

Введение

Процесс развития фотолитографии представляет собой последовательный переход к обеспечению производства ИС с топологическими элементами все меньших размеров. На первом этапе (1960-е годы) минимальные элементы топологии имели размеры более 10 мкм. Для формирования структур с такими размерами было создано первое поколение соответствующего оптико-механического оборудования: редуccionные размеры, фотоповторители, контактные установки совмещения, разрешение и точность которых составляла 3...5 мкм. Второй этап (1970-е годы) характеризуется минимальным размером элементов до 3 мкм, ростом степени интеграции, появлением больших ИС (БИС).

Потребовалось оптико-механическое оборудование второго поколения – генераторы изображений, более точные и разрешающие фотоповторители, проекционные установки совмещения. Третий этап, связанный с созданием сверхбольших ИС (СБИС), потребовал оборудование нового поколения – быстроедействующих, в том числе многолучевых генераторов изображений.

В 1990-е годы мировая микроэлектроника последовательно проходит этапы освоения технологии полупроводникового производства от 0,8 мкм и более к 0,5; 0,35 и 0,25 мкм.

До 2012г. прогнозируется освоение:

год	2001	2003	2006	2009	2012
Разрешение литографии критического элемента (уровень мировой микроэлектроники), нм	150	130	100	70	50

Соответственно, в 1990-е годы в развитии уже широко используемых мультипликаторов (степперов) появились новые системы подмодульно сканирующей мультипликации, улучшившие эксплуатационные показатели формирования изображения, в сравнении со степперами, за счет уменьшения проекционного поля и усреднения характеристик проекционной системы при сканировании.

Фотолитография является одной из основных операций в технологическом процессе изготовления ИС. Через эту операцию неоднократно проходит весь поток обрабатываемых кремниевых пластин. Основным инструментом фотолитографии является фотошаблон с топологическим рисунком единичного технологического слоя ИС. С использованием комплекта фотошаблонов и формируется топологическая структура схемы на поверхности полупроводниковой пластины.

Изготовление фотошаблонов – это отдельная ветвь в схеме производства ИС, которая включает процессы проектирования топологии, изготовление оригиналов топологий или непосредственное генерирование изображений и собственно изготовление фотошаблонов. Результатом проектирования является числовая информация о геометрии последовательно создаваемых при фотолитографии масок на пластине. Процесс преобразования числовой или другой закодированной информации о топологии в геометрические изображения фигур, выполненных в требуемых масштабе и точности, и является генерированием изображений, а машины, с помощью которых этот процесс выполняется, являются генераторами изображений.

Эволюция генераторов изображения включает последовательное создание машин на базе использования методов одиночного фотонабора (элементы топологии последовательно, с использованием переменной диафрагмы, набираются в виде прямоугольников, размеры которых, угол разворота и положение изменяются в соответствии с вводимой информацией), комбинации фотонабора и фотомонтажа (часто встречающегося в топологии фрагмента), комбинации одиночный и групповой набор и фотомонтаж (использующей помимо наборной диафрагмы, формирующей единичный элемент, систему быстрой смены и точного базирования двух шаблонов, размещаемых в различной комбинации в предметной плоскости проекционного объектива). Групповой набор и фотомонтаж позволили значительно повысить производительность при генерировании периодических изображений (схемы ЗУ, фотоэлектрических преобразователей и др.). Однако для других изделий эффективность группового набора, фотонабора и фотомонтажа оказалась не столь высокой. Поэтому продолжались поиски методов, позволяющих резко повысить разрешение, точность и производительность генерирования изображения. Создаются новые модели более точных и быстродействующих генераторов изображений для экспонирования как фотошаблонов, так и работающих непосредственно по пластине.

Таким образом, техника получения микроизображений с момента возникновения микроэлектроники прошла несколько этапов, причем характерно, что на каждом этапе одновременно увеличивались разрешающая способность и рабочие поля, повышалась точность выполнения рисунка, сокращалось число операций и переходов, повышались производительность и быстродействие систем.

Другой составной частью рассматриваемых проблем получения микроизображения является их контроль. На первом этапе контроль осуществляется визуально с применением универсальных микроскопов и других приборов, специально для изделий микроэлектроники не предназначавшихся, не имевших ни требуемой точности, ни необходимой производительности, не обеспечивавших достаточной достоверности контроля. На втором этапе появились специализированные приборы, учитывающие особенности объекта контроля, были созда-

ны более точные фотоэлектрические средства для измерения линейных размеров элементов, позволяющие измерять элементы до 2-3 мкм с точностью 0,2 - 0,3 мкм. Затем были разработаны полуавтоматические и автоматические системы контроля линейных размеров и дефектности микроизображений, обеспечившие, необходимые на то время, точность и производительность процесса, а также достоверность результатов измерений. Без этих систем практически невозможно определить, правильно ли выполнен требуемый топологический рисунок, все ли необходимые элементы присутствуют в изображении, нет ли лишних, обеспечено ли заданное взаиморасположение элементов и их линейные размеры, имеются ли недопустимые микродефекты. Дальнейшее развитие получают фотоэлектрические методы наводки на край элемента изображения, создаются сложные комплексы контроля дефектности топологии на фотошаблоне: недотравы маскирующего покрытия, разрывы и проколы элементов, лишние (недостающие) элементы, скругление углов. Для устранения дефектов используется оборудование ремонта шаблонов.

Актуальность контроля и ремонта шаблонов будет возрастать с ростом интеграции ИС и, соответственно, ростом требований к их бездефектности для обеспечения приемлемого выхода годных на литографических операциях:

год	2001	2003	2006	2009	2012
Разрешение литографии критического элемента (уровень мировой микроэлектроники), нм	150	130	100	70	50
Размер критического дефекта, нм	75	65	50	35	25
Количество шаблонов в комплекте	23	24	25	27	29
Количество дефектов, шт., на слой не более	66	56	45	35	28
Количество привносимых дефектов при литографии, шт./М ² , при 60%-выходе годных.	174	112	140	53	22

Проблема изготовления оригиналов топологий остро стоит также и при изготовлении печатных плат (ПП). В значительной части современного радиоэлектронного оборудования используется монтаж электронных компонентов, в том числе и ИС, на поверхность ПП. Технология их

том числе и ИС, на поверхность ПП. Технология их изготовления определяет качество изделия радиоэлектроники, его себестоимость и надежность. При этом для достижения максимальной плотности упаковки компоненты могут располагаться с двух сторон ПП и достаточно близко друг к другу. Как показывает опыт, в этих условиях четырех слоев обычно недостаточно для обеспечения трассировки ПП: два слоя из четырех обычно предназначены для разводки шин питания и два – для трассировки сигнала. С другой стороны, потребность в ПП с числом слоев более 14 представляется достаточно экзотичной. При трассировке простое увеличение числа слоев часто может быть не эффективным, поскольку использование обычных сквозных переходных отверстий делает поверхность платы плотно покрытой площадками для припайки контактов микросхем, трассами межсоединений и уже поставленными переходными отверстиями. В итоге на плате сложно найти место под новые отверстия для перехода из слоя в слой. В условиях плотного монтажа компонентов проблему трассировки платы можно успешно решать за счет перехода к более жестким проектным нормам (уменьшение ширины проводников и зазора между ними, уменьшение диаметра переходного отверстия), а также использования «слепых» и межслойных переходных отверстий.

Таким образом, в процессе совершенствования технологии ширина проводников уменьшается, а число межслойных переходов увеличивается – за счет уменьшения их размеров и использования поверхностных контактных площадок для присоединения выводов компонентов:

Уровни печатного монтажа

Характеристики						
Уровни печатного монтажа	Ширина проводников и зазоров, мкм	Ширина сквозных переходов, мм	Ширина внутренних переходов, мм	Число проводников в шаге переходов	Шаг планарных ламелей, мкм	Шаг матричных площадок, мкм
0	200/200	1.25	0.625	1	0.625	2.5
1	150/150	0.625	0.625	-	0.5	1.25
2	75/75	1.0	1.0	2	0.5	1.0
3	50/50	1.0	1.0	3	0.5	1.0
4	50/50	0.5	0.5	1	0.25	0.5
5	50/50	0.25	0.25	-	0.25	0.5

Таким образом, создание и развитие производства все новых и более передовых изделий микроэлектроники и других компонентов радиоэлектроники,

таких, в частности, как печатные платы с все возрастающим числом слоев и плотностью монтажа компонентов и телевизионные трубки высокой четкости, требуют создания новых поколений технологического и контрольно-измерительного оборудования, отличающегося более высокими характеристиками по разрешающей способности, точности, производительности и надежности.

Основные тенденции развития оптических технологий определяются современными требованиями к функциональным качественным и количественным показателям ИС, БИС, СБИС, в частности, повышением степени интеграции, т.е. увеличением плотности размещения элементов, что соответственно улучшает основные параметры микросхем: уменьшение рабочего тока и напряжения, быстродействие, сокращение потребляемой мощности, улучшение экономических показателей. Одновременно усиливаются требования к технологическому оборудованию, материалам, условиям функционирования оборудования. Увеличение плотности размещения элементов однозначно связано с разрешением (способностью создания минимального элемента) технологической системы, ошибками позиционирования проекционных устройств и генераторов микроизображений, формирующих технологию будущей микросхемы.

Единственно приемлемым методом построения спецтехнологического оборудования, предназначенного для формирования топологий микроизображения, отвечающего современным требованиям изготовления интегральных микросхем, является создание лазерно-оптических технологических комплексов. Задача подобного оборудования – формирование определенной порции энергии в необходимом спектральном диапазоне за конечное время и с заданным пространственным распределением.

Лазерное спецтехнологическое оборудование (ЛСО) содержит основные функциональные устройства:

- лазерная оптическая система, формирующая изображение с заданными параметрами и характеристиками;
- прецизионные координатные системы, обеспечивающие сканирование и позиционирование с субмикронной точностью на заданном рабочем поле (до 200×200 мм);
- фотоэлектрические системы для создания обратной связи, обеспечивающие функционирование устройства формирования изображения в заданном динамическом диапазоне;
- вычислительную управляющую систему на базе мини-ЭВМ и спецпроцессоров;
- систему программного обеспечения, позволяющую воспроизводить необходимые режимы функционирования спецтехнологического оборудования с достаточной степенью надежности.

Кроме создания оборудования, важной задачей развития оптических технологий в микроэлектронике является разработка вторичного оборудования, без

которого невозможно получение конечного продукта, так называемых контрольно-измерительных комплексов (КИК). КИК участвуют в производственном цикле параллельно с ЛСО, начиная с первой стадии – контроля качества полупроводниковой пластины заготовки, контроля выполнения требований к литографическому процессу и заканчивая выходным контролем.

Лазерная оптическая система (ЛСО) оказывает определяющее влияние на конфигурацию других систем, т.к. именно она в совокупности с физическими процессами, генерированными ею, определяет конечный результат воздействия на объект.

Технологические процессы предъявляют жесткие требования к параметрам излучения в рабочей зоне:

- термолитография (испарение металлизированных покрытий). Необходимая плотность импульсного потока излучения (10^7 - 10^9) Вт/см² с нестабильностью амплитудного и пространственного распределения ≤ 10 % при длительности импульса $\tau=(10^{-7}-10^{-9})$ с ;
- фотолитография с субмикронным разрешением. Перспективно использование спектрального диапазона (200-800) нм, при ширине спектральной линии излучения не хуже 5 нм;

Серьезным требованием проведения технологического процесса является однородность излучения по сечению пучка. На практике, особенно в режиме работы лазера с модулированной добротностью, имеет место ярко выраженная неоднородность в пространственной структуре излучения (обусловлена модовой структурой, оптической неоднородностью активного элемента и степенью неравномерности его возбуждения). Известные внутрирезонаторные методы выравнивания пространственной однородности усложняют конструкцию, снижают КПД, в режиме импульсной генерации они вообще неприменимы (картина не воспроизводится). В то же время процессы фото- и термолитографии обеспечиваются при выполнении достаточных требований к микро и макро-структуре лазерного пучка, т.е. распределением в поперечном сечении с неравномерностью не хуже (1-5) % при наличии спекл-структуры (0.05-0.1) мкм. Таким образом, разработка лазерно-оптических систем спецтехнологического оборудования предлагает рассмотрение следующих основных вопросов:

- анализ энергетических, спектральных и временных характеристик лазерного излучения, удовлетворяющих технологическому процессу;
- определение типа лазера и оптимизация его энергетических и пространственно-временных характеристик с обеспечением их регулируемости;
- разработка алгоритмов обработки заготовки;
- разработка оптической системы, учитывающей выбранный алгоритм, преобразующей пространственное распределение лазерного излучения, удовлетворяющей требованиям технологического процесса;
- разработка системы, обеспечивающей достаточную степень автоматизации.

1. ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ.

При построении технологического оборудования для микроэлектроники к микроизображениям и к технике их получения предъявляются особые, специфические требования, по точностным параметрам практически предельные. Известные методы формирования изображения могут быть классифицированы следующим образом (рис.1):

- контурно-лучевой,
- проекционный,
- контурно-проекционный,
- теневой,
- голографический.

Приоритетные направления развития оптических технологий можно определить исходя из качественного анализа по схеме рис.1.

Теневой метод включает в себя контактный метод и метод печати с зазором. В первом случае микроизображения получают экспонированием через плотно прижатый шаблон, во втором случае фотошаблон находится на определенном расстоянии. Теневые методы продолжительно доминировали, достигли теоретического и практического предела, и к настоящему времени малоперспективны.

Оптический метод проекционного построения микроизображений является одним из наиболее полно удовлетворяющих современным требованиям. Классификацию проекционных систем можно провести по следующим признакам:

- системы, обеспечивающие перенос изображения без использования подвижных элементов и одновременно строящие изображение на всем поле,
- сканирующие проекционные системы, формирующие изображения отдельными фрагментами, последовательно друг за другом.

Принцип лучевого метода заключается в синтезе изображения с помощью какой-либо программы или носителя информации путем последовательного экспонирования сфокусированным пятном (контурно-лучевой метод) или пятном с изменяющимися размерами (контурно-проекционный метод). Сканирование световым пятном по плоскости изображения может осуществляться как методом отклонения светового луча, так и с помощью двух координатного стола. При этом возможны два варианта сканирования: растровый, когда производится развертка по всему полю изображения, а формирование изображения осуществляется путем включения и выключения луча в соответствии с программой, и векторный, когда развертка производится только по элементам топологического рисунка последовательно (одноканальный вариант) или параллельно последовательно (многоканальный вариант).

Голографические методы наряду с очевидными преимуществами (возмож-

ность устранения предела по глубине резкости, стабильность масштабирования, легкость реализации мультиплицирования и т.д.) имеют существенные недостатки: низкая энергетическая эффективность, отсутствие материалов, обеспечивающих высокое оптическое качество и стабильность параметров голографических фильтров.

Таким образом, из спектра возможных методов построения микроизображений выделяются практически целесообразные в настоящее время: проекционный метод и метод лучевого сканирования.

1.1. Контурно-лучевой метод

При контурно-лучевом методе изображение синтезируется в результате последовательного облучения заданного топологического рисунка световым пучком. Обход заданного контура осуществляется либо перемещением по заданной программе рабочего стола, либо сканированием светового пучка.

Фокусировка лазерного пучка зависит от поперечного распределения интенсивности в нем. Для одномодового лазера интенсивность излучения характеризуется гауссовским распределением

$$I(r) = I_0 e^{-kr^2} \quad (1.2)$$

где r – радиус поперечного сечения пучка; k – постоянная величина, определяемая параметрами выбранного лазера и оптической системы.

Для многомодового лазера картина поперечного распределения намного сложнее, но основной параметр – расходимость пучка определяется, как

$$\alpha_m = 1,22 \frac{\lambda}{D} (m + 1) \quad (2.2)$$

где D – диаметр пучка, m – номер максимальной моды, λ – длина волны.

Минимальный размер сфокусированного пучка

$$d_0 = \alpha f' \quad (3.2)$$

где α – угол расходимости, f' – фокусное расстояние оптической системы. Предел для одномодового и многомодового излучения в гауссовском приближении примерно одинаков:

$$d_0 \approx \lambda \quad (4.2)$$

Если распределение интенсивности в пучке равномерно, то при использовании безабберационной оптики для фокусировки лазерного пучка в ее фокальной плоскости образуется дифракционная картина Фраунгофера с центральным максимумом размером d_0 , где сосредоточено около 83 % всей энергии пучка. Распределение энергии в фокальном пятне определяется функцией Бесселя первого порядка. Теоретический предел фокусировки легко получить, принимая расходимость дифракционной:

$$\alpha_0 \approx 1,22 \lambda / D,$$

что дает для минимального пятна в фокусе $d_0 \approx \lambda$.

Основным достоинством контурно-лучевого метода является возможность концентрации энергии излучения на площадке минимальных размеров. Этот фактор делает метод приоритетным для выполнения энергоемких черновых операций размерной обработки.

В фотолитографическом процессе на первый план выдвигаются точностные требования: ограничения на неровность края, равномерность облучения зоны воздействия и т.д. Обработка заготовки сфокусированным световым пучком по этим параметрам неоптимальная по следующим причинам:

- распределение энергии в фокальном пятне неравномерно, отсутствует строго ограниченная и постоянная по размерам зона воздействия;
- для изготовления элементов топологического рисунка с достаточно ровным краем из точечных элементов необходимо обеспечить их большое перекрытие, что существенно ограничивает этот метод по производительности.

1.2. Проекционный метод

Оптическая схема проекционного метода представлена на рис.1.2. Пучок света лазера 1 расширяется с помощью оптической системы 2 до размеров фотошаблона 3, уменьшенное изображение которого строится проекционным объективом 4 на поверхности обрабатываемого образца 5. Основными достоинствами проекционного метода являются возможность получения изображений сложной конфигурации, повторяющих с заданным уменьшением рисунок шаблона, высокая разрешающая способность и принципиальная возможность одновременной обработки относительно больших площадок.

Основными параметрами проекционной системы являются:

- а) увеличение осветительной системы β_{oc}

$$\beta_{oc} = d_m / d_l = l_{oc} / f_{oc}' = f_{oc} / l_l \quad (1.5)$$

где d_m и d_l – линейный размер элемента шаблона и поперечное сечение пучка лазера; f_{oc} и f_{oc}' – фокальные отрезки; l_{oc} и l_l – расстояние от заданного фокуса осветительной системы и от перетяжки лазера до переднего фокуса соответственно. При $4m > d$, увеличение $\beta_{oc} > 1$.

- б) увеличение проекционной системы β_{np} / I

$$\beta_{np} = d_{обр} / d_m = l_{обр} / f_{np}' = f_{np} / l_m \quad (1.6)$$

где $d_{обр}$ – поперечный размер поля на образце, f_{np}' и f_{np} – фокальные отрезки проекционной системы, $l_{обр}$ и l_m – расстояние от поверхности образца до заднего фокуса проекционной системы и от шаблона до ее переднего фокуса.

Максимальное увеличение осветительной системы можно получить из условия обеспечения сохранности элемента шаблона при известной плотности энергии на выходе лазера:

$$\beta_{oc.max} = \sqrt{\frac{Q_l}{(Q_M)^n}} \quad (1.7)$$

где Q_M^n - пороговая плотность энергии разрушения покрытия фотошаблона.

При $d_M > d_{л}$ вопрос о минимальном увеличении оптической системы не возникает, т.е. при выборе β_{oc} следует удовлетворять условию

$$\beta_{oc} \prec \beta_{oc.max} \quad (1.8)$$

Максимальное увеличение проекционной системы $\beta_{np.max}$ можно определить из условия обеспечения требуемой плотности энергии на образце $Q_{обр}^n$ при отсутствии разрушения поверхности фотошаблона:

$$\beta_{np.max} = (Q_M^n / Q_{обр}^n)^{\frac{1}{2}} \quad (1.9)$$

Минимальное увеличение проекционной системы, которое обеспечивает минимальный размер рисунка на образце, ограничено дифракционными явлениями на ее апертуре и при телецентрическом освещении практически определяется дифракцией на щелях маски:

$$\beta_{np.min} = \frac{\lambda \cdot f_{np}}{(d_{np} - d_M) \cdot d_{M.min} - \lambda \cdot f_{np}} \quad (1.10)$$

где λ - длина волны, d_{np} - размер входного зрачка проекционной системы, $d_{M.min}$ - минимальный размер элемента фотошаблона

Если $\beta_{np.min} \prec \beta_{np} \prec \beta_{np.max}$, то можно найти общий размер поля фотошаблона и размер его минимального элемента:

$$d_M = d_{обр} / \beta_{np} ; \quad d_{M.min} = d_{обр.min} / \beta_{np} \quad (1.11)$$

. а также расстояние между фотошаблоном и оптической системой l_m , определяющее габаритные размеры системы:

$$l_m = f_{np} / \beta_{np} \quad (1.12)$$

откуда видно, что получение малых значений β_{np} связано с заметным увеличением размеров системы.

Зная плотность энергии излучения на выходе лазера Q_l и линейные увеличения осветительной (β_{oc}) и проекционной (β_{np}) систем, можно найти плотность энергии на фотошаблоне $Q_{ш}$ и на образце $Q_{обр}$:

$$Q_M = Q_l / \beta_{oc}^2 \quad Q_{обр} = Q_l / (\beta_{oc}^2 \cdot \beta_{np}^2) \quad (1.13)$$

Плотность энергии на выходе лазера должна при этом удовлетворять условию:

$$Q_M^n \beta_{oc}^2 \succ Q_l \succ Q_{обр}^n \beta_{oc}^2 \beta_{np}^2 \quad (1.14)$$

Поскольку увеличение проекционной системы $\beta_{пр}$, определяет как общий размер рисунка $d_{обр}$, так и размер его элементов $d_{обрmin}$, то требования максимального поля изображения $d_{обр}$ и высокой разрешающей способности δ (максимальной плотности элементов $1/d_{обрmin}$) находятся в противоречии, которое в классической оптике неустранимо.

Таким образом, выбор увеличения проекционной системы задает значение произведения $d_{обр} \delta$, которое сохраняется постоянным независимо от параметров проекционной системы и может считаться характеристикой схемы. Отсюда следует, что чем выше требуемая разрешающая способность в плоскости образца, тем меньше площадь одновременно получаемой поверхности (рис.3). Поэтому для получения рисунка на большой площади с высокой разрешающей способностью необходима развертка изображения его элементов при помощи лазера периодического действия. В этом случае следует либо перемещать образец относительно неподвижного луча и фотошаблона (если рисунок повторяющийся), либо сканировать световой луч по поверхности образца или фотошаблона. В первом варианте легче обеспечить заданную степень воздействия излучения, а во втором - высокую точность взаимного расположения элементов.

Контурно-проекционный метод

Контурно-проекционный метод состоит в том, что изображение синтезируется в результате последовательного обхода по контуру световым пучком специального сечения, которое представляет собой микропроекцию простого элемента, например, квадрата.

Достоинствами такого метода являются:

- независимость размеров общего поля изображения от разрешающей способности (размеров минимального элемента разрешения);
- высокая точность рисунка, определяемая возможностью получения минимальной неровности края (при надлежащей системе перемещения детали) и обеспечиваемая прямоугольной формой образующего изображение элемента и возможностью создания равномерного распределения энергии в нем (в отличие от обработки в фокальной плоскости оптической системы, в которой энергия распределена по гауссовскому закону);
- высокая разрешающая способность;
- незначительные потери энергии на фотошаблоне.

Основными факторами, которые необходимо учитывать при проектировании контурно-проекционных систем являются:

- согласование выходного зрачка лазера с необходимым полем в плоскости фотошаблона;

- создание равномерного освещения в плоскости фотошаблона;
- получение минимальных габаритов системы.

Схема контурно-проекционного метода аналогична схеме рис.2., однако вследствие малой плотности энергии в импульсе в этом случае предпочтительнее схема, где осветительная система работает с увеличением, меньшим 1 (в отличие от проекционной), так как при этом достигаются минимальные общие габаритные размеры системы. Максимальное общее увеличение системы определяется из условия обеспечения требуемой плотности энергии на образце

$$\beta_{об. max} = \sqrt{Q_{л} / Q_{обр.}} \quad (1.15)$$

Если проекционный объектив выбран заранее, а поскольку он является наиболее ответственным устройством в установке и выбор невелик, то при реальном проектировании выбор производится однозначно, т.е. известно его номинальное увеличение $\beta_{пр}^{ном}$, и можно определить максимальное увеличение осветительной системы:

$$\beta_{oc. max}^{ном} = \beta_{об. max} / \beta_{пр}^{ном} \quad (1.16)$$

При этом условии $\beta_{oc. max}^{ном}$ не должно превышать величины $\beta_{oc. max}$, определяемой из формулы (7) и обеспечивающей сохранность маскирующего слоя фотошаблона. Величина $\beta_{oc. min}$ характеризуется дифракционными явлениями на апертуре осветительной системы и, так как расходимость реального лазера α , как правило, превышает дифракционный угол расходимости на фотошаблоне, равна

$$\beta_{oc. min} = \frac{\alpha f_{oc}}{(d_{oc} - d_{л}) - \alpha f_{oc}} \quad (1.17)$$

Таким образом, увеличение оптической системы выбирается в пределах $\beta_{oc. min} < \beta_{oc} < \beta_{oc. max}$, или точнее $\beta_{oc. min} < \beta_{oc} < \beta_{oc. max}^{ном}$.

