

УДК 537.533

## **Конструктивные особенности комплекса оборудования для прецизионной электронной микролитографии**

*Б. Н. Васичев*

Московский государственный институт электроники и математики (Технический университет),  
Москва, Россия

*Рассмотрены комплексный подход и конструктивные решения комплексов оборудования для электронной микролитографии при массовом производстве интегральных схем с минимальными размерами элементов топологии до 0,1 мкм и пути одночипового производства заказных больших интегральных схем и микроЭВМ.*

Микроэлектроника и, в частности, электронная литография и ионно-плазменные процессы создали условия для развития нового направления в электронной и ионной оптике, осуществляющего преобразование информации машинного проектирования в изображения топологических слоев с линейными размерами, близкими к физическому пределу миниатюризации интегральных схем (ИС) и больших интегральных схем (БИС).

В этой связи рассмотрим особенности комплекса оборудования для электронной литографии, формирующего изображения топологических слоев ИС при их массовом изготовлении, и перспективы создания оборудования для изготовления одночиповых заказных БИС.

Уровень развития электронно- и ионно-лучевого оборудования, от технологического до оборудования для научных исследований, находится в прямой зависимости от уровня развития теории точности проектирования, изготовления и сборки этого оборудования, физических основ и принципов проектирования сложного и наукоемкого оборудования и, в частности, эмиссионных систем, физики движения заряженных частиц в неоднородных электромагнитных полях и в пространстве, где такие поля отсутствуют, физике сложных по структуре полей, технической реализации элементов эмиссион-

ных систем, электронных линз и других электронно- и ионно-оптических элементов, электронных систем высокостабильных питающих устройств, систем компьютерного и аппаратного управления и контроля, вакуумных систем и элементов точной механики, используемых в этих устройствах, т. е. от комплексного подхода к проблеме создания прецизионного вакуумного электрофизического оборудования.

Основным элементом любой электронно-лучевой установки, предназначенной для выполнения операций экспонирования рисунков топологических слоев ИС в технологическом процессе электронной литографии, является электронно-оптическая система (ЭОС). Именно с ее помощью формируется рабочий инструмент (пучок заряженных частиц) с программно-осуществляемыми изменениями его технологических (энергетических, геометрических и точностных) параметров.

Первые образцы электронных литографов были созданы в конце 70-х годов двадцатого столетия в США, СССР, Англии, Франции, ФРГ и ГДР, Японии.

В создании ЭОС электронных литографов в дальнейшем образовалось два технических направления. Первое — связано с созданием ЭОС с малым полем обработки (до  $2 \times 2$  мм) и круглым сечением пучка и координатным столом, работающем в старт-стопном режиме.

Для увеличения площади экспонирования стали использовать координатные столы, работающие в режиме сканирования. Малые размеры поля электронного сканирования позволили повысить разрешающую способность установок. Такие ЭОС относительно просты, при этом относительно высокая производительность обеспечивается за счет последовательного сканирования координатного стола, например по строке X. Совмещение рисунка топологии на соседних полосах в пределах одного технологического слоя обеспечивается прецизионной измерительной системой на основе фотоэлектронных датчиков положения стола, а позже — лазерного интерферометра. Однако точность такого способа формирования рисунка оказалась недостаточной при переходе к субмикронной технологии.

Второе, поистине революционное, техническое направление связано с созданием ЭОС с прямоугольным сечением пучка и полем отклонения  $1,6 \times 1,6$  мм при разрешении  $0,2$  мкм. Первые образцы электронных литографов с прямоугольным размером сечения пучка были созданы фирмой Karl Zeiss Jena в ГДР (после объединения Германии переименованной в JENOPTIK Raith; примером установки этого типа является электронный литограф ZBA 31/32), затем фирмами IBM (США), НИИ ТМ (СССР), НИИ ЭИО (СССР) и позже рядом других фирм. Конструкция ЭОС литографа этого типа относительно сложна. Она позволяет набирать рисунок из штампов разной конфигурации и размера, что значительно повысило производительность оборудования и его технологические возможности. Ионно-лучевые установки пока находятся в стадии разработки в научных лабораториях.

