактной печати с рабочим полем 100×100 мм, размером топологического элемента на фотошаблоне 0,8 мкм для обеспечения производства изделий МЭМС и оптоэлектронных приборов. При этом на фотошаблонах недопустимые дефекты размером более 0,5 мкм были устранены. Технологические операции контроля и поиска недопустимых дефектов, «ремонта» топологического рисунка в маскирующем слое фотошаблона выполнялись на установке контроля топологии ЭМ-6029Б и установке лазерной ретуши ЭМ-5001Б, которые объединены в единый технологический процесс.

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.* – 1986. – № 1 – Т. 59. – С. 98.
3. **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.
4. SEMI P23 Guidelines for Programmed Defect Mask and Benchmark Procedures for Sensitivity Analysis of Mask Defect Inspection Systems. – SEMI. – 1993, 1995.
5. **Черняев В.Н.** Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Радио и связь, 1987. – С. 237.

Статья поступила 4 июля 2008 г.

Овчинников Вячеслав Алексеевич – начальник отдела Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и элементно-компонентная база» МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка специального технологического оборудования, технологических процессов изготовления, аттестации фотошаблонов для производства сложных ИС (с нормами 0,35 – 0,13 мкм).