Дополнительные условия для выбора осветительной системы и расчета ее параметров можно получить из требований минимальных габаритных размеров системы. Очевидно, что габаритные размеры осветительной системы определяются наибольшим размером в схеме, которым является расстояние от лазера до осветительной системы (вследствие того, что осветительная система является проецирующей и работает с увеличением, меньшим 1). Так согласно (1.3) $l_{л} = f_{oc} / \beta_{oc}$, то при заданных $\beta_{oc} (d_{л} / d_{м})$ для уменьшения габаритных размеров требуется выбор короткофокусной (светосильной) осветительной системы.

Максимальное увеличение проекционной системы определяется согласно (1.7). Если $Q_{м}^n = Q_{обр}^n$, то $\beta = 1$. Большие увеличения проекционной системы (не обеспечивающие малых размеров изображения при $\beta_{пр} > 1$) приводят к малым габаритным размерам проекционного тракта, так как наибольшим расстоянием

в нем является расстояние между шаблоном и проекционной системой, определяемое (1.10). Однако при уменьшении β_{np} , так же как и в осветительном тракте, усложняется конструкция проекционного объектива, и увеличиваются требования системы к юстировке. Очевидно, чем меньше увеличение β_{np} ($\beta_{np} < 1$), тем меньше глубина резкости и система чувствительнее к юстировке. Поэтому требуется компромиссное распределение общего увеличения между осветительной и проекционной системами.

Минимальное увеличение проекционной системы при телескопическом освещении ограничено дифракционными явлениями на апертуре объектива, причем в зависимости от соотношения между размерами элементов фотошаблона (и соответственно дифракционной расходимостью излучения на них) и расходимостью лазерного излучения будет определяться либо также, как и $\beta_{oc.min}$, по (1.17), либо также, как $\beta_{np.min}$, по (1.8). Теоретический предел минимального увеличения можно получить при стремлении предмета в бесконечность, в этом случае очевидно, что

$$\beta_{np.min} = \lambda f / d_m^2 \quad (1.18)$$

Энергетический расчет контурно-проекционной схемы может быть выполнен по (1.11) и (1.12). При этом плотность энергии лазера, приведенная по входу осветительной системы, должна удовлетворять (1.12).

Рассмотрим, что происходит со световым пучком по мере приближения лазера к осветительной системе. В случае некогерентного источника света изображение предмета (излучателя) перемещается из фокальной плоскости ($l_{oc}=0$) в плоскость, расположенную на расстоянии $l_{oc}=f'$, в то время как предмет перемещается из бесконечности ($l_l = \infty$) в плоскость $2f$ ($l_l=f$), затем уходит в бесконечность ($l_{oc} = \infty$), если $l_l=0$ и, наконец, полностью деградирует, если $f+l_l < f$, превращаясь в мнимое, расположенное по ту же сторону оптической системы. В последнем случае световой пучок за оптической системой не имеет перетяжки сечения, т.е. собирающая оптическая система работает как рассеивающая.

Если имеется лазерный пучок ограниченной расходимости, картина существенно меняется. На рис.1.5 показано, при некоторых соотношениях между отрезком l_l (расстояние между лазером и фокальной плоскостью оптической системы), f , d_l , и α световой пучок за оптической системой будет сходящимся (хотя изображение излучающего окна получить и в этом случае нельзя, так как лучи, выходящие из одной и той же точки излучателя, за оптической системой не пересекутся). Пучок имеет минимальное сечение d_0 в фокальной плоскости системы, а размер этого сечения определяется только фокусным расстоянием f' и расходимостью излучения α и, как следует из рис.1.5, равен $\alpha f'$.

Существует значение угловой расходимости, единственное для данной оптической системы, выше которого пучок за линзой будет расходиться

(рис.1.5(а)). При уменьшении α в положении, соответствующем рис.1.5(б), пучек за линзой будет иметь цилиндрическую форму, вплоть до фокальной плоскости, при диаметре сечения αf . Из рис. 1.5(б) видно, что этот критический случай наблюдается при условии

$$\alpha_{кр} \approx d_{л} / l_{л} \quad (1.19)$$

Ход лучей в реальных системах с короткофокусными объективами соответствует рис.1.5(в).

Следует иметь ввиду и такие свойства этих систем, как независимость размера фокального пятна от $l_{к}'$ и зависимость от α .

Достоинством такой осветительной системы являются значительно меньшие габариты и более равномерное распределение интенсивности света, чем при расположении шаблона в плоскости изображения излучающего торца, если распределение излучения на нем неравномерно. Действительно, если на торце имеются темные области, то проецирующая осветительная система в соответствующем масштабе воспроизводит их в плоскости шаблона. Фокусирующая осветительная система более равномерно заполняет фокальное пятно, лучи с разных точек торца перемешиваются, распределение интенсивности усредняется. На рис.1.6 приведено построение хода лучей в осветительной фокусирующей системе с излучателем, у которого максимумы интенсивности находятся в центре торца и по кольцу, причем излучение в областях I и II имеет разную расходимость (II – область генерации, I – область сверхизлучения). Видно усреднение распределения в фокальной плоскости по сравнению с распределением на торце.

Контурно-проекционная схема, построенная по указанному принципу приведена на рис.1.7. Общее увеличение при заданных $d_{обр}$ и $d_{л}$ является основным параметром схемы и рассчитывается по формуле (1.13). После выбора проекционного объектива, когда определяется $\beta_{пр}$ и другие параметры проекционного тракта, в частности рабочие положения образца $l_{обр}$ и шаблона $l_{лм}$, а также фокусное расстояние проекционного объектива $f_{пр}$ и размер элемента фотошаблона $d_{м}$, а следовательно, и передний угол объектива γ , неизвестными остаются фокусное расстояние осветительной системы и расходимость излучения α_p , которая обеспечивает одновременное заполнение шаблона и входного зрачка проекционного объектива.

Найти f_{oc} и проверить α_p можно, используя два соотношения (рис.1.7):

$$\alpha f_{oc} = d_{м}; \quad \gamma f_{oc} = d_{л},$$

откуда

$$\begin{aligned} f_{oc} &= d_{л} / \gamma \\ \alpha_p &= d_{м} / d_{л} \end{aligned} \quad (1.20)$$

Голографический метод.

Голографическая схема формирования оптических микроизображений в общем виде иллюстрируется рис.1.8.

Лазерное излучение 5 освещает объект-фотошаблон 1 и зеркало 6. Излучение, рассеянное объектом и отраженное зеркалом, попадает на детектор 3, где в результате интерференции опорного 4 и предметного 7 пучков получаем голограмму предмета. При освещении голограммы с обратной стороны тем же опорным пучком в результате дифракции света на ее интерференционных полосах в плоскости действительного изображения восстанавливается изображение объекта.

Голографическим методом можно формировать объемное изображение, а также наносить изображение не только на плоскость, но и на поверхность любой формы, причем отпадает такое препятствие, как глубина резкости. Запись и восстановление изображения могут происходить в различных диапазонах длин волн, что позволяет на этапе восстановления производить масштабирование размеров изображения, соответствующее отношению длин волн.

Информация о зарегистрированном на голограмме объекте равномерно распределена на всей ее поверхности в отличие от обычных оптических методов регистрации информации, где каждой точке предмета соответствует сопряженная с ней точка в изображении. Это свойство голограмм обеспечивает большую помехоустойчивость и технологическую надежность метода. Голограммы позволяют работать с лазерными пучками, имеющими даже значительную неоднородность по сечению.

Голографический метод позволяет повысить КПД лазерного проекционного способа, особенно в том случае, когда площадь, занимаемая точками обработки, составляет лишь незначительную часть от общей площади изделия. В этом случае сняв голограмму с подобной маски, можно на этапе восстановления направить всю энергию только в точки обработки. Необходимо, однако, учитывать, что теоретический предел самих голограмм составляет: для амплитудных – 6.25 %, для фазовых – 33.9 %, а для толстых диэлектрических в принципе может быть около 100%.

Переход к проекционной литографии требует введения мультипликации на последнем этапе технологического процесса, что при использовании обычных оптических систем вызывает определенные трудности и является существенным недостатком.

Голографическим методом можно осуществить оптическое мультиплицирование изображения, что дает возможность проекционным способом наносить мультиплицированные изображения микрорисунков непосредственно на изделие, отказаться от трудоемкого процесса изготовления фотошаблонов и повысить точность совмещения. Мгновенное мультиплицирование может быть осуществлено различными способами.

Схема мгновенного мультиплицирования методом Фурье-голографии [1]

представлена на рис.1.9.

Для мультипликации отдельного рисунка на всю площадь подложки используется принцип корреляционной оптической фильтрации. Установка состоит: из источника когерентного света; телескопической системы, создающей широкий параллельный световой пучок; фотошаблона, выполненного с увеличением; объективов 4, 6. Передняя фокальная плоскость объектива 4 совпадает с фотошаблоном, а в его задней фокальной плоскости, плоскости Фурье, располагается фильтр, представляющий собой голограмму, снятую с сетки отверстий, расположение которых соответствует требуемому расположению мультиплицированных изображений. Объектив 6 осуществляет обратное преобразование Фурье, причем его передняя фокальная плоскость совпадает с плоскостью фильтра-голограммы, а в задней фокальной плоскости располагается подложка, на поверхности которой объектив 6 и формирует мультиплицированные уменьшенные изображения. Масштаб уменьшения равен отношению фокусов объективов 6 и 4. В плоскости фильтра происходит перемножение дифракционных спектров объекта и сетки отверстий. Обратное Фурье-преобразование для произведения двух функций равно свертке Фурье-образов этих функций, т.е. в плоскости изображения объектива 6 будем иметь свертку и корреляцию (в +1 и -1 порядках дифракции) функции, описывающей объект $f(x,y)$, и функции, описывающей сетку отверстий $h(x,y)$.

Голографические методы имеют существенные недостатки, уменьшающие их конкурентоспособность. Основные из них — низкая энергетическая эффективность, отсутствие материалов, обеспечивающих высокое оптическое качество и стабильность параметров.

2. Основа расчета оптических систем

Основы матричных методов расчёта оптических систем и лазерных резонаторов.

Матричные методы расчёта оптических систем весьма эффективны, обобщают хорошо известные результаты по геометрической и поляризационной оптике, оптики гауссовых пучков и теории оптических резонаторов. Это утверждение стало возможным благодаря, в основном, двум обстоятельствам.

Во-первых, дифракционная теория распространения гауссовых пучков в квазиоптическом приближении как в свободном пространстве, так и через системы идеальных оптических компонентов может быть сформулирована на простом матричном языке с помощью правила ABCD. Формулы, полученные с помощью правила ABCD при $\lambda \rightarrow 0$ в согласии с принципом соответствия переходят в формулы геометрической оптики.

Во-вторых, полная матрица системы записывается в виде произведения матриц составляющих её элементов, которых в оптической системе всего два: преломляющая или отражающая оптическая поверхность и оптический промежуток, измеряемый приведённым расстоянием между двумя такими поверхностями. С помощью этих матриц можно решать многочисленные практически важные задачи лазерной оптики, например, вычислять параметры резонаторов лазеров по заданным параметрам пучка на выходном зеркале и решать обратную задачу согласования оптических систем лазерной оптики, рассчитывать линзовые оптические световоды, оптимальную фокусировку лазерного излучения и т.д.

Матрицы преобразования лучей.

Траектория параксиального луча будет состоять из последовательности прямых линий. Каждая из этих прямых определяется координатами одной принадлежащей ей точки и углом, который данная прямая составляет с осью. Поскольку луч проходит через систему оптических компонентов, то для исследования его поведения необходимо рассмотреть два процесса:

1. Перемещение между двумя преломляющими поверхностями — оптический промежуток. На этом участке пути луч просто проходит от одной преломляющей поверхности к другой. Область между поверхностями характеризуется толщиной t и коэффициентом преломления n среды.
2. Преломление на граничной поверхности между двумя областями с различными коэффициентами преломления. Для определения величины отклонения прошедшего луча необходимо знать радиус кривизны преломляющей поверхности и два значения коэффициента преломления граничащих сред.

Нетрудно установить, что уравнения для двух оптических элементов (преломляющая поверхность и оптический промежуток) являются линейными и их можно представить в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} y_1 \\ v_1 \end{bmatrix},$$

причём матричные элементы таковы, что детерминант $(AD-BC)=1$, т.е. матрица унимодулярна.

Матрица перемещения.

На рис.1,а и б приведены два примера распространения лучей, проходящих между двумя опорными плоскостями ОП₁ и ОП₂

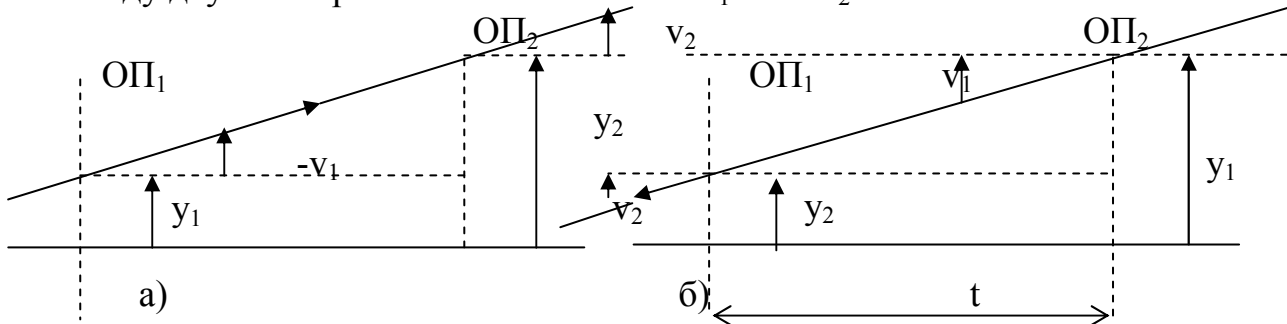


Рис.1 . Ход луча по оптическому промежутку.

$$y_2 = y_1 + t * \operatorname{tg}(v_1) = y_1 + t * v_1 \quad \text{для варианта а)}$$

$$y_2 = y_1 - t * v_2 \quad \text{для варианта б)}$$

В общем случае: $y_2 = y_1 + (t/n) * (v * n) = 1 * y_1 + T * V_1$,
где $T = (t/n)$ – приведённая толщина оптического промежутка.

Для нового приведённого угла направления луча:

$$V_2 = n_1 * v_1 = n_2 * v_2 = 0 * y_1 + 1 * V_1.$$

Полученные уравнения в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} y_1 \\ v_1 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, перемещение луча описывается матрицей $\tau = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, в

которую входит приведённое расстояние T . $\det(\tau) = 1$.

Если оптический промежуток состоит из ряда слоёв, допустим t_1 и t_2 , то получим две последовательные матрицы:

$$\tau_1 = \begin{bmatrix} 1 & T_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad \tau_2 = \begin{bmatrix} 1 & T_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \text{где } T_1 = (t_1/n_1); T_2 = (t_2/n_2);$$

$$\tau_1 \tau_2 = \begin{bmatrix} 1 & T_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & T_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (T_1 + T_2) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Таким образом, для получения общей матрицы все отдельные матрицы пе-

ремещения нужно перемножить, причём величина $T = \sum_i T_i$.

Матрица преломления.

Луч распространяется через кривую поверхность раздела двух сред с коэффициентами преломления n_1 и n_2 (рис.2.)

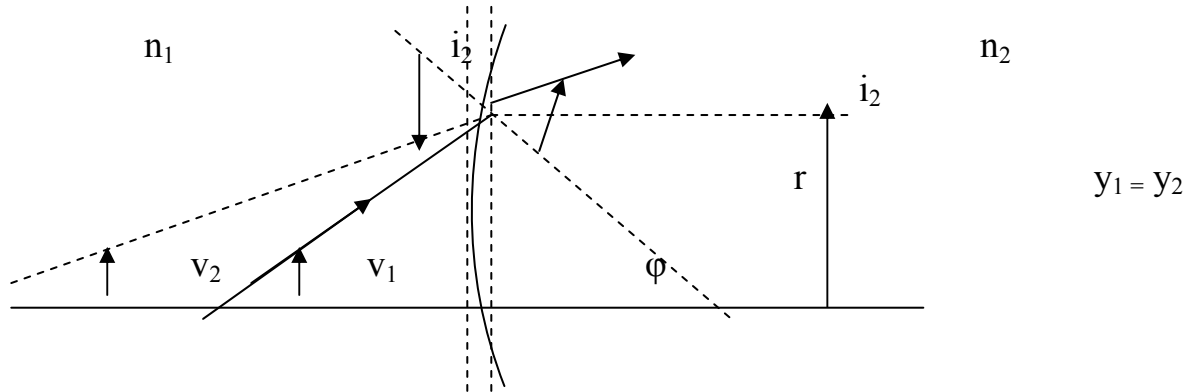


Рис.2. Ход луча через преломляющую поверхность.

Расстояние между опорными плоскостями ОП₁ и ОП₂, проходящими через вершину поверхности и через точку пересечения луча с поверхностью, равно $r(1 - \cos \varphi)$, следовательно, пренебрежительно мало, откуда $y_1 = y_2$.

Применяя закон преломления: $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$,
в параксиальном приближении $n_1 i_1 = n_2 i_2$.

Из треугольников имеем:

$$i_1 = v_1 + \varphi = v_1 + y_1/r \quad \text{и} \quad i_2 = v_2 + \varphi = v_2 + y_1/r ;$$

$$\text{следовательно} \quad n_1 (v_1 + y_1/r) = n_2 (v_2 + y_1/r) ;$$

или

$$V_1 + n_1 y_1/r = V_2 + n_2 y_1/r$$

$$V_2 = V_1 - (n_2 - n_1)/r .$$

Величина $(n_2 - n_1)/r$ называется оптической силой и обозначается P и, соответственно, матрица преломления R :

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{r} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -P & 1 \end{bmatrix}$$

Матрица преломления для тонкой линзы:

$$R_1 R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -P_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -P_2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(P_1 + P_2) & 1 \end{bmatrix} .$$

Оптическая сила линзы $P = P_1 + P_2 = (n-1)/r_1 + (1-n)/r_2 = (n-1)(1/r_1 - 1/r_2) = 1/f$.

Наиболее просто свёртывается в единую матрицу последовательность τ - матриц либо R-матриц. В общем случае имеется произвольный порядок следования R и τ -матриц, поэтому нужно тщательно следить за тем, в каком порядке они появляются. Умножение любой матрицы преломления на любую матрицу перемещения не коммутативно, например:

$$R \tau = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -P & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ -P & (1 - PT) \end{bmatrix},$$

$$\tau R = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -P & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - PT) & T \\ -P & 1 \end{bmatrix},$$

т.е. матрицы отличаются при различной последовательности перемножения.

Нумерация опорных плоскостей.

Оптическая система состоит из k преломляющих поверхностей, разделённых $(k-1)$ промежутками. Удобно выбрать в качестве первой – входной опорной плоскости плоскость ОП₁, расположенную на расстоянии d_a слева от первой преломляющей поверхности. ОП₂ и ОП₃ помещаются непосредственно слева и справа от первой преломляющей поверхности; ОП₄ и ОП₅ -- с обеих сторон от второй поверхности и т.д. до k -ой поверхности -- ОП_{2 k} и ОП_{2 k +1} расположенных по левую и правую сторону от k -ой поверхности. Конечную - выходную опорную плоскость ОП_{2 k +1} следует поместить на расстоянии d_b справа от последней преломляющей поверхности.

Необходимо получить общую матрицу преобразования лучей M , которая позволит непосредственно преобразовать вектор входного луча $\begin{bmatrix} Y_1 \\ V_1 \end{bmatrix}$ в вектор выходного луча $\begin{bmatrix} Y_{2k+1} \\ V_{2k+1} \end{bmatrix}$.

Перемещаясь по оптической системе слева направо, присвоим каждой матрице порядковый номер, т.е. $M_1, M_2, \dots, M_{2k+1}$, причём присвоенный каждой матрице оптического элемента номер должен совпадать с номером опорной плоскости, расположенной слева от элемента. Т.о., если обозначить вектор луча $\begin{bmatrix} Y_r \\ V_r \end{bmatrix}$, прошедшего через r -тую опорную плоскость, как k_r , то для преобразования параметров луча из ОП _{r} в ОП _{$r+1$} можно написать рекуррентное соотношение $k_{r+1} = M_r k_r$; $k_r = M_{r-1} k_{r-1}$ и т.д. Используя это рекуррентное соотношение, а также ассоциативное свойство умножения матриц, получим:

$$k_{2k+1} = M_{2k+1} k_{2k+1} = M_{2k+1} (M_{2k} k_{2k}) = (M_{2k+1} M_{2k}) (M_{2k-1} k_{2k-1}) = (M_{2k+1} M_{2k} M_{2k-1} M_{2k-2} \dots M_3 M_2 M_1) k_1$$

Следовательно, $k_{2k+1} = M k_1$, где $M = (M_{2k+1}, M_{2k}, \dots, M_1)$.

Следует отметить, что отдельные матрицы стоят в обратном порядке по сравнению с принятой для них нумерацией. Можно расположить в уравнении матрицы в возрастающем порядке номеров, но тогда следует оперировать обращёнными матрицами:

$$\kappa_1 = M_1^{-1} M_2^{-1} M_3^{-1} \dots M_{2\kappa+1}^{-1} \kappa_{2\kappa+2}$$

Задача упрощается тем, что операции производятся с унимодулированными матрицами, для которых справедливо:

$$M = \begin{bmatrix} AB \\ CD \end{bmatrix} \text{ и } M^{-1} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix}.$$

Матричное описание свойств оптической системы.

Предположим, что найдены численные значения элементов матрицы M сложной оптической системы, т.е.

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} y_1 \\ V_1 \end{bmatrix},$$

где $AD-BC=1$. Смысл элементов матрицы раскрывается достаточно просто:

$D=0$, уравнение для V_2 принимает вид $V_2 = Cy_1 + 0V_1 = Cy_1$. Это означает, что все лучи, исходящие из точки y_1 входной опорной плоскости, выйдут из выходной опорной плоскости под одним и тем же углом $V_2 = Cy_1$ к оси системы независимо от того, под каким углом V_1 эти лучи входили в систему. Отсюда следует, что плоскость ОП₁ -- первая фокальная плоскость системы.

1. Если $B=0$, то уравнение для y_2 : $y_2 = Ay_1 + 0V_1 = Ay_1$. Это значит, что все лучи, исходящие из точки с координатой y_1 , приходят в точку с координатой y_2 , т.е. в системе есть предмет и изображение, содержащие их плоскости ОП₁ и ОП₂ называются сопряжёнными. В данных условиях $A = y_2 / y_1$ -- коэффициент увеличения системы.

2. $C=0$, тогда $V_2 = DV_1$. Это означает, что все лучи, которые входят в систему параллельно друг другу (под углом V_1 к оси) выйдут параллельными под углом V_2 к оси, а $D = V_2 / V_1$ -- угловое увеличение.

3. $A=0$. Уравнение для y_2 запишется в виде $y_2 = BV_1$. Это означает, что параллельный пучок, входящий в систему под углом V_1 к оси соберётся в точке y_2 в плоскости ОП₂, т.е. ОП₂ является второй фокальной плоскостью системы. Необходимо учитывать, что $AD-BC=1$ в любом случае.

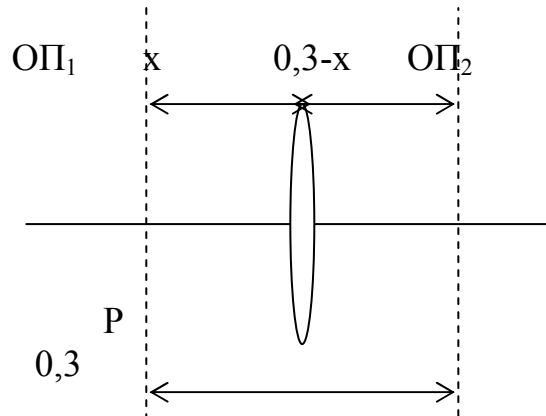
Примеры решения задач матричным методом.

1. Предмет находится на расстоянии 0,3 м от изображения. Каково должно быть фокусное расстояние линзы и где её следует разместить, если увеличение $-20\times$?

Решение: Общая матрица системы определяется:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & (0,3-x) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -P & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (0,3-x) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x \\ -P & (1-Px) \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1-0,3P+Px & x+(0,3-x)(1-Px) \\ -P & (1-Px) \end{bmatrix}$$



Линейное увеличение $A=-20^*$, следовательно $1/D=-0,05$, а $B=0$, тогда $B=x-0,05(0,3-x)=0$

$1,05x=0,05 \cdot 0,3$, откуда $x=0,0143 \text{ м}=14,3 \text{ мм}$.

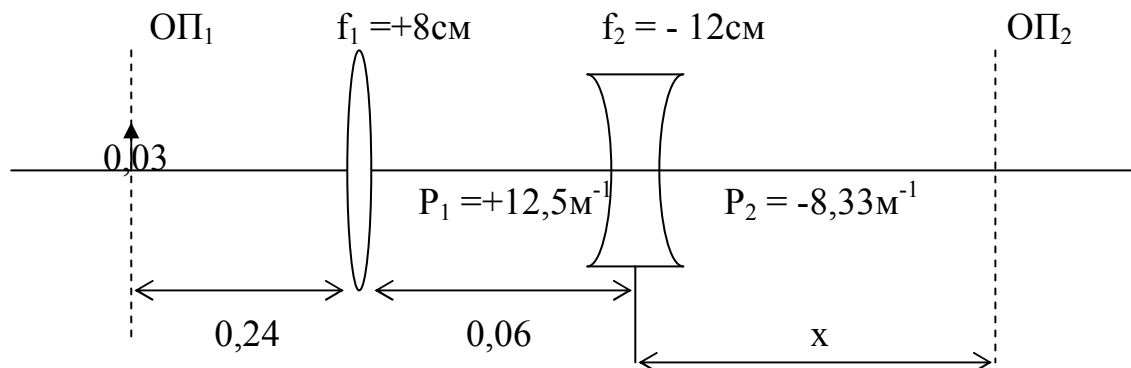
Уравнение для D принимает вид

$1-0,0143P=-0,05$, так что $P=+73,43$

Таким образом, фокусное расстояние $(1/73,43) \text{ м}=0,0136 \text{ м}=13,6 \text{ мм}$

Ответ. Линза должна иметь положительное фокусное расстояние, равное 13,6 мм и располагаться на расстоянии 14,3 мм от предмета.

2. Положительная линза с фокусным расстоянием +8 см установлена на расстоянии 6 см слева от отрицательной линзы с фокусным расстоянием -12 см. Слева от положительной линзы на расстоянии 24 см от неё помещён предмет высотой 3 см. найти изображение и его размер.



Решение.

Оптическая сила положительной линзы равна $+100/8=+12,5$ диоптрий, а для отрицательной линзы $(-100/12)=-8,33$ диоптрий. Цепочка матриц запишется в виде

$$M = \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 8,33 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0,06 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -12,5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0,24 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} =$$

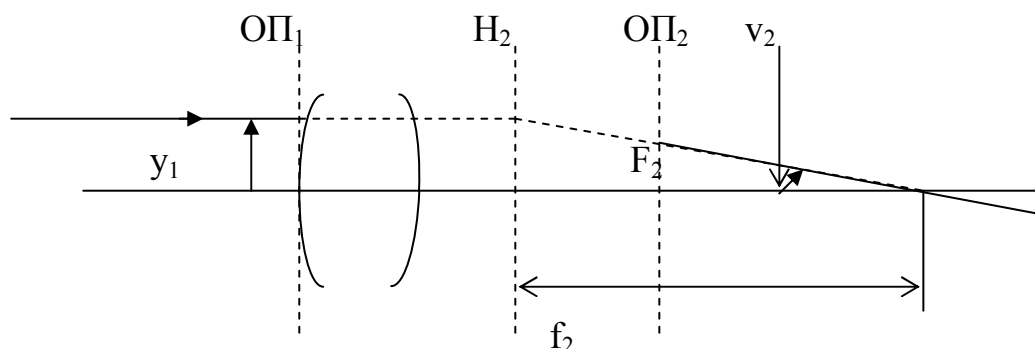
$$\begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,25 & 0,12 \\ -10,42 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,25 - 10,42x & 0,12 - x \\ -10,42 & -1 \end{bmatrix}$$

Для того, чтобы выполнялось соотношение связи между предметом и изображением, необходимо $0,12 - x = 0$, откуда $x = 0,12$ м. Увеличение $1/D = -1$. Следовательно, изображение перевернуто, его высота 3 см. Расположено это изображение справа от отрицательной линзы на расстоянии 12 см от неё.

Расположение кардинальных точек системы.

Предположим, определена матрица системы $M = \begin{bmatrix} AB \\ CD \end{bmatrix}$, которая связывает параметры луча в выходной плоскости ОП₂ с его параметрами во входной плоскости ОП₁. n_1 и n_2 коэффициенты преломления сред, расположенных слева и справа от системы.

1) Луч входит в систему параллельно оптической оси на высоте y_1 (рис.3)



В соответствии с принятыми в гауссовой оптике допущениями такой луч появится на той же самой высоте во второй главной плоскости Н₂, выходя из которой он резко меняет направление своего распространения таким образом, чтобы пройти через вторую фокальную точку F₂. Для этого луча v_1 , а следовательно и V_1 равны нулю. Тогда из матрицы преобразования лучей мы имеем в плоскости ОП₂ $y_2 = Ay_1$ и $v_2 = V_2/n = Cy_1/n_2$.

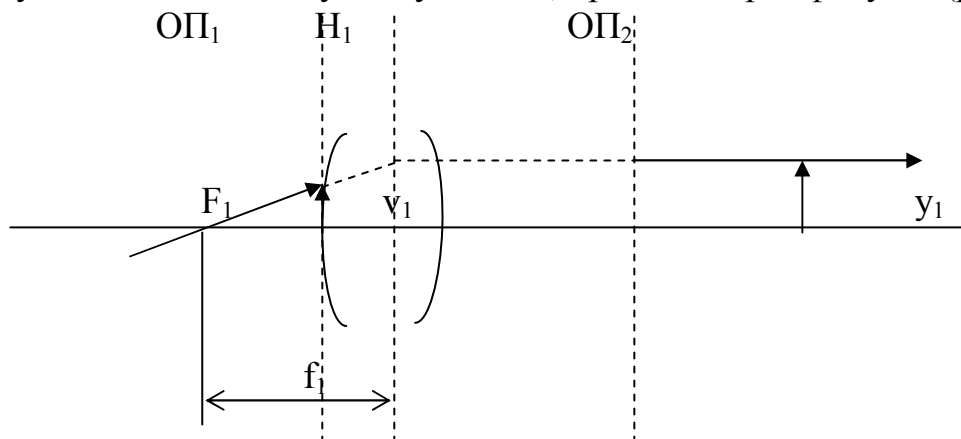
Пусть t_2 -- смещение, измеряемое в положительном направлении оси x от ОП₂ и F₂, тогда должно выполняться соотношение: $t_2 = -y_2/v_2 = -n_2 A/C$, которое даёт местоположение второго фокуса.

Рассматриваемый луч выходит из второй главной плоскости Н₂ в точке с вертикальной координатой y_1 . Следовательно, если определить второе фокусное расстояние f_2 как смещение от Н₂ до F₂, то оно должно быть равно $f_2 = -y_1/v_2$. Поэтому $f_2 = -n_2 y_1 / Cy_1 = -n_2 / C$, т.е. определено второе фокусное расстояние.

Смещение от ОП₂ до второй главной плоскости равно :

$$S_2 = t_2 - f_2 = n_2(1-A)/C$$

2) Луч входит в систему под углом v_1 , проходя через фокус F_1 (рис. 4)



Направление распространения этого луча резко изменяется при пересечении им первой главной плоскости H_1 , он становится параллельным оптической оси и, следовательно, пересекает ОП₂ под углом $v_2=0$ ($V_2=0$). Можно написать $V_2 = Cy_1 + Dn_1v_1 = 0$ и $y_1 = -Dn_1v_1/c$. Смещение t_1 фокуса F_1 от ОП₁ $t_1 = -y_1/v_1 = n_1D/C$. Таким образом определяется положение первого фокуса.

В первой главной плоскости y – координата данного луча должна быть равна $y_2 = Ay_1 + Bn_1v_1$. Поэтому определив первое фокусное расстояние f_1 как смещение F_1 от H_1 , будем иметь $f_1 = y_2/v_1 = -DAn_1/C + Bn_1 = -n_1(AD-BC)/C = -n_1/C$.

Смещение главной плоскости H_1 относительно ОП₁ $S_1 = t_1 + f_1 = n_1(D-1)/C$.

Расположение кардинальных точек системы относительно опорных плоскостей сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Расположение кардинальных точек оптической системы:

Описываемый параметр системы	Измеряемый От	до	Функция матричных элементов	Случай $n = n_1 = 1$
Первый фокус	ОП ₁	F_1	$n_1 D / C$	D / C
Первое фокусное расстояние	F_1	H_1	$- n_1 / C$	$- 1 / C$
Первая главная точка	ОП ₁	H_1	$n_1 (D - 1) / C$	$(D-1) / C$
Первая узловая точка	ОП ₁	L_1	$(D n_1 - n_2) / C$	$(D-1) / C$
Второй фокус	ОП ₂	F_2	$-n_2 A / C$	$- A / C$
Второе фокусное расстояние	H_2	F_2	$-n_2 / C$	$- 1 / C$
Вторая главная точка	ОП ₂	H_2	$n_2 (A - 1) / C$	$(1-A) / C$

точка		C	
Вторая узловая точка	ОП ₂ L ₂	(n ₁ – An ₂) / C	(1-A) / C

Для полноты параксиального анализа оптической системы необходимо рассмотреть преобразование луча между двумя главными плоскостями и между двумя фокальными.

Для промежутка между двумя главными плоскостями матрица преобразования луча:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 1 & \frac{1-A}{C} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1-D}{C} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1-A}{C} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & \frac{A(1-D)}{C} + B \\ C & \frac{C(1-D)}{C} + D \end{bmatrix} = \\
 & \begin{matrix} \text{от } H_2 & \text{от ОП}_2 & \text{от ОП}_1 \\ \text{до ОП}_2 & \text{до ОП}_1 & \text{до } H_1 \end{matrix} \\
 & = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1-A}{C} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & \frac{A-1}{C} \\ C & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ C & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{поскольку } AD - BC = 1)
 \end{aligned}$$

Существует соотношение между предметом в плоскости ОП₁ и изображением в плоскости ОП₂ с единичным коэффициентом поперечного увеличения. Для промежутка между фокальными плоскостями матрица преобразования луча :

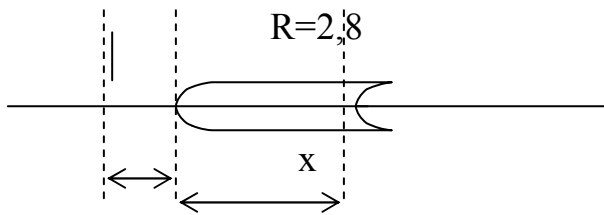
$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 1 & -\frac{A}{C} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{D}{C} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{A}{C} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & -\frac{AD}{C} + B \\ C & -\frac{CD}{C} + D \end{bmatrix} = \\
 & \begin{matrix} \text{от } F_2 & \text{от ОП}_2 & \text{от ОП}_1 \\ \text{до ОП}_2 & \text{до ОП}_1 & \text{до } F_1 \end{matrix} \\
 & = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{A}{C} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & -\frac{1}{C} \\ C & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ C & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & f \\ -\frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Т.е. высота луча во второй фокальной плоскости зависит от угла луча в первой фокальной плоскости, в то время как угол луча во второй фокальной плоскости зависит от высоты луча в первой. Кроме того, если расстояние x_1 от предмета до первой фокальной плоскости, измеряемое влево от фокуса F_1 , записать в виде y_1/V_1 , а расстояние x_2 – в виде y_2/V_2 , то сразу получим :

$$x_1 * x_2 = (y_1/V_1) (y_2/V_2) = -f^2 \quad (\text{уравнение Ньютона})$$

Дополнительные задачи.

1. Перед стержнем из оргстекла ($n=1,56$) на расстоянии 15 мм установлен объект. Где будет изображение, если радиус кривизны передней поверхности $r=2,8$ мм? Каково увеличение системы?



Общая матрица системы:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & \frac{x}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{r} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 15 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{x}{7,80} & 15 - \frac{x}{0,78} \\ -0,2 & -2 \end{bmatrix}$$

$$\det M = -2 + (x/3,9) + 3 - (x/3,9) = 1,$$

То есть матрица составлена правильно.

Поскольку система является системой с сопряженными плоскостями, то $B=0$, тогда

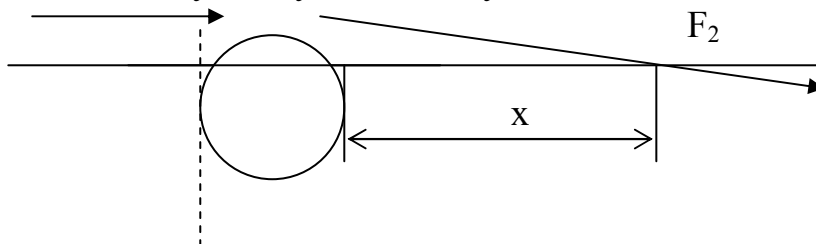
$$15 - (x/0,78) = 0, \text{ отсюда } x = 11,7 \text{ мм};$$

Коэффициент линейного увеличения

$$\beta = A = 1/D = -0,5^*.$$

Ответ: Изображение действительное, перевернутое, уменьшенное, $\beta = -0,5^*$, формируется внутри стержня на расстоянии $x=11,7$ мм.

2. На каком расстоянии от стеклянного шарика ($n=1,4$; $r=1,0$ мм) соберется параллельный пучок лучей? Что будет, если $n=2,0$?



Общая матрица системы:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(1-1,4)}{1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{2}{1,4} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -\frac{1,4-1}{1} & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,429 & 1,429 \\ -0,571 & 0,429 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0,429 - 0,571x) & (1,429 + 0,429x) \\ -0,571 & 0,429 \end{bmatrix}$$

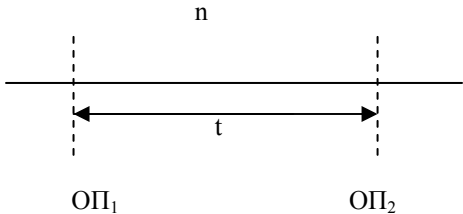
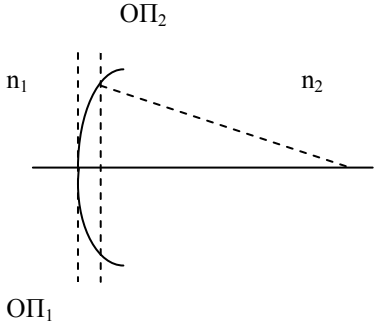
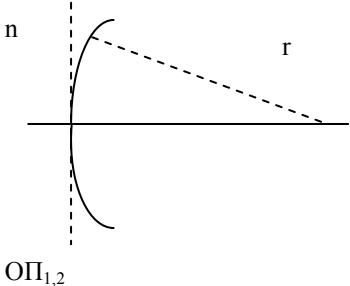
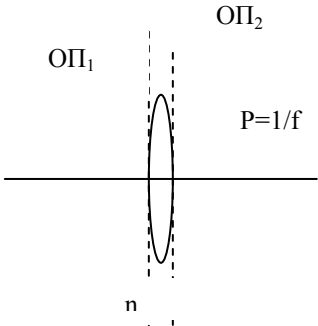
Излучение соберется в фокусе, если $A=0$, тогда $0,429 - 0,571x=0$, отсюда $x=0,75$ мм. Задний фокус системы расположен на расстоянии 0,75 мм от задней поверхности шарика.

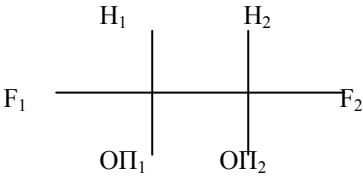
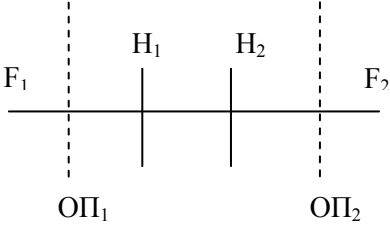
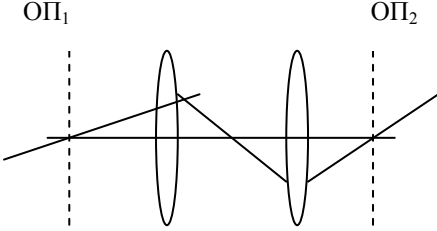
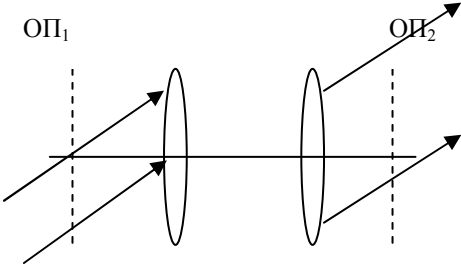
Если коэффициент преломления стекла $n=2,0$, то имеем:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x & (1+2x) \\ -1 & 2 \end{bmatrix},$$

То есть $x=0$, а это значит, что шарик стал ретроотражателем.

Возможные варианты построения компонентов оптических систем сведены в таблицу.

Описание	Оптическая схема	Матрица преобразования
1) Перемещение в свободном пространстве		$\begin{bmatrix} 1 & t/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
2) Преломление на поверхности		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(n_2 - n_1)}{r} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -P & 1 \end{bmatrix}$
3) Отражение от поверхности		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2n}{r} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -P & 1 \end{bmatrix}$
4) Тонкая линза (f ; P)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -P & 1 \end{bmatrix}$

5) Преобразование между двумя главными плоскостями		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -P & 1 \end{bmatrix}$
6) Преобразование между фокусными плоскостями		$\begin{bmatrix} 0 & f \\ -1/f & 0 \end{bmatrix}$
7) Преобразование между сопряженными плоскостями (m ; f)		$\begin{bmatrix} m & 0 \\ -1/f & 1/m \end{bmatrix}$
8) Афокальная система		$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & 1/m \end{bmatrix}$

Оптические резонаторы и распространение лазерного пучка.

Матричным методом можно решать многочисленные практические задачи лазерной оптики. Описание процесса распространения волн на языке геометрической оптики является идеализацией свойств волновых нормалей. При условии, что из рассмотрения исключается фокальная и околофокальная области, лучи и соответствующие им волновые фронты можно представить как взаимно ортогональные семейства прямых линий и кривых поверхностей. В том случае, когда волновой фронт можно считать сферическим, его форма полностью определяется векторами лучей двух пересекающихся нормалей и волновому фронту. Кроме того, если известно, что центр кривизны сферического волнового фронта расположен в некоторой точке на оптической оси, то достаточно задать всего лишь один дополнительный параметр, чтобы полностью определить его местоположение. На рис. показаны несколько параксиальных лучей, расходящихся от точечного объекта O_1 , расположенного на оси на расстоянии r_1 слева от опорной плоскости $ОП_1$. Для всех членов этого семейства это отно-

шение высоты луча y_1 к углу v_1 равно r_1 , т.е. $r_1 = y_1/v_1$.

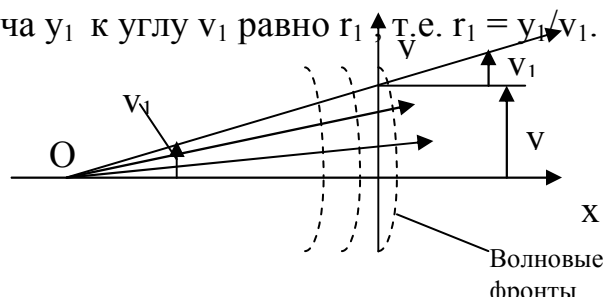


Рис. Пучок параксиальных лучей.

При определении кривизны волнового фронта используется приведенный радиус кривизны, т.е. $R = r/n = y/V$. Преимущество приведённого значения в том, что при пересечении пучком плоской границы раздела двух сред, значение R для соответствующего волнового фронта остаётся неизменным. Для сферического фронта, центр кривизны которого расположен на оси, значение R является единственным параметром, которым полностью определяет форму волнового фронта.

Из матрицы преобразования лучей при прохождении через оптическую систему определяется непосредственно два уравнения:

$$y_2 = Ay_1 + BV_1$$

$$V_2 = Cy_1 + DV_1$$

Отсюда $R = y/V$:

$$R = \frac{y_2}{V_2} = \frac{Ay_1 + BV_1}{Cy_1 + DV_1} = \frac{A\left(\frac{y_1}{V_1}\right) + B}{C\left(\frac{y_1}{V_1}\right) + D} = \frac{AR_1 + B}{CR_1 + D}$$

Это соотношение называется правилом АВСД.

Если рассмотреть распространение расходящейся световой волны на некотором оптическом промежутке, то подстановка τ - матрицы в формулу АВСД даёт:

$$R_2 = \frac{1R_1 + T}{0R_1 + 1} = R_1 + T$$

(очевидный результат для расходящегося волнового фронта.)

В случае преломления пучка на тонкой положительной линзе с оптической силой P подстановка R – матрицы даёт:

$$R_2 = \frac{1R_1 + 0}{-PR_1 + 1} = \frac{R_1}{1 - PR_1}$$

или $1/R_2 = (1/R_1) - P$ (расходимость волнового фронта уменьшилась на величину, равную оптической силе собирающей линзы).

На рис. показано схематическое устройство типичного лазерного резонатора, основной функцией которого является приращение световым волнам, излучаемым лазером, строго определённую модовую структуру.

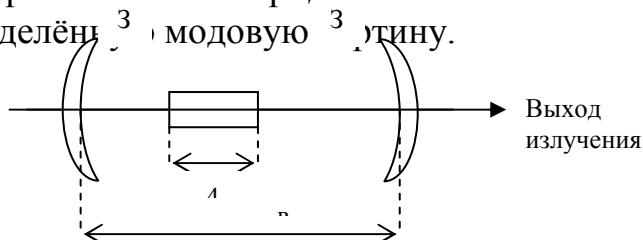


Рис. Схема лазерного резонатора.

Активное вещество имеет длину L и помещается между двумя зеркалами резонатора, расстояние между которыми равно b . Поскольку слой активного вещества эквивалентен плоскопараллельной пластине, матрица перемещения луча, соответствующая оптическому промежутку между двумя зеркалами резонатора, содержит приведённую длину:

$$T = \frac{b-L}{1} + \frac{L}{n} = b - \frac{(n-1)L}{n}$$

Где n – коэффициент преломления активной среды.

Поскольку интерес представляет конфигурация световых волн, излучаемых через выходное зеркало, удобно расположить ОП₁ на поверхности частично отражающего зеркала, вторая опорная плоскость ОП₂ совпадает с ОП₁. Если оптические силы зеркал P_1 и P_2 , то полная матрица преобразования лучей:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_2 \\ V_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -P_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -P_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} (1-P_1T-2P_2T+P_1P_2T^2) & T(2-P_1T) \\ (-P_1-P_2+P_1P_2T) & 1-P_1T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} y_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ V_1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\det M = 1.$$

Для того чтобы рассчитать изменения параметров луча вследствие N последовательных полных проходов через резонатор, нужно возвести полную матрицу преобразования лучей M в N -ю степень. Матрица M диагонализируется:

$$M = F \Lambda F^{-1}, \text{ где}$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix};$$

$$\text{Тогда} \quad M^N = F \Lambda^N F^{-1}$$

где F – диагонализирующая матрица; λ_1 и λ_2 – характеристические корни (собственные значения) матрицы. Для нахождения собственных значений рассматривается след матрицы

$$\begin{aligned} A + D &= (1 - P_1 T - 2P_2 T + P_1 P_2 T^2) + (1 - P_1 T) = (2 - P_1 T)(2 - P_2 T) - 2 = \\ &= 4 (1 - (T/r_1)) (1 - (T/r_2)) - 2. \end{aligned}$$

Определяются значения θ или t , такие, что

$$1. \quad A + D = 2 \cos \theta = 4 \cos^2(\theta/2) - 2,$$

$$\text{Тогда } \lambda_1 = e^{i\theta}, \quad \lambda_2 = e^{-i\theta};$$

$$2. \quad A + D = 2 \cosh t = 4 \cosh^2(t/2) - 2$$

$$\text{Тогда } \lambda_1 = e^t, \quad \lambda_2 = e^{-t};$$

$$3. \quad A + D = -2 \cosh(-t) = -4 \sinh^2(-t/2) - 2,$$

$$\text{Тогда } \lambda_1 = -e^t, \quad \lambda_2 = -e^{-t};$$

Первый случай реализуется, когда произведение $(1 - T/r_1) (1 - T/r_2)$ находить-

ся в интервале $0 \div 1$, второй при произведении > 1 , третий при произведении < 0 . Отношение компонент одного собственного вектора равно $(\lambda_1 - D)/C$, а другого $(\lambda_2 - D)/C$. Эти отношения являются значениями y/V , или значениями R луча, распространяющегося через резонатор без изменения. Если внутри резонатора существует волновой фронт с такой кривизной, то он будет самовоспроизводиться.

Те же результаты получаются из непосредственного применения правила ABCD:

$$R_2 = \frac{AR_1 + B}{CR_1 + D} \quad \text{и} \quad R_1 = R_2$$

Исключая R_2 , находим квадратное уравнение относительно R_1 :

$$CR_1^2 + (D - A)R_1 - B = 0,$$

Решения этого уравнения:

$$R_1 = \frac{(A - D) \pm \sqrt{(A - D)^2 + 4BC}}{2C} = \frac{(A + D \pm \sqrt{(A + D)^2 - 4}) - 2D}{2C}$$

Эти решения, определяющие значение R , совпадают с отношениями компонент собственных векторов $(\lambda_1 - D)/C$ и $(\lambda_2 - D)/C$, полученных методом диагонализации.

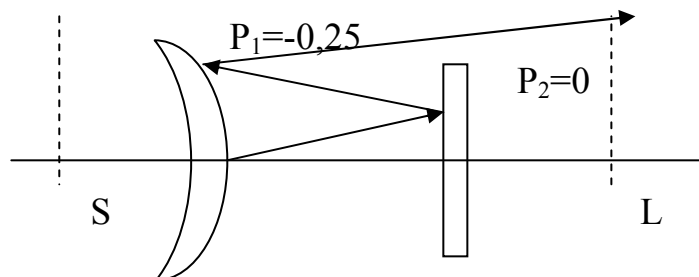
Различие между устойчивыми и неустойчивыми резонаторами.

Пример 1.

Резонатор (рис.) состоит из двух зеркал, причём одно из них, выпуклое, имеет радиус 8м и расположено на расстоянии 1м от плоского выходного зеркала. Исходные расчётные параметры $T=1,0$; $P_2=0$; $P_1=-0,25$; соответственно в метрах и диоптриях. Матрица, описывающая полный проход луча через резонатор:

$$M = \begin{bmatrix} 1,25 & 2,25 \\ 0,25 & 1,25 \end{bmatrix}.$$

След этой матрицы $A+D=2,5$. Чтобы найти собственные значения, предположим, что t -действительное число. Тогда получим $\lambda_1=2$ и $\lambda_2=0,5$. Следовательно, соответствующие отношения компонент собственных векторов, равны $(\lambda_1 - D)/C = +3$ и $(\lambda_2 - D)/C = -3$. Эти отношения представляют собой радиусы кривизны волновых фронтов. Первое отношение определяет сферическую волну, исходящую из точки, смещённой на 3м влево от выходного зеркала, а второе – сферическую волну, сходящуюся в точку, смещённую на 3м вправо.



(x=-3)

(x=+3)

Рис. Схема резонатора.

$$M = \begin{bmatrix} 1,25 & 2,25 \\ 0,25 & 1,25 \end{bmatrix}. \lambda_1 = +2 \text{ и } \lambda_2 = +1/2; R_1 = +3 \text{ и } R_2 = -3.$$

Лучевой вектор после полного прохода принимает вид $\begin{bmatrix} y_1 \lambda_1 \\ V_1 \lambda_1 \end{bmatrix} = \lambda_1 \begin{bmatrix} y_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} y_1 \\ V_1 \end{bmatrix}$,

т.к. ему соответствует собственное значение 2. Новый луч также принадлежит исходному пучку, однако он смещён от оптической оси на расстояние, в два раза большее, чем исходный. После N проходов через резонатор смещение от оси увеличится в 2^N раз и будет увеличиваться до тех пор, пока его путь не перекроет одна из диафрагм системы. Преобразуем нашу матрицу к новым опорным плоскостям, совпадающим друг с другом и расположенным в точке S, из которой пучок лучей расходится. Умножая справа и слева матрицу M на соответствующие τ -матрицы:

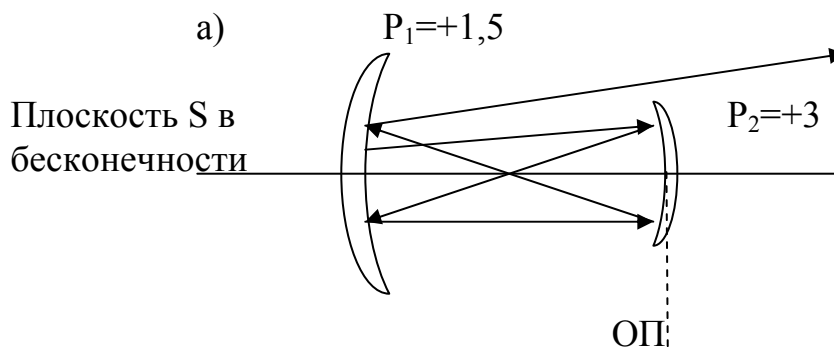
$$\begin{bmatrix} 1 & -3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,25 & 2,25 \\ 0,25 & 1,25 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 \\ 0,25 & 2 \end{bmatrix}$$

Поскольку матричный элемент в правом верхнем углу матрицы равен нулю, матрица представляет изображающую систему. При каждом проходе луча через резонатор любое распределение, существующее в плоскости S, будет сжиматься по координате u и расширяться по угловой координате V.

Если перейти к опорной плоскости, проходящей через точку L, то получим матрицу $\begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0,25 & 0,5 \end{bmatrix}$, которая наоборот даёт расширение по координате u и сжатие по угловой координате V.

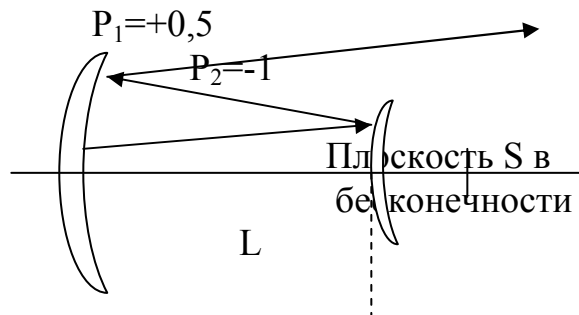
С точки зрения геометрической оптики пучок лучей произвольного начального вида в результате сконцентрируется в очень небольшой центральной области плоскости S и, напротив, сильно расширяется в плоскости L. Процесс расширения ограничивается диафрагмами в плоскости L, сжатие в плоскости S происходит вплоть до дифракционного предела.

Реализации других типов неустойчивых резонаторов приведены на рис. а и б.



$$M = \begin{bmatrix} -2 & 0,5 \\ 0 & -0,5 \end{bmatrix}, \lambda_1 = -2 \text{ и } \lambda_2 = -1/2; R_1 = \infty \text{ и } R_2 = 1/3.$$

б)



ОП

$$M = \begin{bmatrix} 2 & 1,5 \\ 0 & 0,5 \end{bmatrix}, \lambda_1 = 2 \text{ и } \lambda_2 = 1/2; R_1 = \infty \text{ и } R_2 = -1.$$

Рис. Оптические схемы неустойчивых резонаторов.

Схема (рис. а) образована вогнутыми зеркалами, разделёнными интервалом $T=1$. След матрицы равен $-2,5$. Для первого собственного значения отношение компонент вектора обращается в бесконечность поскольку $C=0$. Для второго собственного значения в этой системе существуют две оптически сопряженные плоскости, одна из которых расположена на бесконечности, а вторая проходит через общий фокус зеркал. В процессе многократных преобразований внутри резонатора пучок будет расширяться в плоскости расположенной в общей фокальной точке. И сжиматься к дифракционному пределу в плоскости, расположенной на бесконечности. Конструкция имеет серьёзный недостаток: при распространении в положительном направлении излучение фокусируется в точке L , расположенной внутри резонатора и значительная концентрация энергии приведёт к пробое и возникновению плазмы. Поэтому система (рис б) будет предпочтительнее. В этом случае $M = \begin{bmatrix} 2 & 1,5 \\ 0 & 0,5 \end{bmatrix}$, а след матрицы $A+D=2,5$, как и в

первом примере. Лучи будут концентрироваться в дифракционное пятно в плоскости S , расположенной в бесконечности. Поперечное сечение лучей в плоскости L увеличивается до тех пор, пока не наступит диафрагменное ограничение.

Монохроматические абберации

Оптическая система, пригодная для практического использования, должна давать изображение большего участка пространства, т.е. иметь необходимое поле зрения, и обладать входным зрачком конечных размеров. Чтобы такая система давала необходимое качество изображения необходимо исключить до нужного уровня влияние абберрационных свойств.

Основные требования являются исключение нарушений гомоцентрического пучка.

Физически идеальным изображением точек представляет собой диффракционное пятно, в центральной части которого сосредоточено примерно 85% всей световой энергии, прошедшей через систему. На основании принципа Ферми точечное изображение имеет место в том случае, когда оптические пути осевого и действительного луча будут равны между собой, т.е. $-nt + n't' = -ns + n's'$ (рис. 3.1.1).

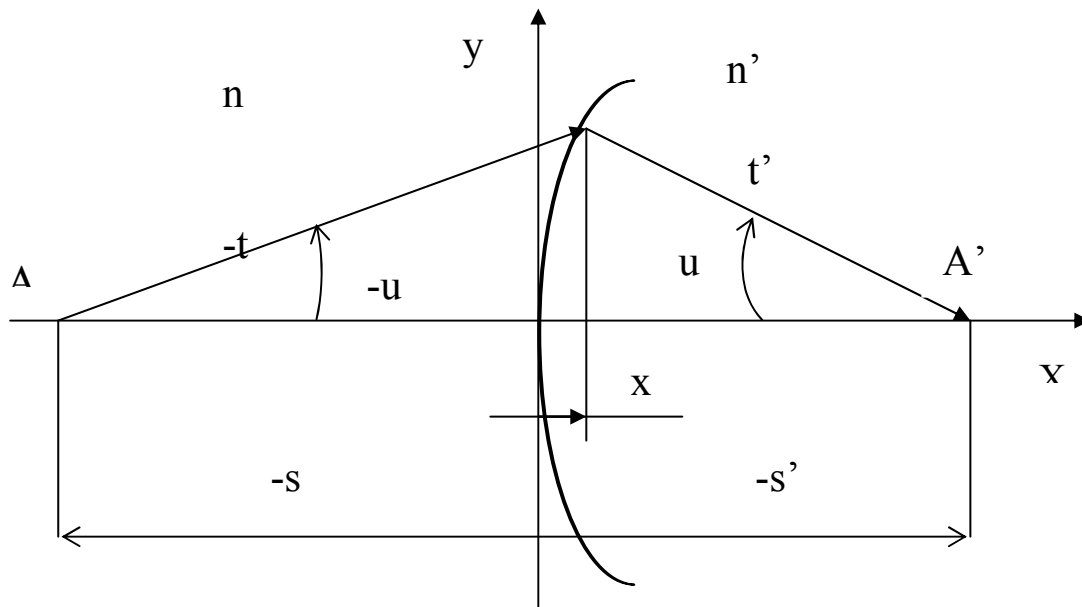


Рис. 3.1.1. Ход действительного луча через преломляющую поверхность.

Так как $t = \sqrt{y^2 + (s-x)^2}$ и $t' = \sqrt{y^2 + (s'-x)^2}$, то

$$-n\sqrt{y^2 + (s-x)^2} + n'\sqrt{y^2 + (s'-x)^2} = -ns + n's' \quad (1)$$

Уравнение (1) является уравнением так называемой анаберрационной поверхности, т.е. поверхности, дающей совершенное изображение точек. Для предмета в бесконечности ($s = -\infty, t = -\infty$).

$$s' = f'; \quad n's' = n'f'; \quad [-nt + ns](\text{при } s \rightarrow -\infty) = nx.$$

и

$$n't' = n'\sqrt{y^2 + (f'-x)^2};$$

поэтому (1) запишем в виде

$$nx + n'\sqrt{y^2 + (f'-x)^2} - n'f' = 0;$$

Отсюда

$$(y)^2 = 2(1 - (n/n'))f'x - [1 - (n/n')^2](x)^2. (2)$$

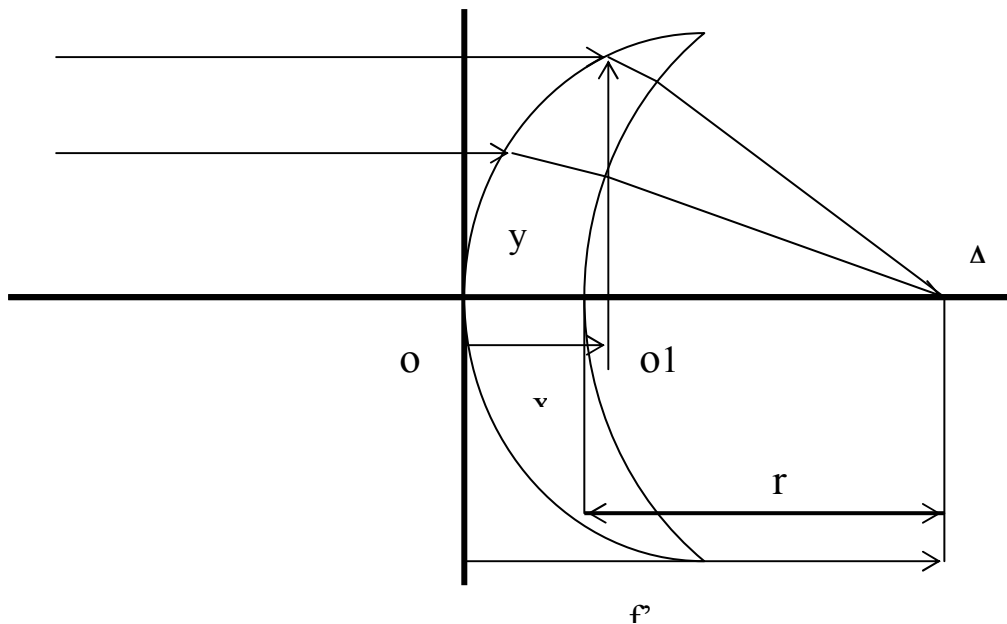
Выражение (2) представляет собой уравнение кривой второго порядка с началом координат в вершине поверхности. При $n=1$ это уравнение эллипса :

$$(y)^2 = 2(1 - (1/n'))f'x - (1 - (1/n')^2)(x)^2. (2');$$

Если a - большая ось эллипса, b -малая ось и e -эксцентриситет, то

$$(b/a)^2 = 1 - (1/(n')^2); e = \sqrt{1 - (b/a)^2};$$

отсюда $e = 1/n'$. Эксцентриситет эллипса, таким образом, равен обратной величине коэффициента преломления в пространстве изображений. Изображение (точка A) располагается во втором фокусе эллипса. Ограничим среду с коэффициентом преломления n' второй сферической - поверхностью, описанной из точки A' как центра, тогда получится анаберрационная линза.



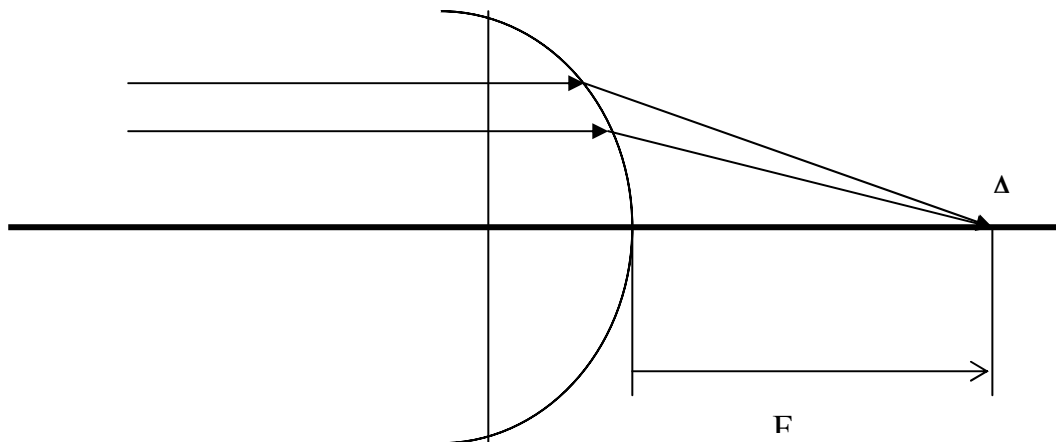


Рис. 3.1.2. Анаберрационные линзы.

Допустим пространство предметов имеет коэффициент преломления n , а пространство изображения $n'=1$, тогда (2') будет иметь вид:

$$(y)^2 = -2(n-1)f'x + ((n)^2-1)(x)^2. \quad (2'')$$

Уравнение (2'') - уравнение гиперболы с началом координат в вершине. Эксцентриситет гиперболы получается равным коэффициенту преломления ($e=n$), и тогда точка A' находится в фокусе другой ветви гиперболы. Чтобы получить анаберрационную линзу, необходимо среду с коэффициентом преломления n ограничить от воздуха плоской поверхностью. Если $s=s'$, т.е. предметная точка и её изображение совпадают с вершиной при преломляющей поверхности, то любая поверхность будет анаберрационной.

Для отражающей поверхности $n'=-n$ уравнение (1) может быть записано в виде

$$(y)^2 = 4ss'x/(s+s') + 4ss'(x)^2/(s-s')^2 \quad (3)$$

Если s и s' имеют одинаковые знаки, то отражающая поверхность будет эллиптической, а при разных знаках - гиперболической. При $s=-\infty$ формула (3) имеет вид

$$(y)^2 = 4f'x$$

т.е. отражающая поверхность является параболической.

Примеры

1. Определить координаты эллиптической преломляющей поверхности, если $n=1$; $n'=1,51829$; $s'=100$ мм.

ляющей поверхности .

x	y	t'	e
1,0	8,2284	99,3417	151,829
2,5	12,9886	98,3534	151,829
5,0	18,0889	96,7068	151,829
7,5	21,9134	95,0602	151,829
10,0	25,0222	93,4137	151,829
15,0	29,9449	90,1205	151,829
20,0	33,7487	86,8279	151,829

Оптическая длина пути вдоль оси OA' эллиптической преломляющей поверхности равна $n'OA'=ns'=151,829$;

Постоянство оптических путей для всех выражается формулой

$$l=n's'=nx+n't';$$

Параметры p и q связаны с полуосями эллипса равенствами $p=b^2/a$; $q=b^2/a^2$;

Из этих равенств можно определить большую и малую полуоси:

$$a=p/q=n's'/(n+n')=60,2905;$$

$$b=\sqrt{(p^2/q)}=\sqrt{[(n'-n)s/n+n']}] =45,3663;$$

Эксцентриситет эллипса равен:

$$e=\sqrt{(1-(b/a)^2)}=n/n'=0,658636<1,$$

он обратно пропорционален коэффициенту преломления в пространстве изображений.

Расстояние между фокусами эллипса $2c=2ac=79,4190$.

Контроль осуществляется по формуле:

$$s'=a'+c=100,0.$$

Изображение (точка A') бесконечно удаленной точки , находящейся на продолжении оптической оси OA' , располагается во втором фокусе эллипса , т.е. точка A' является задним фокусом эллиптической преломляющей поверхности . Если преломляющая поверхность вогнутая , то $s'=-100$ и уравнение её при $n=1$ и $n'=151829$ имеет вид

$$y^2=-68,27286x-0,5662x^2;$$

Так как в этом случае $x<0$, то координаты y будут иметь те же значения , что и для выпуклой эллиптической поверхности.

2. Определить координаты гиперболической преломляющей поверхности , если $n=1,51829$;

$n'=1,0$ и $s'=100,0$ мм.

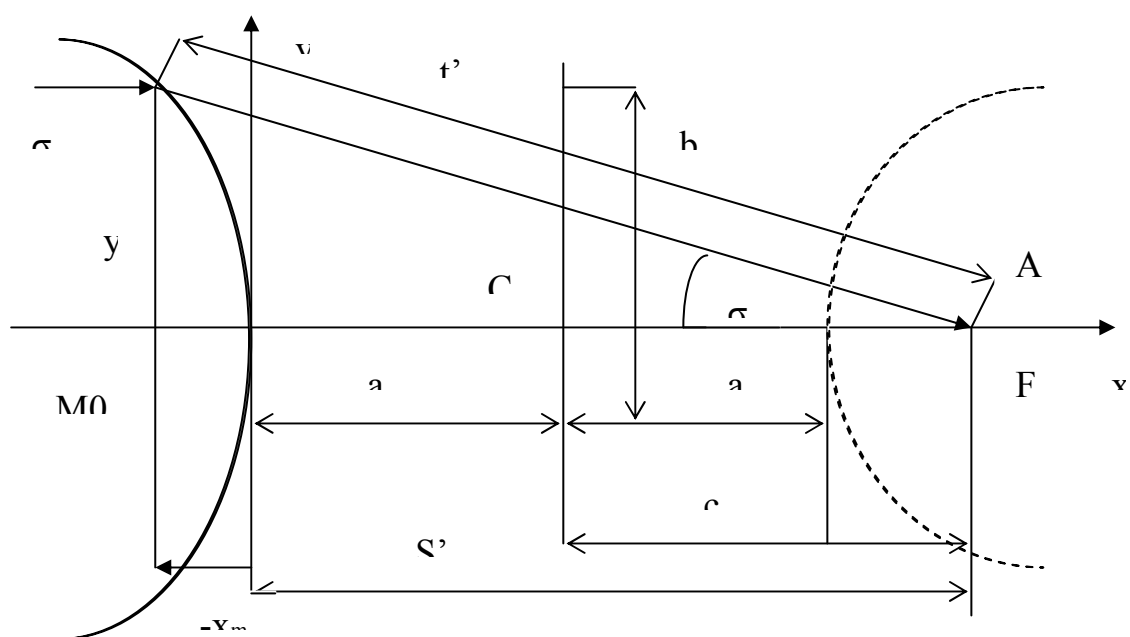


Рис 3.1.4. Анаберрационная гиперболическая преломляющая поверхность при $s=-\infty$

Решение .

При $n'=1$ уравнение гиперболической преломляющей поверхности будет иметь вид :

$$y^2 = -2s'(n-1)x + (n^2-1)x^2;$$

или , учитывая значение s и n , $y^2 = -103,658x + 1,3052x^2$, где $x < 0$.

Координаты y и оптические пути для различных значений приведены в таблице 2 .

Таблица 2. Координаты и оптический путь гиперболической преломляющей поверхности .

x	y	t'	e
-1,0	10,2452	101,5183	130,366
-2,5	16,3994	103,7957	130,366
-5,0	23,4717	107,5914	130,366
-7,5	29,1694	111,3872	130,366
-10,0	34,1628	115,1829	130,366
-15,0	42,9935	122,7743	130,366
-20,0	50,9435	130,3658	130,366

Оптический путь вдоль любого луча от плоскости ММ0 до точки А' для любой координаты у равен

$$l=n(x-x_m)+n't'=130,366,$$

а вдоль оптической оси (при у=0)

$$x_m+ns'=130,366/$$

Из вычислений видно, что пути для принятых значений х равны между собой .

Полуоси гиперболы равны

$$a=n's'/(n'+n)=39,7095 ; b=\sqrt{((n-n')s'(n'+n))}=45,3663,$$

Эксцентриситет гиперболы равен

$$e=\sqrt{1-(b/a)^2}=n/n'=1,51829>1$$

Расстояние между фокусами

$$2c=2ac=2[n/(n+n')]s'=120,581$$

Изображение (точка А') бесконечно удаленной точки располагается в первом фокусе гиперболы.

3. Показать , какого типа преломляющие поверхности надо добавить эллипсоиду и гиперболоиду вращения , чтобы получить анаберрационные линзы , т.е. линзы , дающие стигматическое изображение осевой точки предмета .

Решение.

Одна анаберрационная преломляющая поверхность не имеет практического значения . Если же и выпуклой эллиптической поверхности добавить сферическую с центром в точке А' , то получим положительную анаберрационную линзу (рис.3.1.5).

Сферическая поверхность в этом случае не будет изменять направления лучей , прошедших через эллиптическую поверхность , т.е. они пройдут через нее без преломления .

Если принять толщину линзы вдоль оптической оси d=20,0 ,то радиус кривизны сферической поверхности будет равен

$$r_2=s_2'=s_1'-d=100,0-20,0=80,0$$

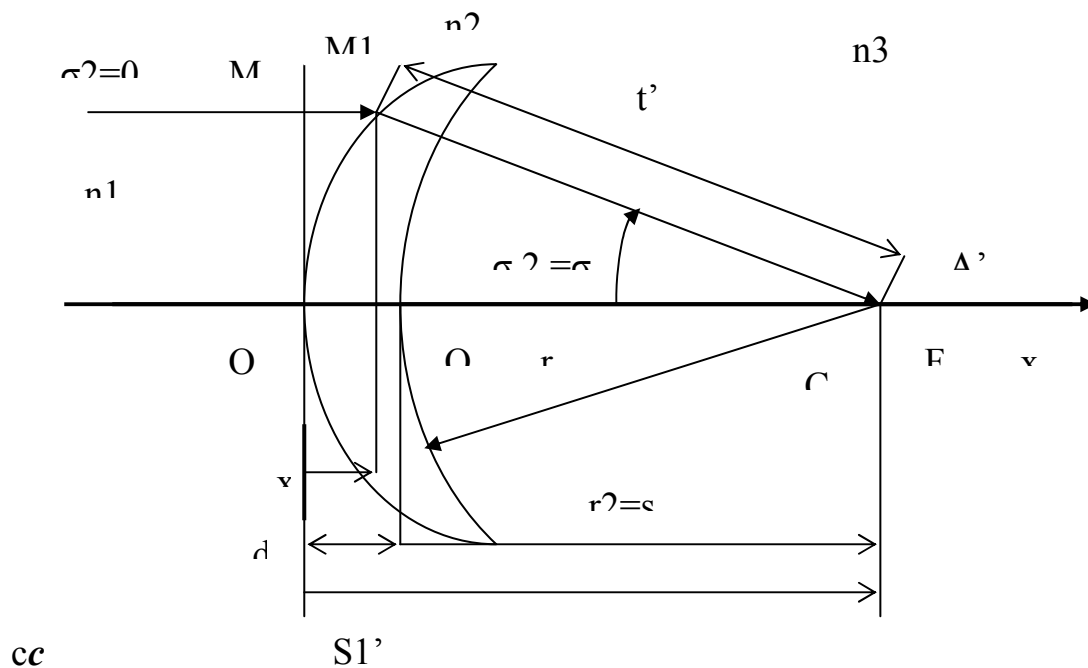


Рис. 3.1.5. Анаберрационная положительная линза с эллиптической поверхностью.

Оптическая длина пути вдоль лучей , падающих на линзу с эллиптической поверхностью .

Оптическая длина пути вдоль лучей ,падающих на линзу на высотах $h1=y$, равна

$$l=n1x+n2(t-r)+n2r ;$$

При $n1=1 ; n2=1,51829 ; n3=1$;

$$l=x+n2(t'-r)+r=110,366 .$$

Равенство оптических путей говорит о том ,что линза является анаберрационной.

Чтобы получить анаберрационную линзу с гиперболической преломляющей поверхности , впереди нее нужно расположить плоскую поверхность , так как $n>1$.

(рис. 3.1.6)

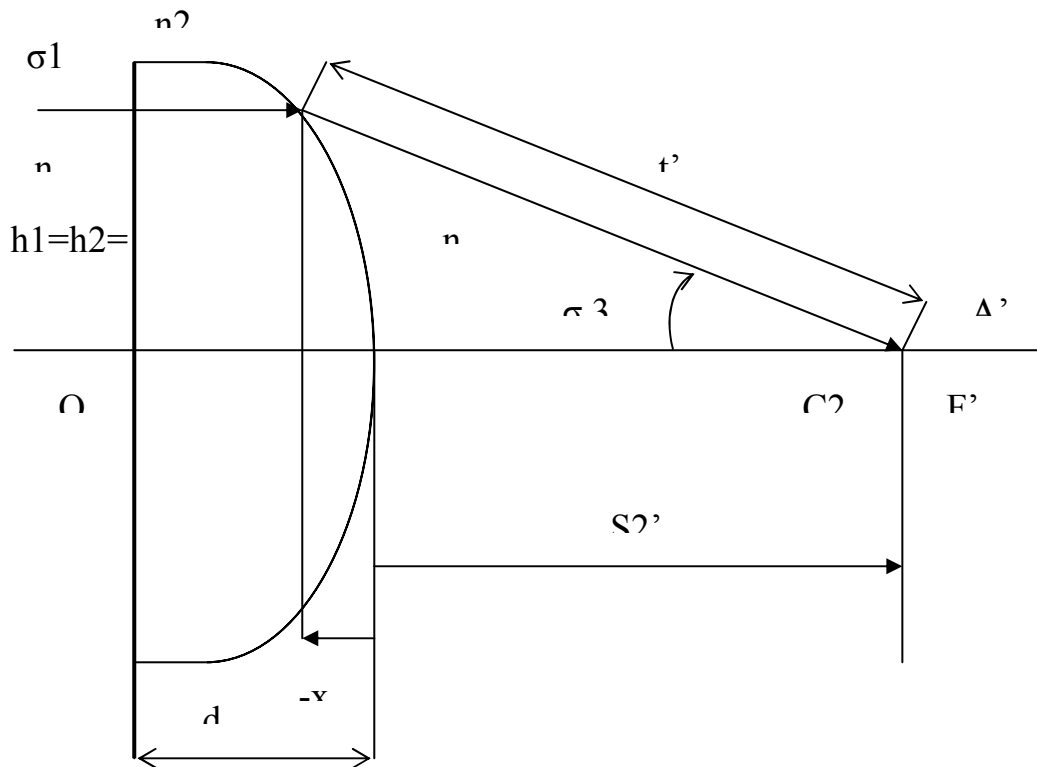


Рис .3.1.6. Анаберрационная линза с гиперболической поверхностью.

Оптическая длина пути для луча , падающего на высоте $h1=y$, составит $l=n2(d+x)+n3t'$.

При $n2=1,51829$; $n3=1$; $x=-10$; $t'=115,1829$ и $d=15,0$

Оптический путь будет равен

$$l=n2d+s2'=122,7744.$$

Линза является анаберрационной положительной.

Оптическая система должна отображать не только точечные предметы ,но и предметы , имеющие вид отрезков конечной длины , площадок . Необходимо установить условия , при которых отрезок будет отображаться отрезком без искажения .

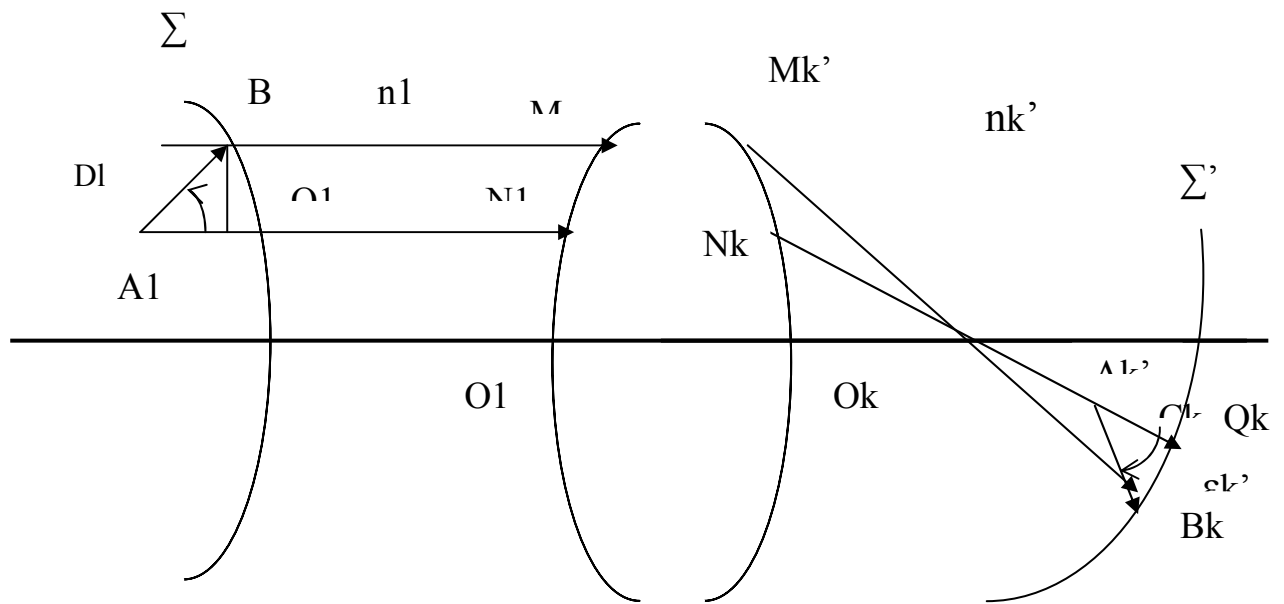


Рис. 3.1.7. Изображение элементарного отрезка , расположенного вне оптической оси .

Допустить , что два луча $A1N1$ и $B1M1$ проходят через систему $O1Ok$, состоящую

из совокупности оптических компонентов . Этим лучам в пространстве изображений соответствуют сопряженные лучи $Nk'Ak'$ и $Mk'Bk'$. Возмём на лучах $A1N1$ и $B1M1$ две пары произвольных точек $A1$ и $B1$, расстояние между которыми dlk' . Поверхность $B1Q1$, ортогональной к лучам $A1N1$ и $B1M1$, в пространстве $Bk'Qk'$, ортогональная к лучам $Nk'Ak'$ и $Mk'Bk'$.

Согласно принципу Ферма

$$B1BK' = Q1QK' = L1 .$$

Для получения идеального изображения точек $A1$ и $B1$ оптической длины путей

$B1BK'$ и $A1AK'$ должны отличаться на постоянную . Обозначим оптический путь между точками $A1$ и AK' через $L2$, тогда

$$L2 - L1 = \text{const.}$$

$$L2 - L1 = n1 \cdot A1C1 + n1C1Q1 + Q1QK' - nk' \cdot A1K'C1K' - nk'CK'QK' + Q1QK' = n1dl1\cos(\epsilon1) + n1C1Q1 + Q1QK' + nk'dlk'\cos(\epsilon k') - nk' \cdot A1K'C1K' - nk'CK'QK' - Q1QK'$$

или

$$L_2 - L_1 = n_1 dl_1 \cos(\epsilon_1) - n k' dl k' \cos(\epsilon k') + n_1 C_1 Q_1 - n K' C K' Q K'.$$

При бесконечно малых dl_1 и $dl k'$ величинами $n_1 C_1 Q_1$ и $n K' C K' Q K'$ можно пренебречь, тогда в пределе будем иметь

$$L_2 - L_1 = n_1 dl_1 \cos(\epsilon_1) - n k' dl k' \cos(\epsilon k')$$

Последнее уравнение носит название косинусов. Для изображения без погрешностей бесконечно малых элементов dl необходимо выполнение законов косинусов. Разность координат (угловых или линейных) точек изображения даваемых идеальной и реальной оптическими системами, называется аберрациями.

Предположим, что известны конструктивные параметры системы (r, d, n), расстояние s_1 от первой поверхности до предметной плоскости и расстояние t от первой поверхности до входного зрачка (рис. 3.1.8.) Предметная точка B удалена от оптической оси на расстояние y_1 .

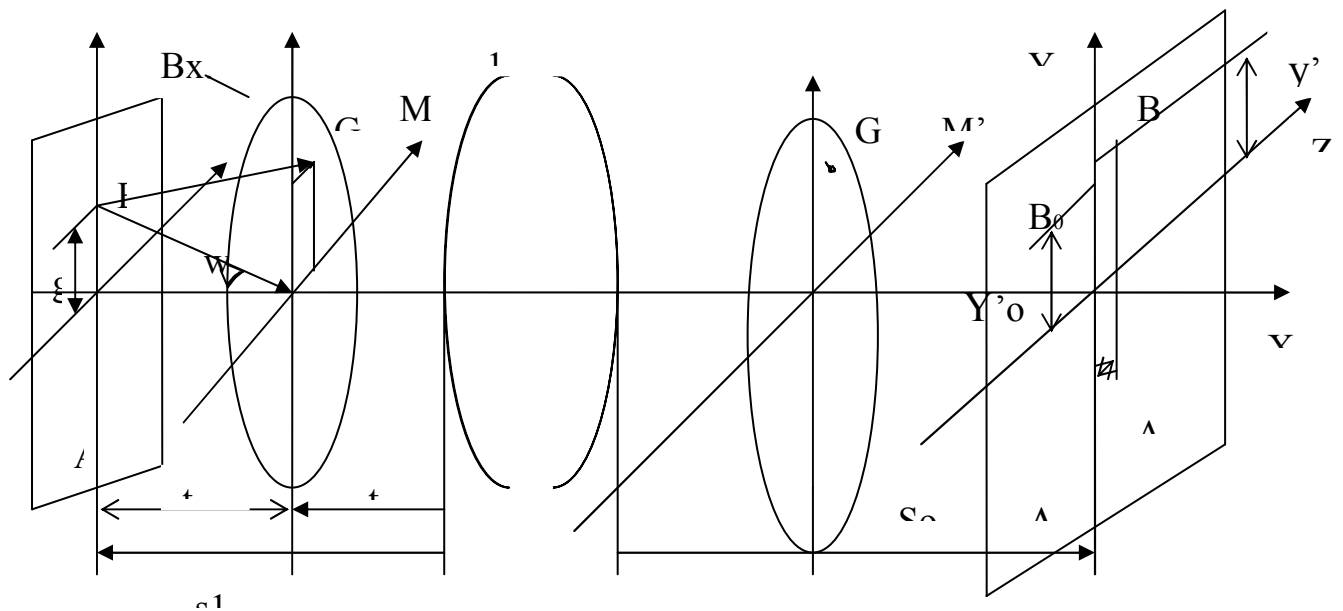


Рис. 3.1.9. Аберрации внемеридионального луча.

Выберим произвольный луч BG , который в общем случае не лежит в меридиональной плоскости. Если известны координаты y_1 , s_1 и t , то положение такого внешнемеридионального (косого) луча в пространстве определяется заданием координат точки G пересечения этого луча с плоскостью входного зрачка. Точка G в плоскости входного зрачка фиксируется координатами (n, M) .

После выбора начальных данных для расчета луча определяются координаты точки пересечения этого луча с последней поверхностью системы. Затем вычисляются координаты точки $B'(y', z')$ пересечения выходного луча с плоскостью изображения.

Расстояние s' от последней поверхности до плоскости идеального изображения определяется из расчета параксиального луча. На основании параксиального расчета находится размер идеального изображения ($y_{ор'} = y_1 \beta_0$).

Таким образом для данного луча его поперечная аберрация характеризуется отрезком $B'B_0'$. В практике расчета оптических систем эту аберрацию представляют как проекции на оси координат;

$\Delta y'$ = меридиональная составляющая поперечной аберрации ;

$\Delta z'$ = сагиттальная составляющая, которые соответственно равны :

$\Delta y' = y_{ор'} - y_{ор}$

$\Delta z' = z'$.

3.2. Аберрации третьего порядка.

Теория аберраций устанавливает связь между составляющими аберраций $\Delta y'$ и $\Delta z'$ и координатами луча y , t , M .

$$\Delta y' = f(y_1, t, M) \quad (3.2.1.)$$

$$\Delta z' = F(y_1, t, M)$$

Вследствие симметрии системы относительно оптической оси (3.2.1.) не содержат членов четных порядков. Поэтому, если их разложить в ряд, то он будет содержать только члены нечетных порядков относительно координат y_1 , t , M : третьего, пятого, седьмого и более высоких порядков :

$$\begin{aligned} \Delta y' &= \Delta y_3' + \Delta y_5' + \Delta y_7' + \dots \\ \Delta z' &= \Delta z_3' + \Delta z_5' + \Delta z_7' + \dots \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

Величины, входящие в правые части выражений (3.2.2.) называются меридиональной и сагиттальной составляющими.

Теория аберраций третьего порядка определяют приближенные значения составляющих аберраций $\Delta y'$ и $\Delta z'$, представленных в виде ряда, члены которого содержат коэффициенты A, B, C, D, E , зависящие только от конструктивных параметров системы и от положения от плоскостей предмета и входного зрачка, но не зависящие от координат луча. Эти координаты y_1, t, M входят в виде множителей ряда со степенями

Сумма которых $\alpha + \beta + \gamma = 3$. Число коэффициентов aberrации третьего порядка равна пяти.

Таким образом, для меридиальной и сачитальной составляющих aberrаций третьего порядка соответственно будем иметь:

$$\Delta y_3' = A m(t^2 + M^2) + B y_1(3m^2 + M^2) + C(y_1)^2 m + E y_1^3$$

$$\Delta z_3' = A M(t^2 + M^2) + 2B y_1 m M + D y_1^2 M$$

где коэффициенты A, B, C, D, E зависят только от положения плоскостей предмета и входного зрачка и конструктивных параметров оптической системы. Указанные коэффициенты выражают не через конструктивные параметры системы, а через параметры двух вспомогательных лучей (Рис. 3.2.1.).

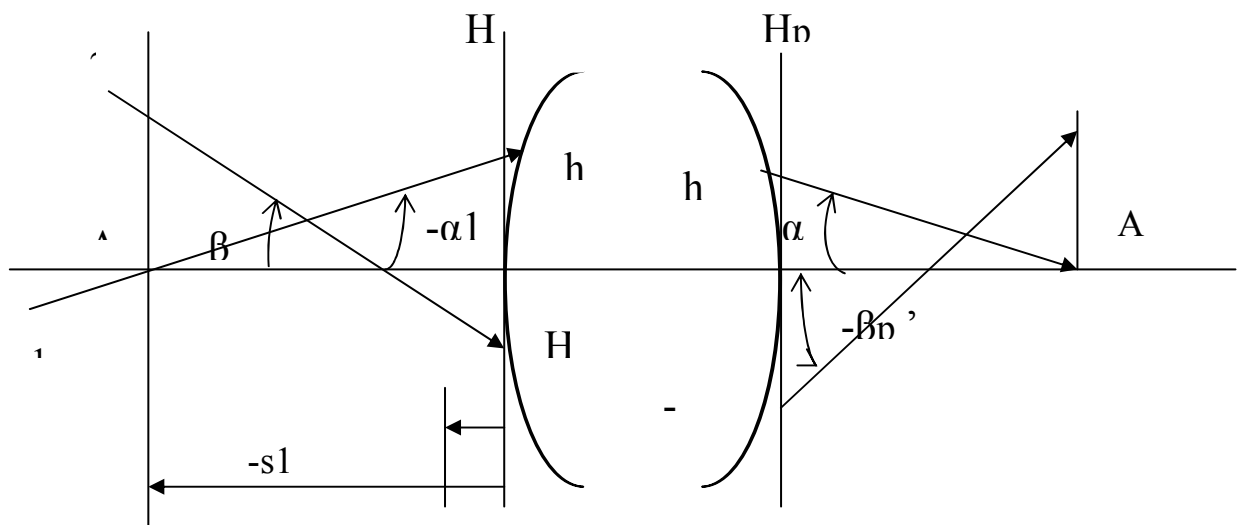


Рис 3.2.1. Ход вспомогательных лучей в оптической системе. Первый вспомогательный луч проходит через

3. Лазерное технологическое оборудование

для прецизионной обработки материалов в электронике

Технической основой вычислительной техники, приборов и средств автоматизации, систем управления и связи, бытовой радиоэлектронной аппаратуры, во многом определяющих прогресс экономического развития, являются изделия электронной техники, такие как большие (БИС) и сверхбольшие (СБИС) интегральные схемы (ИС), гибридные (ГИС) интегральные схемы, печатные платы, цветные кинескопы, жидко-кристаллические и газоразрядные панели и т.п. Повышение степени интеграции микросхем, увеличение плотности монтажа на печатной плате, повышение качества изображения телевизионной трубки требует освоения новых технологических процессов и создания нового высокопроизводительного технологического оборудования.

Наиболее эффективно эти проблемы решаются при использовании лазерных технологий и созданного на этой основе лазерного технологического оборудования: комплекты лазерного оборудования для производства фотошаблонов, литографическое оборудование для формирования топологического рисунка на полупроводниковых пластинах, оборудования для прецизионной размерной обработки. (Рис 1)

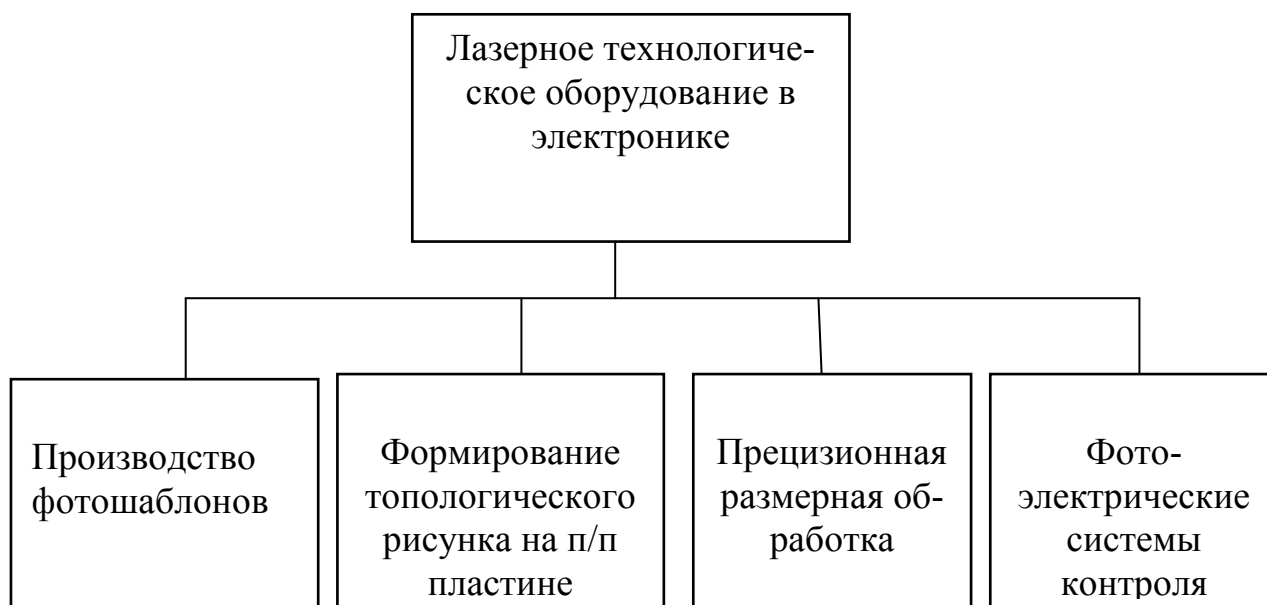


Рис. 1

1. Лазерное оборудование для производства фотошаблонов.

Одной из основных операций в технологическом процессе изготовления ряда радиоэлектронных изделий является фотолитография, а основным инструментом – фотошаблон с топологическим рисунком единичного технологического слоя.

Потребность в фотошаблонах регулируется, в принципе, активностью в проведении новых разработок изделий микроэлектроники. Кроме того, рост этой потребности поддерживается появлением у изготовителей ИС новых экспонирующих систем, в которых используются более передовые шаблонные изделия.

Несмотря на увеличивающиеся инвестиции и внедрение высокопроизводительного оборудования, фактические мощности по изготовлению шаблонов все еще не соответствуют потребности. Время, затрачиваемое на вычерчивание этих шаблонов растет экспоненциально. Кроме того, конструкции шаблонов возросшей сложности требуют таких затратных по времени технологий как фазовый сдвиг и коррекция оптической близости, а также значительные переделки и ремонт, - все это негативно влияет на выход годных, увеличивает себестоимость, а также обостряет проблему дефицита оборудования. Проблема дефицита оборудования частично решается за счет более высокой производительности новейших систем генерирования изображений. При этом многоканальные лазерные генераторы проблему производительности решают более быстрыми темпами.

В 2000 г. мировой рынок по изготовлению шаблонов вырос на 23,3% и достиг 1,53 млрд. долларов США.

В области генерирования изображений в последнее время параллельно развиваются два направления – электронно-лучевое и оптическое. Если в начале 90-х годов оптические генераторы по своим точностным параметрам уступали электронно-лучевым, то к настоящему времени их параметры, практически, сравнялись и, в силу лучших эксплуатационно-стоимостных характеристик и достаточно высокой производительности, большинство пользователей отдают предпочтение оптическим генераторам.

В научно-производственном предприятии «КБТЭМ-ОМО» концерна «Планар» создан комплекс прецизионного лазерного оборудования для изготовления оригиналов топологий изделий радиоэлектроники. Разработанный комплекс оборудования представляет собой функционально полный набор оптико-механических установок, необходимых для производства оригиналов топологий СБИС, БИС, ИС, ГИС, многослойных печатных плат и масок цветных кинескопов. Этот комплекс включает в себя три комплекта оптико-механического оборудования, в совокупности перекрывающих весь спектр потребностей оригиналов топологий, возникающих при производстве различных

изделий электронной техники:

- комплект оборудования для бездефектного изготовления оригиналов топологий БИС и СБИС;
- комплект оборудования для бездефектного изготовления оригиналов топологий ИС и ГИС;
- комплект широкоформатных генераторов изображений для изготовления оригиналов топологий печатных плат и масок кинескопов.

Комплектные поставки подобного оборудования выгодно отличаются следующие особенности:

- информационная совместимость (согласованность форматов входных языков, согласованность форматов ведомостей дефектов, согласованность систем классифицирования дефектов и т. п.);
- совместимость координатных систем (общая конструктивная база, идентичность алгоритмов аттестации, компенсации погрешностей и т. д.);
- модульность построения (взаимозаменяемость узлов, единые комплекты ЗИП, принадлежностей и т. д.);
- единая система интерфейсов, предназначенных для связи с оператором.

Все это позволяет минимизировать затраты, необходимые для приобретения, внедрения и эксплуатации данного оборудования.

1.1. Одноканальный лазерный генератор

Одноканальный лазерный генератор изображений для изготовления оригиналов топологий ИС и ГИС (ЭМ-5009БМ, ЭМ-5109) предназначен для генерирования методом одиночного микро фотонабора изображения промежуточного фото оригинала на слое фоторезиста.

Оптическая схема генератора – яркий пример использования контурно-проекционного способа формирования микроизображений (Рис.2).

Внешний вид и параметры ЭМ-5109 представлены на рисунке 3.

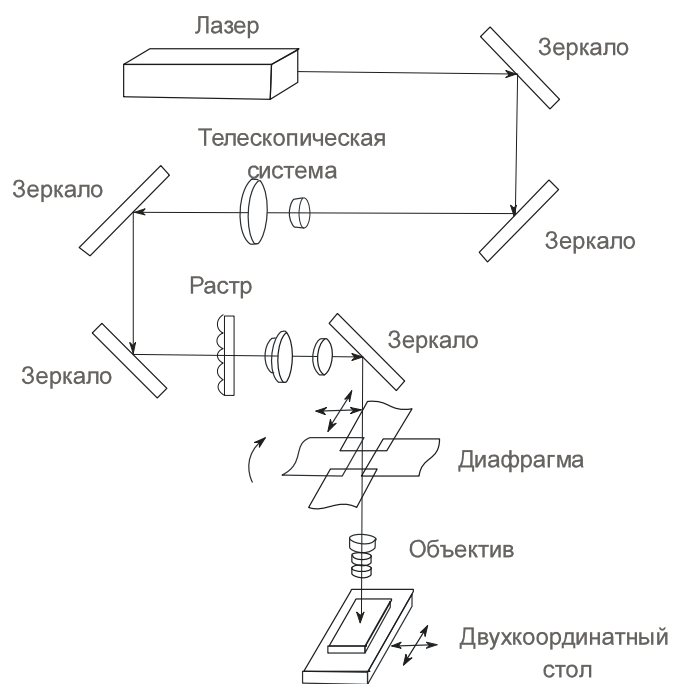


Рис.2. Оптическая схема ЭМ-5009БМ, ЭМ-5109



Генератор предназначен для изготовления металлизированных фотошаблонов при производстве интегральных схем, полупроводниковых приборов различного назначения, фотоэлектронных преобразователей, ЖК-индикаторов и экранов, прецизионных печатных плат, фотошаблонов ГИС, микроволновых схем, специальных измерительных и тестовых шаблонов, как в производстве, так и в научно-исследовательских целях

Технические характеристики

Производительность (на регулярных структурах)	до 1,7 млн. Экспоз/ч
Размер рабочего поля	до 300 x 300 мм
Погрешность позиционирования координатного стола	$\pm 0,25$ мкм
Дискретность задания перемещений координатного стола	0,125 мкм
Размеры наборного элемента	1- 300 мкм
Дискретность изменения размеров наборного элемента	0,1 мкм
Угол поворота наборного элемента	0° - 90°
Масштаб проекционного уменьшения	1:40
Типоразмеры шаблонов	по стандарту SEMI

Рисунок 3. Внешний вид и технические характеристики ЭМ-5109

Таблица сравнения с аналогом одноканального лазерного генератора изображений ЭМ-5109.

Технические характеристики	ЭМ-5109	3600F D.W. Mann
Производительность, эксп.ч	$1,7 \times 10^6$	7×10^3
Рабочее поле координатного стола, мм	300×300	200×200
Погрешность позиционирования координатного стола, мкм	±0,35	±0,6
Минимальный размер наборного элемента, мкм	1	2
Погрешность размера наборного элемента, мкм	±0,25	±0,75

Рис. 4. Таблица сравнения ЭМ-5109 с зарубежным аналогом.

1.2 Многоканальный лазерный генератор изображений для изготовления оригиналов топологий БИС и СБИС ЭМ-5089Б

Многоканальный лазерный генератор изображений для изготовления оригиналов топологий БИС, СБИС является устройством контурно-лучевого формирования изображения растрового типа. В качестве рабочего лазера (см. рис.5) используется криптоновый лазер непрерывного действия с длиной волны 351 нм. Угловой уход луча контролируется датчиком положения луча и корректируется зеркалом с пьезоп приводом. Механический затвор перекрывает луч при загрузке шаблона, фокусировании и перемещениях стола не предназначенных для экспонирования.

Расщепитель луча разделяет луч на 16 пучков одинаковой интенсивности, которые в дальнейшем преобразуются в 16 линейно-поляризованных параллельных пучков и входят в электрооптический затвор. Электрооптический затвор на основании растрового описания полосы, поступающего с блока формирования эталонного изображения, осуществляет модуляцию интенсивности каждого луча независимо друг от друга. Модуляция заключается в том, что плоскость поляризации каждого входящего луча поворачивается электрооптическим модулятором на угол, величина которого зависит от величины управляющего напряжения. Проходя через анализатор затвора, луч разделяется на два ортогонально поляризованных луча, один из которых задерживается диафрагмой. Энергия первого луча зависит от величины напряжения, приложенного к затвору, и управляется на основе информации, поступающей с блока формирования эталонного изображения. Далее 16 лучей поступают на 4-х каскадный электрооптический дефлектор. Первый каскад отклоняет лучи на 320 мкм, 2-й на 160 мкм, 3-й на 80 мкм, 4-й на 40 мкм. Отклонение производится в направлении перпендикулярном перемещению стола.

Таким образом, образуется столбец, состоящий из 256 пятен различной интенсивности, из которых синтезируется изображение. Лучи падают на поверхность заготовки фотошаблона, проходя через проекционный объектив с масштабом 100:1. По сканируемой координате (координата X) развёртка производится столом, перемещающимся со скоростью до 100 мм/сек. Отслеживание положения стола производится лазерный интерферометрической системой и не превосходит 10 нм. Точность удержания стола по координате Y находится в пределах $\pm 0,1$ мкм. Отклонение по удерживаемой координате компенсируется с помощью механического дефлектора с пьезоп приводом.

В многоканальных генераторах использованы:

- газовый Kr - лазер непрерывного действия, расходимость излучения которого близка к дифракционной, это даёт возможность использовать энергию излучения с максимальной эффективностью;
- высокоапертурный кварцевый проекционный объектив;
- быстродействующие электрооптические устройства управления излучением;

- принцип многоканальности, позволяющего достичь оптимального согласования параметров электрооптических, оптических, механических и электронных систем генератора изображения.

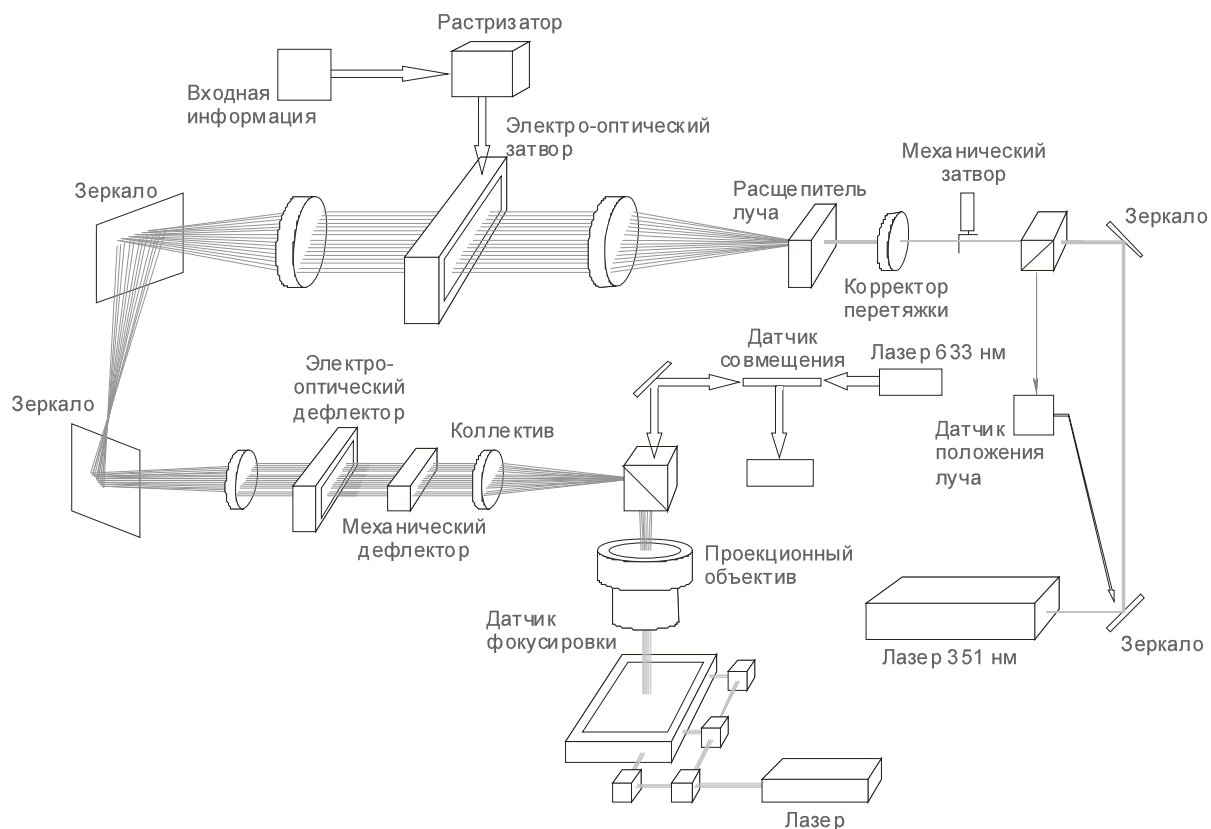


Рис.5. Оптическая схема ЭМ-5089Б



ЭМ-5089Б - представитель нового поколения сканирующих лазерных генераторов изображений (ГИ) для производства шаблонов и промежуточных шаблонов. Генератор разработан для удовлетворения требований, предъявляемых к шаблонам при производстве изделий, как, например, DRAM 64М. Это - увеличение точности формирования изображений, увеличение плотности данных, уменьшение дискрета описания.

ЭМ-5089Б - оптический генератор, по точностным параметрам соответствующий электронно-лучевым генераторам.

Технические характеристики

Погрешность расположения элементов	100 нм
Размер минимального элемента	800 нм
Неровность края	40 нм
Совмещаемость комплекта шаблонов	75 нм
Воспроизводимость размеров	40 нм
Погрешность размеров	40 нм
Размер области экспонирования	153 x 153 мм
Адресная сетка	10 нм
Производительность (область 100 x 100 мм)	1 час

Рис.6 Внешний вид и технические характеристики ЭМ-5089Б

Таблица сравнения с зарубежным аналогом многоканального лазерного генератора изображений ЭМ-5089Б.

Наименование параметра	CORE-2564	ALTA-3500	ЭМ-5089Б
Площадь экспонирования, мм ²	150x150	215x215	180x180
Минимальный формируемый размер элемента, (нм)	600	500	800
Погрешность размера элемента, (нм)	не более 50	25	50
Равномерность размера элемента, (нм)	не хуже 40	25	40
Погрешность совмещения (нм)	не более 50	25	100
Производительность, не менее, (мм ² /мин)	не приводится	не приводится	330
Совмещаемость второго слоя, не хуже, (нм)	отсутствует возможность	60	отсутствует возможность
Линейность размера	50	25	Не регламентируется
Толщина шаблонных заготовок	не приводится	не приводится	6,35
Стоимость млн. долларов США	2,5-3,0	8	1,3

Рис.7 Таблица сравнения многоканального лазерного генератора изображений ЭМ-5089Б с зарубежным аналогом.

1.3. Установка лазерного устранения дефектов оригиналов топологий БИС и СБИС ЭМ-5001Б.

В процессе изготовления, под влиянием различных технологических и производственных факторов, возникает множество дефектов топологии фотошаблонов, подразделяющихся на прозрачные и непрозрачные. Исправление дефектов ПШ остается одним из основных факторов повышения коэффициента выхода годных изделий и надежности при производстве электронных компонентов. Технологическая операция исправления дефектов получает все большее распространение, причем с уменьшением минимальных размеров элементов возрастает необходимость исправлять более мелкие дефекты на участках с высокой плотностью элементов.

Для исправления дефектов в основном применяются два типа установок: ионно-лучевые и лазерные.

Установка лазерного устранения дефектов промежуточных шаблонов ЭМ-5001Б предназначены для ремонта шаблонов, имеющих: прозрачные (проколы, вырывы, разрывы элементов, недостающие элементы) и непрозрачные (островки, выступы, перемычки между элементами, лишние элементы и т.д.) дефекты.

Установка позволяет обрабатывать шаблоны с различными типами маскирующих покрытий: хром, хром и окись хрома, окись железа. Геометрические размеры обрабатываемых шаблонов соответствуют стандарту SEMI P1-92.

В основе работы установки используются два метода устранения дефектов топологии шаблонов, выявленных во время ее контроля.

Для устранения непрозрачных дефектов используется контурно проекционный метод формирования оптического изображения, состоящий в том, что изображение синтезируется в результате последовательного обхода по контуру лазерным пучком специального сечения, которое представляет собой микропроекцию простого элемента, прямоугольника.

Достоинством такого метода является:

- 1) независимость размеров общего поля изображения от разрешающей способности (размера элемента рисунка);
- 2) высокая точность рисунка, определяемая возможностью получения минимальной неровности края и обеспечиваемая прямоугольной формой образующего изображение элемента и возможностью создания равномерного распределения энергии в нем;
- 3) высокая разрешающая способность.

Ремонт прозрачных дефектов выполняется путем пиролитического осаждения металлоорганического соединения в зоне сфокусированного излучения непрерывного аргонового лазера мод.185F02.

На рисунке 8 приведена оптическая схема установки ЭМ-5001Б.

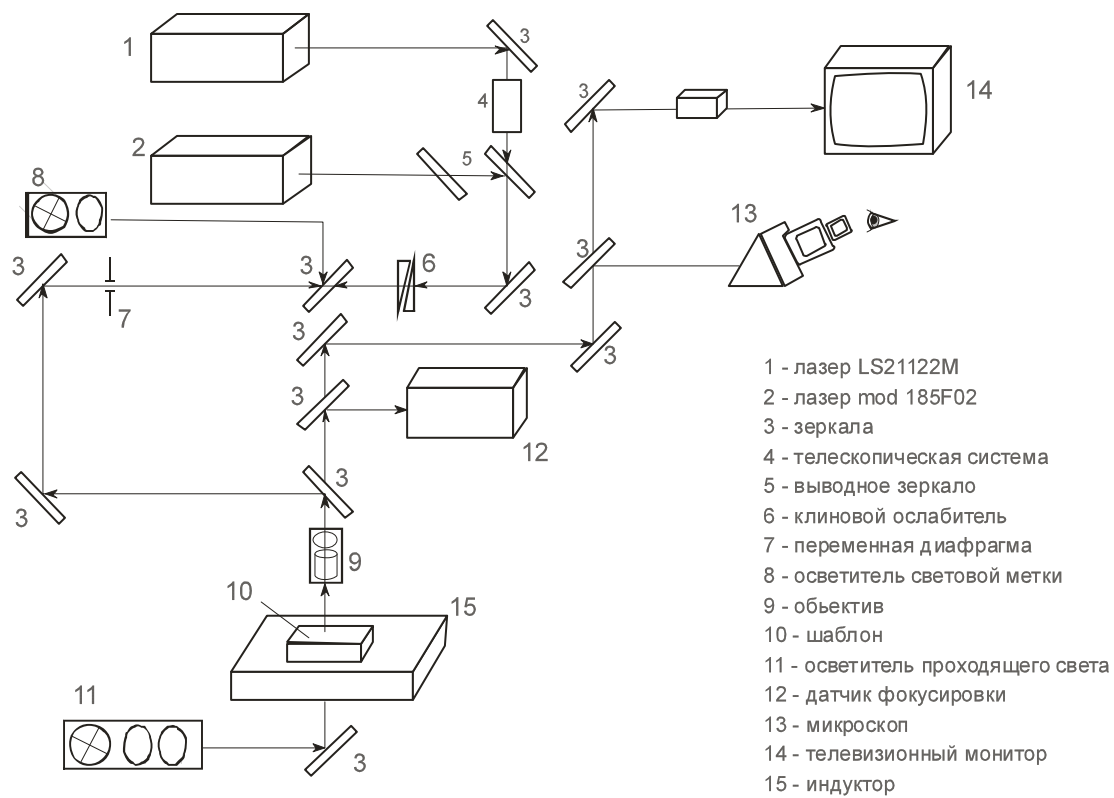


Рис.8. Оптическая схема ЭМ-5001Б



Установка ЭМ-5001Б, предназначена для ремонта шаблонов имеющих прозрачные и непрозрачные дефекты: островки, выступы, перемычки между элементами, лишние элементы, скругление углов, проколы, вырывы, разрывы элементов, уходы размеров и т. д.

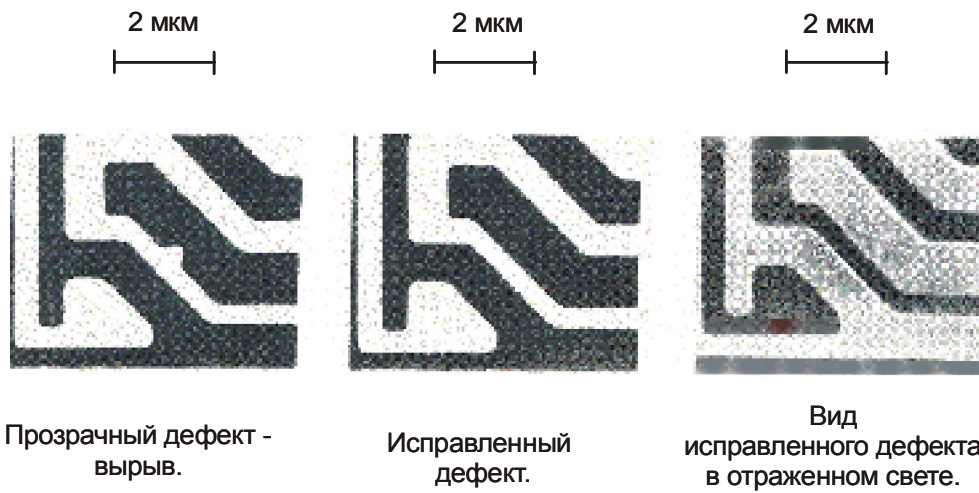
Технические характеристики

Размер рабочего поля	153 x 153 мм		
Размеры устраняемых дефектов:			
прозрачных	□ от 2 до 25 мкм		
непрозрачных	от 1 x 1 до 25 x 25 мкм		
разворот			элемента
(исправляемого участка)	от 0° до 45°		
Точность наведения	луча		лазера
на исправляемый участок, не более	0,5 мкм		
Дискретность задания			размеров
ремонтируемого непрозрачного			дефекта
по обеим координатам	0,1 мкм		

Рис.9 Внешний вид и технические характеристики ЭМ-5001Б

На следующем слайде приведены примеры ремонта прозрачных и непрозрачных дефектов.

а)



б)

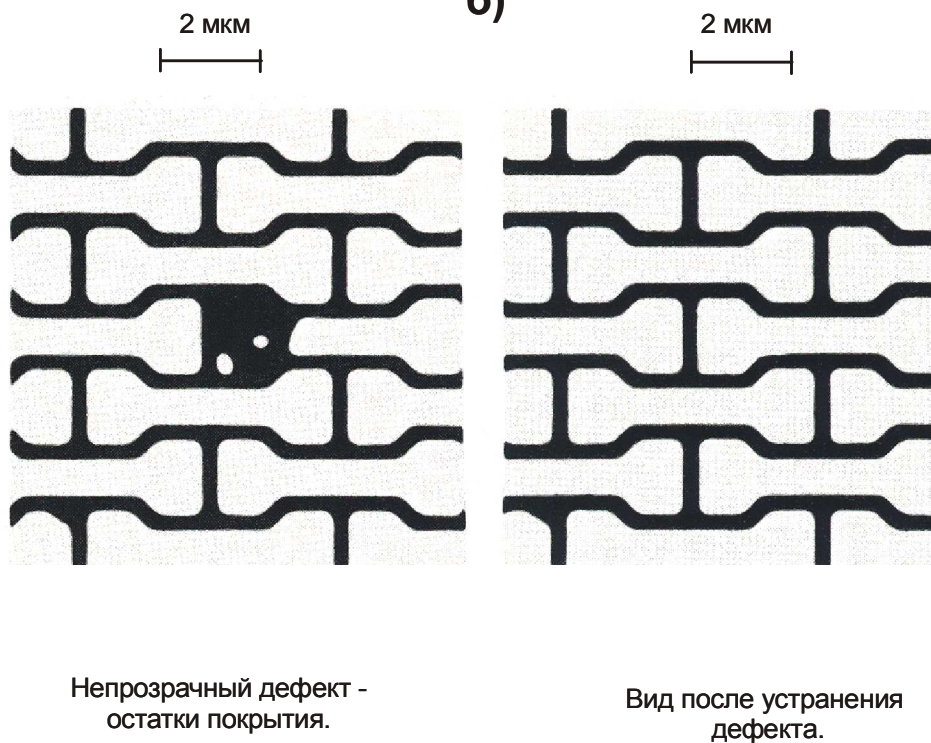


Рис. 3. 5. 4. Исправление прозрачных (а) и непрозрачных (б) дефектов топологии высокоточного оригинала.

Оптическая система (Рис.8) содержит энергетические каналы формирования лазерного излучения, каналы световой метки, наблюдения и датчика фокусировки.

Проекционные объективы рассчитаны на три длины волны 514, 532 и 650нм, что обеспечивает высококачественное наблюдение световой метки, с помощью которой осуществляется наведение на область локализации устранимого дефекта или начальную точку корректировки топологии.

Тип объектива	Кратность объектива	Апертура	Фокусное расстояние
ОМ 0,5/7,5	75 ^X	0,5	7,5
ОМ 0,35/18,7	30 ^X	0,35	18,7
ОМ 0,15/75*	7 ^X	0,15	75
ОМ 0,65/4,5	100 ^X	0,65	4,5
ОМ 0,75/3,5	123 ^X	0,75	3,5
*Используется для просмотра топологии шаблона			

В энергетическом канале с моноимпульсным лазером LS-2122М световой поток концентрируется в плоскости изображения с плотностью 10^8 - 10^9 Вт/см², что превышает пороговую плотность испарения маскирующих покрытий ПШ толщиной до 0,2мкм при размере обработки от 1х1 до 25х25мкм за один импульс излучения. При работе с непрерывным Ar лазером мод.185 F02 плотность светового потока достигает величины 10^4 - 10^5 Вт/см², что позволяет проводить лазерно-стимулированное осаждение металлоорганического соединения размером от 2 до 25 мкм.

Для устранения непрозрачных дефектов площадью больше, чем 625 мкм² используется метод наложения «элементарных» участков размером от 1х1 до 25х25мкм², оптимальным для его исправления.

Аналогичным способом производится ремонт прозрачных дефектов. Устранение прозрачных дефектов с линейными размерами ~0,5мкм производится в 2 этапа: сначала наносится металлоорганическое соединение диаметром 2мкм на всем протяжении дефекта, а затем производится удаление «лишнего» материала импульсным лазером. Внешний вид установки приведён на рисунке 9.

Таблица сравнения установки лазерного устранения дефектов фотошаблонов ЭМ-5001Б с зарубежным аналогом DRS II 840 фирмы Quantronix

Наименование параметра	Установка	
	ЭМ-5001Б	DRS II 840
1. Размер обрабатываемых шаблонов	4``x4``, 5``x5``, 6``x6``, 7``x7``,	4``x4``, 5``x5``, 6``x6``, 7``x7``,
2. Размеры устраняемых дефектов (минимальные)		
«прозрачных», мкм	0,5	0,5
«непрозрачных », мкм	1,0	2,0
3. Отклонения размеров исправляемого непрозрачного участка покрытия шаблона от номинального в пределах интервала, мкм	±0,5	±0,5
4. Погрешность автоматического выхода в заданную точку, в пределах, мкм	±2,0	±5,0
5. Производительность при испарении пленок (непрозрачные дефекты), мкм ² /с	375	250
при осаждение пленок (прозрачные дефекты), мкм ² /с	2,5	1,0

Рис. 11 Таблица сравнения ЭМ-5001Б с зарубежным аналогом.

1.4. Лазерный генератор изображений для изготовления оригиналов топологий печатных плат ЭМ-5139.

Лазерный генератор изображений для изготовления оригиналов топологий печатных плат (ЭМ-5139) предназначен для формирования изображений фотошаблонов на плоском носителе. В основе работы генератора лежит принцип растрового сканирования светочувствительного слоя фотоматериала модулированным лазерным излучением с последующим проявлением. Формируется растр путём оптико-механического сканирования сфокусированного с гауссовским распределением интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного луча по строке и непрерывного синхронного со сканированием перемещения фотоматериала по кадру. Синтез изображения фотошаблона осуществляется путём последовательного наложения строк со смещением по кадру на величину, близкую к величине радиуса фокального пятна, а также модуляцией лазерного пучка вдоль каждой строки растра по заданной программе.

В подавляющем большинстве случаев в сканирующих системах для формирования микрорисунка используются одномодовые лазеры с гауссовым распределением плотности мощности по поперечному сечению пучка. Поэтому важное значение при создании сканирующих устройств для записи информации имеет анализ качества микроизображения, создаваемого гауссовыми пучками, с целью определения функции распределения экспозиции в синтезированном изображении, ее равномерности, геометрии границ микрорисунка.

Создана математическая модель распределения экспозиции, формы создаваемого микроизображения для непрерывного и импульсного излучения (Рис. 12).

На основе результатов математического моделирования качества микроизображений разработана оптическая система и создана конструкция лазерного генератора изображений ЭМ-5139, состоящего из исполнительного органа - оптико-механического устройства и управляющего комплекса, включает в себя системы: лазерную оптическую (Рис.14), контроля положения луча и толщины фотопластины, координатную измерительную, управления генератором, электропитания, программного обеспечения.

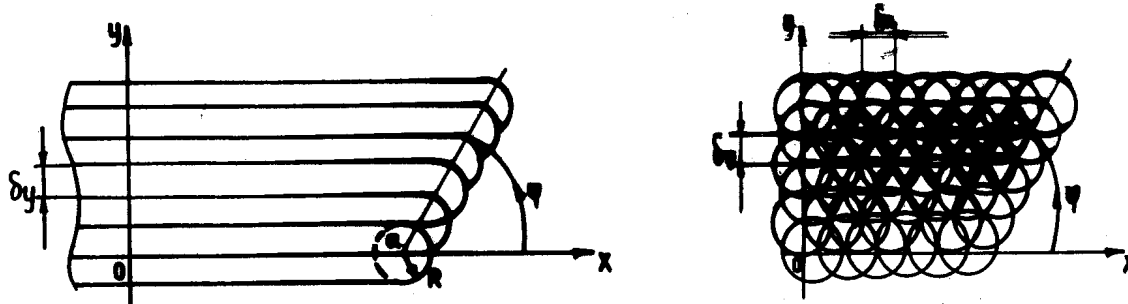
Оптическая система, относящаяся к системам «со сканированием до объектива», формирует строку растра (X-координату). Перемещение фотоматериала по кадру осуществляется однокоординатным линейным шаговым двигателем.

Измерительный канал системы организуется за счёт отвода части излучения лазера светоделителем.

Применение лазерного источника излучения, высокоточных оптических деталей (10-ти гранная призма, растровая линейка, крупногабаритное сферическое зеркало), а также использование твёрдокаменных пород для базовых деталей координатного стола дало возможность достичь высоких технических характеристик и повысить в 5...10 раз производительность по сравнению с установками барабанного типа аналогичного назначения.

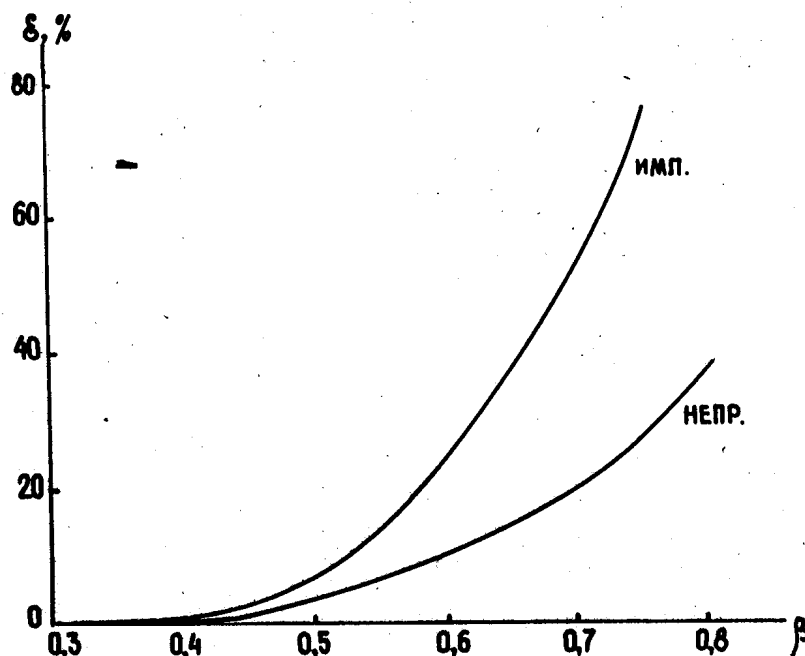
СИНТЕЗ МИКРОИЗОБРАЖЕНИЙ ГАУССОВЫМИ ПУЧКАМИ

15



$$H_1(x, y) = \frac{w_0}{U} \sum_{k=0}^N \exp \left\{ -\frac{(y - k\beta D)^2}{R^2} \right\} \int_{-2R}^{x_k - x} \exp \left\{ -\frac{2z^2}{R^2} \right\} dz \quad (23)$$

$$H_2(x, y) = w_0 \sum_{l=0}^M \sum_{k=0}^N \exp \left\{ -\frac{2[(x - l\beta D)^2 + (y - k\beta D)^2]}{R^2} \right\} \quad (24)$$



$$\xi = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max}} \cdot 100\%$$

Рис. 12 Моделирование

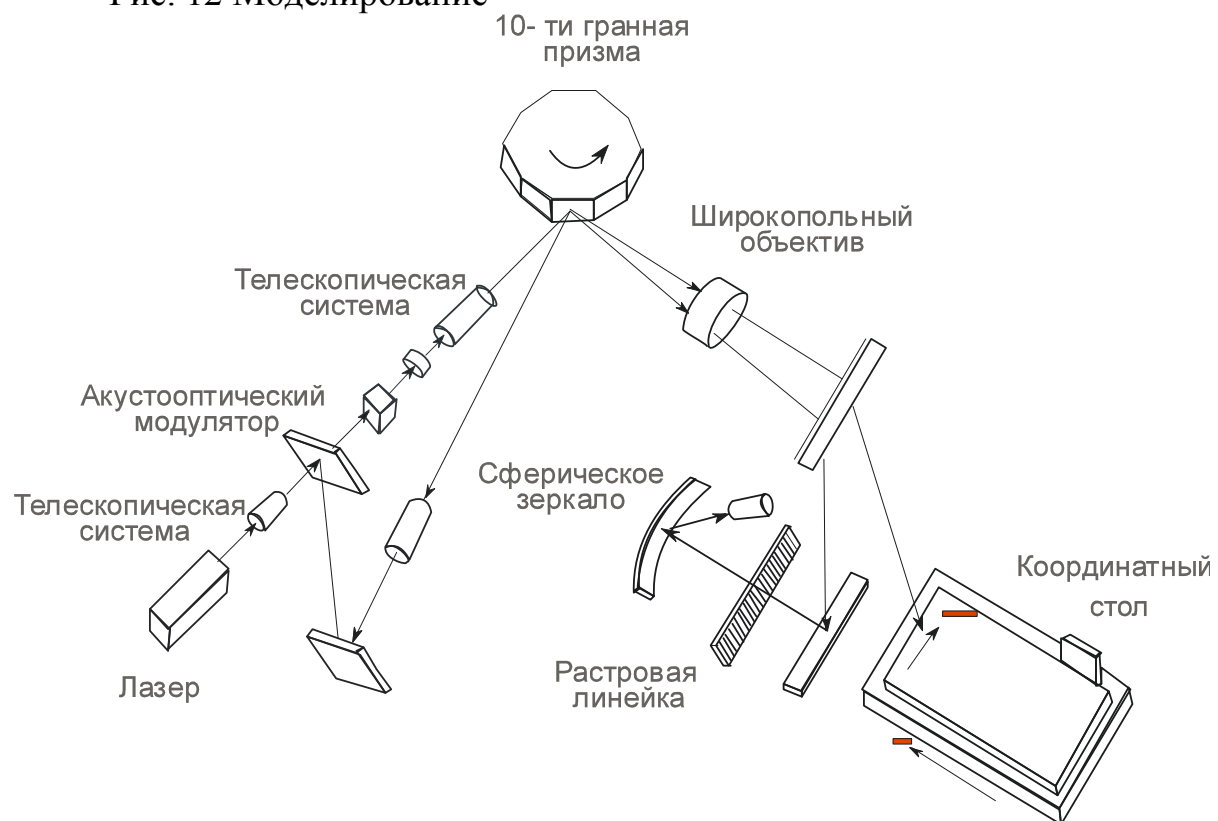


Рис. 13. Оптическая схема ЭМ-5139



Сканирующий крупноформатный лазерный генератор изображений предназначен для изготовления фотошаблонов плат печатного монтажа.

Технические характеристики

Размеры рабочего поля	600 x 700 мм
Размер светового пятна	25 - 12,5 мкм
Адресная сетка	12,5 6,25 мкм
Мин. размер экспонируемой линии	50 мкм
Отклонение размеров экспонируемых элементов	не более ± 10 мкм
Неровность края элементов:	
при адресной сетке 12,5 мкм	не более 10 мкм
при адресной сетке 6,25 мкм	не более 5 мкм
Случайная составляющая	3s погрешности рисунка
расположения элементов	
топологии фотошаблона на рабочем поле	не более ± 15 мкм
Время экспонирования фотошаблона размером 600 x 700 мм:	
при дискрете 12,5 мкм	8 мин.
при дискрете 6,25 мкм	32 мин.

Рис. 14 Внешний вид и технические характеристики ЭМ-5139

**Таблица сравнения лазерного генератора ЭМ-5139
с зарубежным аналогом LPG-2001 фирма Excellen Automation**

Техническая характеристика	ЭМ-5139	LPG-2001 фирма Excellen Automation
Размер рабочего поля, мм	600×700	450×600
Погрешность нанесения элементов топологии на рабочем поле, мкм	±15	±25
Минимальный размер экспонируемой линии, мкм	50	-
Отклонение размеров экспонируемых элементов от номинального значения, мкм	±10	-
Время изготовления фотошаблона размером 550×550 мм	6	6
с дискретностью 25 мкм	14	
с дискретностью 12,5 мкм		

Рис. 15. Таблица сравнения ЭМ-5139 с зарубежным аналогом.

1.5. Лазерный генератор изображений оригиналов топологий масок кинескопов ЭМ-5059.

Лазерный генератор изображений для изготовления оригиналов топологий масок кинескопов (ЭМ-5059) работает по принципу экспонирования единичных элементов топологии по заданной программе, считываемой с магнитных носителей информации (контурно - проекционный способ построения изображений).

Генератор состоит из функциональных частей: ЭВМ, устройства параллельного обмена; системы коррекции погрешностей; устройства преобразования информации; системы формирования элемента; координатно-измерительной системы; системы экспонирования; системы фокусировки; тактирующего устройства; системы электропитания.

В оптической системе использован импульсный азотный лазер с $\lambda=337$ нм, она построена с использованием контурно-проекционного способа формирования изображений (рис.16).

Применение твёрдокаменных пород для базовых деталей координатного стола, использование измерительной системы на базе лазерных интерферометров, применение лазерного источника энергии, а также диафрагмы, позволяющей изменять размер элемента на величину 0,0625 мкм, позволило создать генератор обеспечивающий высокие технические характеристики фотошаблонов теневого масок кинескопов. Внешний вид установки приведён на рисунке 17.

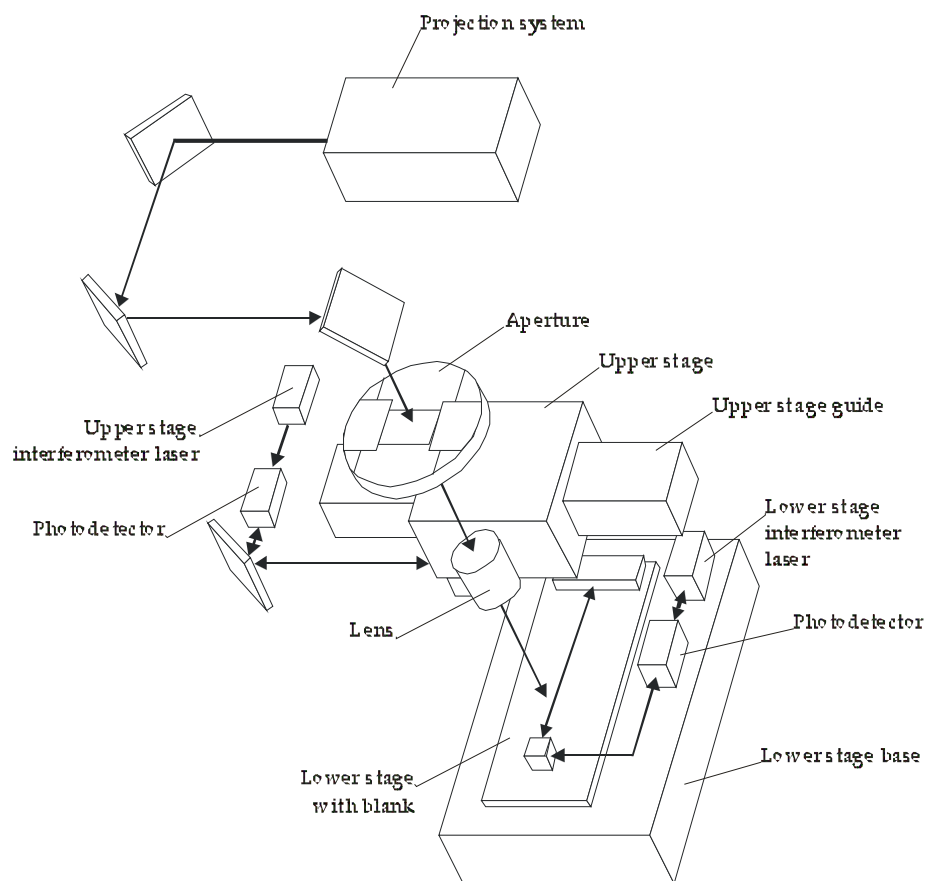


Рис.16. Оптическая схема ЭМ-5059



Лазерный генератор изображений предназначен для изготовления крупноформатных фотошаблонов теневых масок кинескопов телевидения высокой четкости (ТВЧ)

Технические характеристики

Производительность	(на	регулярных	структурах)
с шагом не более 500 мкм		0,8 млн. Экспоз/ч	
Размер рабочего поля		900 x 600 мм	
Скорость перемещения стола по координатам X и Y		128 мм/с	
Дискретность задания перемещений координатного стола		0.25 мкм	
Дискретность изменения размера изображения		0,0625 мкм	
Размеры наборных элементов		10 - 500 мкм	

Рис.17 Внешний вид и технические характеристики ЭМ-5059

**Таблица сравнения лазерного генератора ЭМ-5059
с зарубежным аналогом LRS-600 фирма Micronise Швеция**

Технические характеристики	ЭМ-5059	LRS-600 фирма Micronise Швеция
Рабочее поле, мм	600 x 900	594 x 594
Погрешность расположения элементов, мкм	± 5	
Дискретность задания координат элементов, мкм	0,25	0,1
Размер элемента:	10	4
минимальный, мкм		
максимальный:	1000 x 400	
на эмульсии	300 x 300	
на фоторезисте	0,0625	
Дискретность задания размера элемента, мкм		
Производительность:	$1,4 \times 10^6$	800
эксп/час		
мм ² /мин		

Рис. 8. Таблица сравнения ЭМ-5059 с зарубежным аналогом.

2. Лазерное технологическое оборудование

для формирования топологического рисунка на полупроводниковой пластине

В настоящее время большинство изготовителей СБИС в мире применяют на операциях фотолитографии мультипликаторы (степперы) с дуговыми лампами в качестве источников света, используя g- и i-линии их спектра (соответственно, 436 и 365 нм), причем применение g-линии снижается и вытесняется i-линией, которая способна обеспечить топологическую норму 0,35 - 0,5 мкм.

В производственных линиях мировых производителей ИС для экспонирования критических слоев уже началось использование и ГУФ - мультипликаторов с эксимерными KrF и ArF лазерами в качестве источников света с длинами волн глубокого ультрафиолета.

Такое оборудование производится компаниями Nikon, ASM Lithography и Canon, обладающими технологией производства высокоапертурной дифракционно ограниченной проекционной оптики (апертура до 0,63), специальных стекол и точной механики, благодаря чему они практически монополизировали мировой рынок фотолитографического оборудования (поставщиком оптики для нидерландской ASM Lithography является германская Carl Zeiss). Проекционные объективы современных мультипликаторов - это сложное громоздкое изделие весом в сотни килограмм, производство и эксплуатация которых требуют значительных затрат. Дальнейшее увеличение числовой апертуры и рабочего поля приводит к еще большему повышению требований к применяемым в объективах материалам, к точности изготовления линз, к качеству сборки и контролю выходных параметров объективов. Число линз в таких объективах достигает до 30, поэтому реальные выходные параметры объектива могут сильно отличаться от расчетных из-за сложения всех погрешностей материалов и изготовления. Необходимость повышения разрешения приводят к использованию коротковолновых лазерных источников, таких как эксимерные лазеры и гармоники лазера на АИГ.

Первые лазерные мультипликаторы в бывшем СССР появились в середине 80-х годов. В качестве источника УФ-излучения использовалась четвертая гармоника АИГ-лазера (266 нм), и в результате достигнуто разрешение в микроизображении 0,35 мкм.

Автоматическая лазерная установка совмещения, мультипликации и фотомонтажа ЭМ-5004 предназначена для совмещения и помодульного экспонирования полупроводниковых пластин в производстве БИС и СБИС.

В основе работы лежит способ последовательного переноса (мультипликации) уменьшенного изображения промежуточного фотооригинала (ПФО) на пред-

варительно совмещенную и сфокусированную с плоскостью изображения ПФО полупроводниковую пластину.

Для формирования на пластине модуля больших размеров производится фотомонтаж. Для этого ПФО и пластина одновременно перемещаются, совмещаются, и экспонируется соседний кадр. Размер модуля на полупроводниковой пластине ограничивается только размером изображения модуля на ПФО. Возможен фотомонтаж модуля на пластине с нескольких ПФО, помещенных на координатный стол ПФО.

В последующие годы был создан ряд мультипликаторов с большей производительностью и увеличенными рабочими полями. Использовалось излучение как четвертой гармоники АИГ-лазера, так и эксимерного KrF-лазера. В настоящее время в разработке мультипликаторы, позволяющие формировать микроизображения на кремниевых пластинах с минимальными элементами 0,35 и 0,25 мкм. В таблице приведены технические характеристики отечественных и зарубежных мультипликаторов.

Сравнительная таблица технических характеристик отечественных и зарубежных мультипликаторов.

Наименование параметра	ЭМ-5004	ЭМ-5184Э	ЭМ-5284Э	ЭМ-5584 (раз-раб.)	ЭМ-5684 (раз-раб.)	Nikon NSR-2205 EX14 C	Canon FPA-3000 EX4
Рабочая длина волны (нм)	266	266	248	266	248	248	248
Масштаб проекционного уменьшения	10:1	5:1	5:1	5:1	5:1	5:1	5:1
Рабочее поле, мм	5 x 5	10x 10	10 x 10	20 x 20	20 x 22	22 x 22	22 x 22
Рабочее поле при фотомонтаже, мм	30 x 10	20 x 20	20 x 20	—	—	—	—
Размер минимального элемента, мкм	0,5	0,5	0,5	0,35	0,25	0,25	0,25
Погрешность совмещения,							

мкм	0,1	0,1	0,1	0,05	0,04	0,04	0,035
Диаметр обрабатываемых пластин, мм	150	150	150	200	200	200	200
Производительность, пл/час	20	40	40	70	70	85	73

Проблемы формирования топологического рисунка на полупроводниковых пластинах решаются также без применения фотошаблонов и проекционной печати непосредственным экспонированием лазерным лучом.

Многоканальный лазерный генератор изображений ЭМ-5299А

Многоканальный лазерный генератор изображений ЭМ-5299А – представитель нового поколения сканирующих многоканальных лазерных генераторов изображения (ГИ), предназначенных для прямой генерации изображений на полупроводниковую пластину без ограничения на размер ЧИПа.

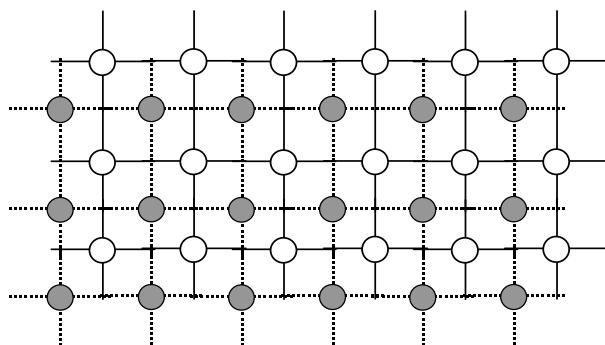
ЭМ-5299А идеально подходит для быстрого производства изделий. Высокая производительность, оптическая обработка резиста вносят свой вклад в уменьшение времени от получения данных до изготовления пластины. Отсутствие необходимости изготовления шаблонов сокращает время от разработки проекта до реализации изделия и существенно уменьшает затраты.

ГИ идеально подходит для изготовления мелкосерийной партии изделий.

ГИ позволяет использовать любой резист чувствительный в области $\lambda=350-370\text{нм}$.

Особенности генератора изображений:

Усовершенствованная печать с вложенной сеткой и управлением уровнями интенсивности лазерного пятна;



оригинальный способ формирования эталонного изображения;

электрооптическая система управления лазерным излучением;

координатный стол на магнито-воздушной подушке с использованием линейных шаговых двигателей и лазерных интерферометров.

Качество печати

	В однопроходно м режиме	В двухпроходно м режиме
Производительность для пла- стин диаметром 100мм.	2пластины/час	1пластины/ч ас
Размер области экспонирования	215×215мм ²	215×215мм ²
Погрешность совмещения	50нм	50нм
Размер минимального элемента	0.6мкм	0.6мкм
Неровность края	45нм.	30нм.
Погрешность размера	60нм.	40нм.
Воспроизводимость размеров	45нм	30нм

В качестве рабочего лазера используется ионный криптоновый лазер непрерывного действия с длиной волны $\lambda=351\text{нм}$. Угловой уход луча лазера контролируется датчиком положения луча и корректируется зеркалом с пьезоприводом. Механический затвор перекрывает луч при загрузке пластины, фокусировании и перемещениях стола, не предназначенных для экспонирования. Луч разделяется на 16 пучков одинаковой интенсивности, которые в дальнейшем преобразуются в 16 линейно-поляризованных параллельных пучков и входят в электрооптический затвор.

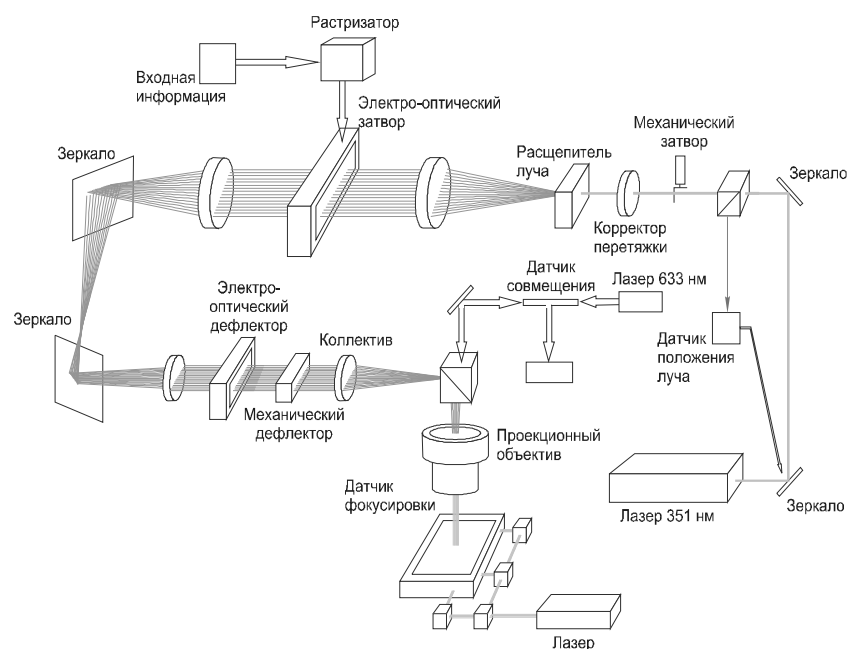
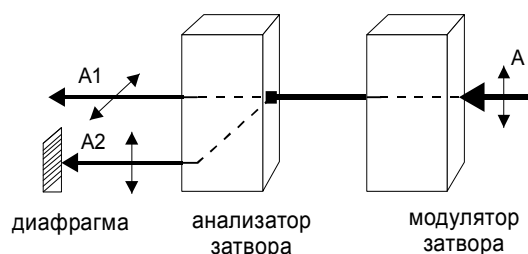
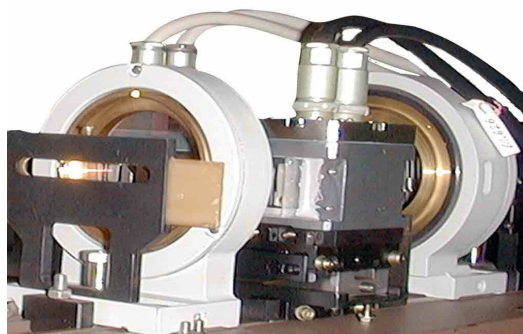


Схема оптической системы генератора

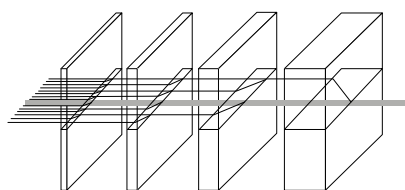
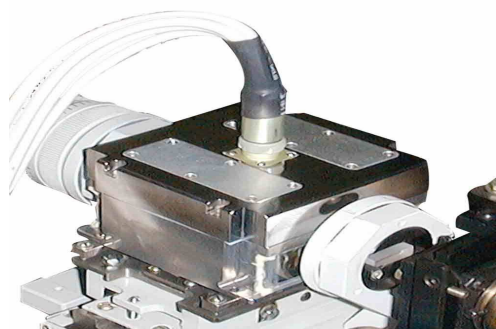
Электрооптический затвор на основании растрового описания полосы, поступающего с блока формирования эталонного изображения, осуществляет модуляцию интенсивности каждого пучка независимо друг от друга. Модуляция заключается в том, что плоскость поляризации каждого входящего луча (луч А) поворачивается электрооптическим модулятором на угол, величина которого зависит от величины управляющего напряжения. Проходя через анализатор затвора, луч разделяется на два ортогонально поляризованных луча А1 и А2, один из которых (А2) задерживается диафрагмой. Энергия вышедшего из анализатора луча А1 зависит от величины напряжения, приложенного к затвору, и управляется на основе информации, поступающей с блока формирования эталонного изображения. Это позволяет оперативно управлять интенсивностью пятна.



Принцип работы
электрооптического затвора

Электрооптический затвор

Далее 16 лучей поступают на 4-х каскадный электрооптический дефлектор. 1-ый каскад отклоняет 16 лучей на 2,4мкм, 2-ой - на 1,2мкм, 3-ий - на 0,6мкм и 4-ый - на 0,3мкм. Отклонение производится в направлении, перпендикулярном перемещению стола. Таким образом образуется столбец, состоящий из 256 пятен различной интенсивности, которые синтезируют изображение. По сканируемой координате развертка производится столом, перемещающимся со скоростью до 130 мм/с.



Принцип работы
электрооптического дефлектора

Электрооптический дефлектор

Положение стола определяется лазерным интерферометром. Цена младшего разряда при измерении координат - 5 нм. Отклонение по удерживаемой координате компенсируется с помощью механического дефлектора.

3. Лазерное технологическое оборудование для прецизионной размерной обработки

В середине 70^{ых} годов в результате научно-технического сотрудничества специального Конструкторского бюро точного машиностроения (г. Минск), НИИ «Полус» (г. Москва), НИИМЭ г. Зеленоград) были созданы первые лазерные скрайберы ЭМ-210 и ЭМ-220 для разделения кремниевых пластин. Использовались квазиимпульсные АИГ-лазеры.

В настоящее время в концерне «Планар» созданы современные универсальные установки для лазерного разделения различных материалов, а также для лазерного сверления твердых и сверх твердых материалов.

УСТАНОВКА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ЭМ-250

Установка предназначена для разделения материалов, размерной обработки, вырезки по заданному контуру произвольных фигур в пластинах алюмино-керамики, кремния и других материалов, используемых в микроэлектронике, приборостроении и других областях.

Принцип работы установки основан на использовании таких свойств твердотельного лазера, как высокая направленность и большая импульсная мощность. При воздействии сфокусированного лазерного излучения с плотностью мощности порядка 10^8 Вт/см² происходит испарение материала, поглощающего излучение с длиной волны 1,06 мкм. В сочетании с программно-управляемым перемещением обрабатываемой пластины по координатам X,Y,Z происходит формирование реза по траектории воздействия лазерного луча.

В качестве рабочего инструмента в установке используется твердотельный YAG-лазер модели RL-30Q с акустооптической модуляцией добротности, работающий в режиме TEM₀₀. Блок питания и охлаждения лазера содержит систему выбора и стабилизации температуры охлаждающей воды, что позволяет поддерживать высокую стабильность уровня средней мощности лазерного излучения.

Наличие блокировок по значениям минимального потока охлаждающей воды и максимальной температуре позволяет повысить надежность и долговечность лазера.

В установке использован линейно-шаговый привод с обратной связью,

позволяющий достичь высокой прецизионности обработки при скорости линейных перемещений до 300 мм/с с неравномерностью скорости не более 5%. Отсутствие трения в приводе обеспечивает высокую долговечность и исключает необходимость регулировки в процессе эксплуатации.

Управление установкой осуществляется при помощи персонального компьютера IBM PC. Создание рабочей программы производится как с использованием собственного графического редактора, так и редактора AUTOCAD. Использование компьютера позволяет автоматически производить выбор оптимального алгоритма движения привода и управления акустооптическим затвором лазера в зависимости от толщины обрабатываемого материала, формы и размеров контура лазерной обработки.

Изображение обрабатываемого объекта посредством телевизионной системы выводится на дисплей компьютера. Это позволяет совмещать контур реза с изображением объекта. Во время лазерной обработки на дисплее компьютера отображаются текущие режимы и технологическая модель процесса обработки.

Толщина обрабатываемых подложек до 2мм.



Технические характеристики

Лазер

Тип Q switched, Nd:YAG, ламповая накачка

Мода TEM00

Длина волны 1064 нм

Средняя мощность 15 Вт @ 3 кГц

Длительность импульса ~85нс@3 кГц

Частота следования импульсов 1-25 кГц

Позиционер

Поле обработки 150 × 150 мм

Точность ±15 мкм

Разрешение 2 мкм

Ближайший из зарубежных аналогов – установка фирмы РНО-ТОМАШИНІG (США) имеет идентичные параметры.

УСТАНОВКА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ЭМ-270

Установка предназначено для формирования профильных каналов в твердых и сверхтвердых материалах, таких как природный и синтетический алмазы, рубин, твердые сплавы, алюмооксидная керамика и т.п. Используя настоящую технологию, профильные каналы (или отверстия), отвечающие строгим требованиям по геометрии и чистоте стенок, выполняются в одном, полностью автоматизированном цикле лазерной обработки, при котором нет необходимости переустанавливать обрабатываемую деталь.

Технологические возможности установки перекрывают диапазон диаметров промышленных алмазных волок диаметров от 0,1 мм до 5 мм. Достижимая точность обработки 2% от диаметра фильеры.

Установка может быть использована также для ремонта фильер (расточки профильного канала), обработки изделий по внутренним и внешним контурам. В последней модели установки ЭМ-270М предусмотрена возможность проведения операции лазерной маркировки поверхности оправы фильеры путем программируемого перемещения ее относительно неподвижного лазерного луча. Логотип маркировки формируется при помощи собственного редактора или редактора AUTOCAD.

В установке использован шаговый пяти-координатный привод, позволяющий достичь высокой прецизионности обработки. Система управления установки базируется на IBM PC Pentium. Создание рабочей программы производится с использованием собственного графического редактора. Совмещенные лазерный и TV-каналы позволяют получить на экране SVGA монитора «живое» видеоизображение объекта для ориентации заготовки, последующего контроля качества обработки и диаметра полученного отверстия.

Информации о зарубежном серийном оборудовании не имеется. Извест-

ный аналог – экспериментальная установка D-3507A Laser Systems AG, Switzerland.



Технические характеристики:

Лазер

YAG:Nd, Q-switch

Длина волны

1.064 мкм

Средняя мощность излучения

25 Ватт TEM00

Частота следования лазерных импульсов от 1 кГц до 25 кГц

Привод

Пятикоординатный шаговый с обратной связью по положению, управляемый IBM PC Pentium

4. Фотоэлектрические системы контроля

Высокие требования прецизионности в микроэлектронике приводят к необходимости использования в оптико-механическом и контрольно-измерительном оборудовании различных лазерных сенсоров и измерительных систем. Так, для контроля координатных перемещений объекта используются

лазерные интерферометры на основе одно- и двухчастотных стабилизированных гелий-неоновых лазеров. В датчиках фокусировки и совмещения применяются полупроводниковые лазеры различных типов.

Лазерные измерительные системы построены на использовании явлений интерференции и дифракции излучения газовых и твердотельных чип-лазеров.

4.1. Установка автоматического контроля привносимых дефектов на полупроводниковых пластинах представлена ЭМ-6479 на рис. ____.



Технические характеристики

Диаметр обрабатываемых пластин, мм 150, 200

Минимальный размер обнаруживаемого дефекта, мкм 0,15

Вероятность обнаружения минимального элемента 0,95

Производительность, пластин/час 100

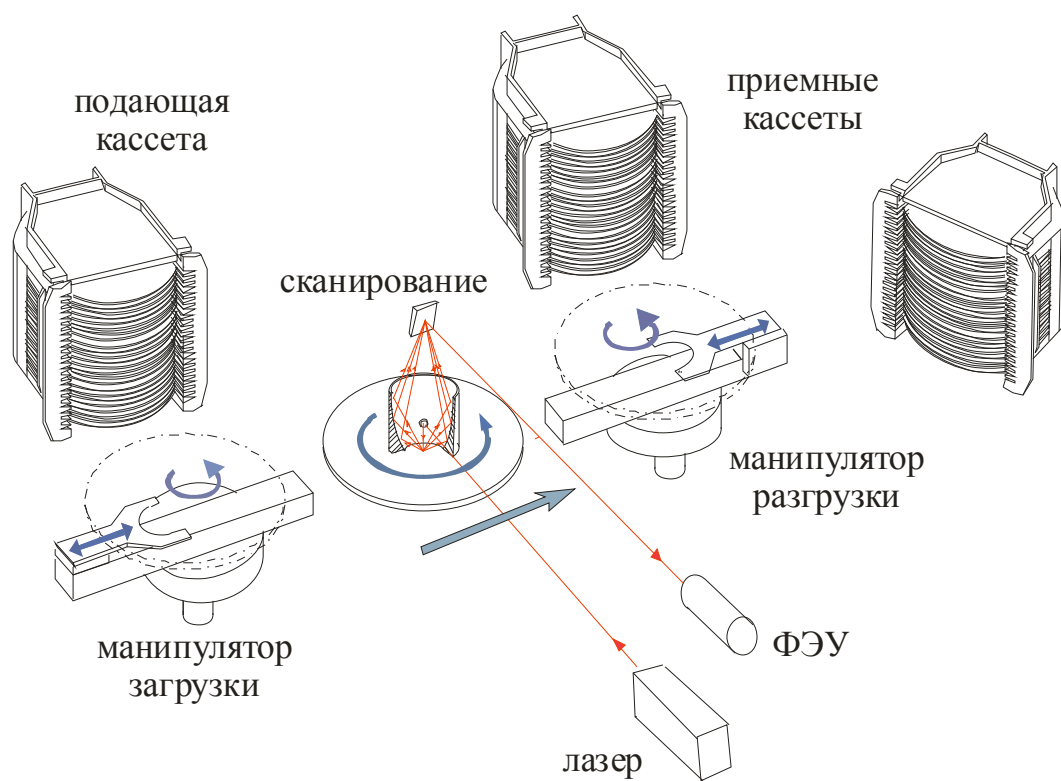


Схема работы установки

4.2. Установка контроля профиля полупроводниковых структур ЭМ-6159 представлена на рис. 20.



Технические характеристики.

Диаметр контролируемых полупроводниковых пластин, мм 100 и 150

Невоспроизводимость позиционирования координатного стола, не более ± 4 мкм

Кинематическая производительность установки

без учета времени контроля п/п структур, не менее 120 пл./час

Увеличение (видимое) визуального канала микроскопа 125X; 250X; 500X; 1000X

Разрешающая способность визуального канала

на максимальном увеличении по полю зрения, не более 0,25 мкм

Разрешающая способность оптоэлектронного канала на максимальном увеличении:

по полю зрения, не более 0,20 мкм,

по профилю микрорельефа, не более 0,005 мкм.

Контролируемые перепады высот микрорельефа топологии от 0,05 мкм до 2,0 мкм.

Оборудование успешно эксплуатируется в странах ближнего и дальнего зарубежья

4. Комплект специального технологического оборудования для бездефектного производства оригиналов топологии СБИС.

В работе представлено решение комплексной проблемы разработки комплекта оборудования для бездефектного изготовления оригиналов топологии, а также промежуточных и рабочих фотошаблонов СБИС. Как показано на рис.1, без учёта техно-химических процессов, этот комплекс включает следующие три составные части (рассматриваемое в разделе оборудование окрашено голубым цветом):

- лазерный генератор изображений;
- установку автоматического контроля топологии фотошаблонов;
- установку ремонта топологии фотошаблонов.

Комплексный подход к проектированию оборудования позволяет получить некоторые преимущества, изложенные ниже. Соответственно, в работе освещены следующие основные вопросы:

- (1) преимущества комплексной разработки спецтехнологического оборудования;
- (2) практическая реализация этих преимуществ в специальном технологическом оборудовании, разработанном предприятием «КБТЭМ-ОМО» концерна «Планар».

(1) Что касается комплексного подхода к разработке спецтехнологического оборудования, то следует отметить, в первую очередь, технические, но также и экономические аспекты проблемы.

Преимущества комплексного подхода к проектированию подобного оборудования состоят в следующем:

1. Обеспечивается возможность получения более полной совместимости координатных систем установок комплекса. Эта совместимость достигается за счёт применения однотипных интерферометров, а также за счёт реализации аналогичных алгоритмов управления перемещениями координатного стола. Как показано на рис.2, все три установки построены по единой системе на базе линейных шаговых двигателей. В цепи обратной связи применяются однотипные интерферометрические датчики линейных перемещений, построенные на базе двухчастотных лазеров. Всё это позволяет при автоматическом контроле топологии существенно сократить количество ложных ошибок, возникающих за счёт отклонения траекторий перемещений координатных столов генератора изображений и установки автоматического контроля топологии и, тем самым,

повысить достоверность контроля.

2. Обеспечивается возможность реализации единых подходов к построению алгоритмов компенсации погрешностей координатной системы. К ним относятся компенсация погрешностей, связанных с изменениями окружающей среды, с локальными неравномерностями шаблонов, с разбросом параметров при изготовлении составных частей координатных систем. Рис. 3 показывает, что при помощи единого подхода к построению систем компенсации погрешностей можно получить более высокие точности при отработке перемещений.

3. Возможность создания единой системы преобразования проектных данных для генератора изображений и установки автоматического контроля топологии. Эта система включает в себя также единую подсистему введения технологических припусков на размеры элементов топологии. Совместимость по проектным данным между генераторами изображений, с одной стороны, и установкой автоматического контроля топологии, с другой стороны, реализуется не только на уровне форматов данных, но и на уровне внутренних алгоритмов обработки. Это касается, например, алгоритмов округления координат элементов, алгоритмов формирования огибающих контуров и т.д.

На рис. 4, например, показана двухкоординатная бинарная модель изображения из которой легко видно, что при формировании диагонального размера возможны ситуации при которых переход от векторного к растровому представлению происходит неоднозначно. Комплексный подход позволяет исключить подобные ситуации. Поставляемые комплектно генератор изображений и установка автоматического контроля топологии оснащаются однотипными системами векторно-растрового преобразования, что позволяет однозначно производить переход от абстрактных координат системы проектирования к представлению площадных объектов в оборудовании.

4. Возможность гибкого проведения изменений форматов данных о дефектах для установок автоматического контроля и ремонта фотошаблонов, в частности совместимость по форматам ведомости дефектов и возможность представления координат дефектов с единой точкой отсчёта.

5. Возможность разработки систем управления на единой элементной базе (рис.5). Для всех трёх установок используется большое количество идентичных компонентов, в частности:

- модули усилителей мощности приводов;
- модули управления координатной системой;
- датчики;
- интерферометры;
- модули формирования эталонного изображения;

- фрагменты программного обеспечения;
- комплекты принадлежностей и запасных частей.

6. Возможность разработки общих интерфейсов и библиотек программного обеспечения.

7. Снижение себестоимости разработки и изготовления оборудования вследствие унификации систем управления и программного обеспечения, а также отдельных узлов оптико-механических устройств (рис.6).

8. Упрощение технического обслуживания установок вследствие:

- построения единой системы телетестирования для всего оборудования;
- формирования единого группового комплекта запасных частей и принадлежностей;
- упрощения процесса обучения и сокращения численности обслуживающего персонала;
- уменьшения числа поставщиков, что упрощает решение всего комплекса задач по заключению контрактов, адаптации оборудования, сопровождению и т.д.

(2) В качестве примеров реализации комплексного подхода к проектированию хотелось бы представить следующие комплексы оборудования:

- многоканальный растровый (или одноканальный фотонаборный) лазерный генератор изображений ЭМ-5089Б (ЭМ-5189) (рис.7), в котором реализован принцип растрового сканирования;
- одноканальный лазерный генератор изображений ЭМ-5109 (рис.11), в котором реализован принцип микрофотонабора;
- установка автоматического контроля топологии фотошаблонов ЭМ-6029Б (ЭМ-6329) (рис. 8), в которой реализован метод сравнения с проектными данными (Die-to-Database);
- установка ремонта топологии фотошаблонов ЭМ-5001Б (рис. 9), в которой реализовано не только испарение лишних элементов изображения, но и также лазерно-стимулированное осаждение металлоорганического вещества из газовой фазы.

Далее приводится краткое описание и концепция построения для каждой из установок комплекта в отдельности. Для каждой установки приводится информация по совместимости, а также преимущества, достигнутые за счёт комплексного подхода. Как уже упоминалось, генераторы изображений представлены тремя различными моделями. Это многоканальные растровые лазерные

генераторы ЭМ-5089Б и ЭМ-5189 (рис.7), а также более простой и дешевый одноканальный микрофотонаборный генератор ЭМ-5109 (рис.11).

Установка автоматического контроля топологии фотошаблонов также представлена двумя различными моделями - ЭМ-6329 – с размером пиксела 0,25мкм и ЭМ-6029Б – с размером пиксела 0,5мкм. ЭМ-6329 предназначена для поставок с генератором изображений ЭМ-5189, а ЭМ-6029Б – с генераторами ЭМ-5109 и ЭМ-5089Б.

Установка ремонта фотошаблонов представлена моделью ЭМ-5001Б, которая может устранять не только прозрачные, но и непрозрачные дефекты.

Многоканальный лазерный генератор изображений ЭМ-5089В.

Размер минимального элемента составляет 800нм.

Совмещаемость комплекта шаблонов составляет 100нм

Точность размера 40нм

Неравномерность размера 40нм

Нелинейность размера 40нм

Цена младшего разряда при задании координаты перемещения 5нм

Минимальный шаг перемещения координатного стола 10нм

Производительность

Время обработки рабочего поля 100х100мм составляет 50мин.

Форматы проектных данных

Генератор поддерживает следующие форматы проектных данных Source, MUL, PAT, GDS-II. По отдельному заказу возможна поддержка формата DXF и других.

Характеристики фотошаблонов заготовок

Линейные размеры фотошаблонов – 4“ х 4“, 5“ х 5“, 6“ х 6“, 7“ х 7“.

Толщина фотошаблонов – до 6.35 мм.

Многоканальный лазерный генератор изображений ЭМ-5189.

Размер минимального элемента составляет 500нм.

Совмещаемость комплекта шаблонов составляет 50нм

Точность размера 30нм

Неравномерность размера 30нм

Нелинейность размера 30нм

Цена младшего разряда при задании координаты перемещения 2нм

Минимальный шаг перемещения координатного стола 5нм

Производительность

Время обработки рабочего поля 100х100мм составляет 40мин.

Форматы проектных данных

Генератор поддерживает следующие форматы проектных данных – Source, MUL, PAT, GDS-II. По отдельному заказу возможна поддержка формата DXF и других.

Характеристики фотошаблонных заготовок

Линейные размеры фотошаблонов – 4“ х 4“, 5“ х 5“, 6“ х 6“, 7“ х 7“.

Толщина фотошаблонов – до 6.35 мм.

Лазерный генератор изображений ЭМ-5109.

Размер минимального элемента составляет 1000нм.

Совместимость комплекта шаблонов составляет 250нм

Точность размера 100нм

Точность поворота диафрагмы составляет 1°

Цена младшего разряда при задании координаты перемещения составляет 30nm.

Производительность

Генератор обеспечивает производительность 1700000 вспышек в секунду.

Форматы проектных данных

Генератор поддерживает следующие форматы проектных данных – 5009BM, 5109, 3600F, Source, MUL, PAT, GDS-II, DXF. По отдельному заказу возможна поддержка других форматов.

Характеристики фотошаблонных заготовок

Линейные размеры фотошаблонов – 4“ х 4“, 5“ х 5“, 6“ х 6“, 7“ х 7“.

Толщина фотошаблонов – до 6.35 мм.

Установка автоматического контроля фотошаблонов ЭМ-6029В.

Установка автоматического контроля топологии EM-6029B обеспечивает автоматическое распознавание и классификацию 44 типов дефектов топологических структур, согласно классификации SEMI, на оригиналах топологии (мастер-шаблонах), на промежуточных фотооригиналах, а также на рабочих шаблонах. Технические характеристики этой установки приведены ниже. Размер минимального обнаруживаемого дефекта составляет 500нм.

Ошибка позиционирования координатного стола составляет 150нм.

Цена младшего разряда при задании координаты конечной точки при перемещении составляет 10нм.

Коррекция размеров элемента в проектных данных может составлять ± 0.1 , ± 0.2 , ± 0.3 , ± 0.4 , ± 0.5 мкм.

Порог фильтрации для всех типов дефектов может составлять 0.5, 1.0, 1.5, ... 5.0 мкм.

Имеется возможность оперативной смены порога обнаружения установки с увеличением производительности в диапазоне 0.5, 1.0 мкм.

Производительность

Время контроля фотошаблона с рабочим полем 100x100мм составляет 35-70 мин.

Форматы проектных данных

Установка может быть укомплектована комплектом постпроцессоров для

преобразования проектных данных из форматов – Source, 5109, 5089B, 5189, 3600F, ZBA, GDS-II. По заказу установка может быть укомплектована постпроцессором из формата DXF или любого другого заданного формата САПР.

Характеристики контролируемых фотошаблонов

Типы покрытий фотошаблонов – хром, окись хрома, окись железа.

Линейные размеры фотошаблонов – 4“ х 4“, 5“ х 5“, 6“ х 6“, 7“ х 7“.

Толщина фотошаблонов – до 6.35 мм.

Установка автоматического контроля фотошаблонов ЭМ-6329.

Установка автоматического контроля топологии EM-6329 обеспечивает автоматическое распознавание и классификацию 46 типов дефектов топологических структур, согласно классификации SEMI, на оригиналах топологии (мастер-шаблонах), на промежуточных фотооригиналах, а также на рабочих шаблонах. Технические характеристики этой установки приведены ниже. Размер минимального обнаруживаемого дефекта составляет 250нм.

Ошибка позиционирования координатного стола составляет 70нм.

Цена младшего разряда при задании координаты конечной точки при перемещении составляет 5нм.

Минимальный шаг координатной сетки при описании топологии 5нм.

Порог фильтрации для всех типов дефектов может составлять 0.25, 0.50, 0.75..., 2,50мкм.

Минимальный контраст устойчиво обнаруживаемых полутоновых дефектов топологии 20%.

Имеется возможность оперативной смены порога обнаружения установки с увеличением производительности в диапазоне 0.25, 0.50мкм.

Коррекция размеров элемента в проектных данных может составлять ± 0.05 , ± 0.10 , ± 0.15 , ± 0.20 , ± 0.25 мкм.

Производительность

Время контроля фотошаблона с рабочим полем 100x100мм составляет 40мин.

Форматы проектных данных

Установка может быть укомплектована постпроцессорами для преобразования проектных данных из форматов – Source, 5109, 5089B, 5189, 3600F, ZBA, GDS-II. По заказу установка может быть укомплектована постпроцессором из формата DXF или любого другого заданного формата САПР.

Характеристики контролируемых фотошаблонов

Типы покрытий фотошаблонов – хром, окись хрома.

Линейные размеры фотошаблонов – 4“ х 4“, 5“ х 5“, 6“ х 6“, 7“ х 7“.

Толщина фотошаблонов – до 6.35 мм.

Установка ремонта топологии фотошаблонов ЭМ-5001Б.

Минимальная величина ретушируемого прозрачного дефекта составляет

500нм.

Минимальная величина испаряемого непрозрачного дефекта составляет 500нм.

Ошибка позиционирования составляет 100нм.

Установка ЭМ-5001Б оснащена двумя лазерами – непрерывный аргоновый лазер используется для ретуши, а импульсный лазер – для испарения хрома.

Цена младшего разряда при отработке перемещения координатным столом 10нм.

Характеристики ремонтируемых фотошаблонов

Типы покрытий фотошаблонов – хром, окись хрома.

Линейные размеры фотошаблонов – 4“ х 4“, 5“ х 5“, 6“ х 6“, 7“ х 7“.

Толщина фотошаблонов – до 6.35 мм.