### **Концепция комплекса оборудования для микролитографии "КЭЛИТ"**

Комплекс оборудования для электронной микролитографии "КЭЛИТ", созданный в НИИ электронной и ионной оптики, объединяет общей идеологией: электронный прецизионный литограф ПЭЛ-1, автоматизированный перегрузчик пластин АПП-1, герметичный модуль ГМ-1 для внутрицеховой

транспортировки пластин, электронный измерительный микроскоп РЭМ-1, электронорезист ЭР-1, специализированное математическое обеспечение, специальный комплект тест-объектов для аттестации ПЭЛ-1 и РЭМ-И, установка УНР для нанесения на пластины электронорезиста ЭР-1 методом пульверизации, установка (УПР) проявления электронорезиста ЭР-1, методом подогрева, ионно-плазменная установка (УУР) для удаления электронорезиста ЭР-1, линии связи, интерфейсы и управляющие комплексом вычислительные машины типа "Электроника-100-25", впоследствии замененные на персональные компьютеры фирмы IBM.

Основные технические требования, предъявляемые к такого рода оборудованию массового производства изделий при высокой степени интеграции элементов, заключаются в следующем: высокая информативность синтезируемого изображения; производительность и надежность при низком уровне привносимой дефектности резисторных слоев.

Высокая информативность изображения достигается при совместном выполнении следующих требований: высокая разрешающая способность, большое поле экспонирования, высокая точность экспонирования рисунка топологического слоя. Последняя, в свою очередь, достигается при высокой точности позиционирования пучка, высокой точности позиционирования координатного стола, высокой точности совмещения экспонируемого топологического слоя с другими слоями ИС, которые в свою очередь зависят от высокой стабильности источников питания, высокой надежности систем управления, высокой точности контроля за технологическими операциями литографа (контроля за положением стола, пучка, токов и напряжений в цепях элементов ЭОС и определения положения меток совмещения), высокой стабильности температурного режима элементов установки, высокой виброзащиты установки от внешних источников вибраций, высокой защиты установки от внешних источников электромагнитных излучений, низкой привносимой дефектности экспонируемых пластин.

Высокая производительность достигается при высокой интенсивности пучка, большом быстродействии ЭВМ, ЦАП и отклоняющих пучок систем (ОС), большой скорости перемещения координатного стола, оптимальной траектории движения стола, быстродействии систем совмещения, быстродействии датчика перемещения стола, быстрой работе перегрузчика в шлюзовом устройстве, быстрой вакуумной откачке шлюза, высокой чувствительности электронорезиста, оптимальной схемы экспонирования (движения пучка), отношения экспонируемой части чипа к неэкспонируемой, высокий процент выхода годных без дополнительной ретуши. Надежность зависит от надежности конструктивных элементов установки.

Перечисленные требования были реализованы при разработке комплекса оборудования для электронной литографии, включая прецизионные электронные литографы типа ПЭЛ-1.

Мы не будем останавливаться на всех вышеперечисленных требованиях к комплексу, эксплуатируемому с 1980 г., а лишь рассмотрим наиболее важные технические решения комплекса в целом и способы их достижения. Эксплуатация комплекса позволила накопить большой практический материал, который может лечь в основу создания комплексов для изготовления заказных одночиповых СБИС на современном уровне.

Блок-схема комплекса для электронной литографии "КЭЛИТ" представлена на рис. 1. Основное отличие данного комплекса оборудования от набора подобных агрегатов заключается в том, что ПЭЛ-1 и РЭМ-И объединены одним алгоритмом программного обеспечения, заключающимся в том, что



Эти результаты обрабатываются и автоматически передаются в ЭВМ-1 для коррекции экспонируемого рисунка. Этот способ контроля позволяет корректировать: ошибки экспонирования, ошибки за счет неправильного машинного проектирования рисунка, приводящего к проявлению эффекта близкодействия двух и более элементов рисунка, режимы технологии проявления, травления и других; ПЭЛ-1 и РЭМ-И объединены одним типом кассет, в которых закрепляются полупроводниковые или стеклянные пластины разных размеров (номиналов) и находятся в них, пока пластины обрабатываются в комплексе. ПЭЛ-1 и РЭМ-И объединены проблемно-ориентированным герметичным модулем (интерфейсом) для транспортировки пластин в обеспыленной среде, как внутри комплекса, так и для связи комплекса с другим оборудованием; ПЭЛ-1 и РЭМ-И объединены специализированным автоматизированным перегрузчиком пластин из кассет в стандартные для данного производства приемники пластин в обеспыленной среде и обратно, исключая из этой операции человека с его ошибками.

В комплексе "КЭЛИТ" предусмотрена обратная связь между РЭМ-И и ПЭЛ-1, позволяющая исправлять технологические и технические ошибки при изготовлении ИС путем непосредственного введения данных об ошибках в программу экспонирования. Комплекс "КЭЛИТ", в состав которого, кроме перечисленных устройств, входят устройства (модули), предназначенные для использования сухого высокочувствительного электронорезиста с высокой разрешающей способностью, специально разработанного, позволяющие освоить сухой метод нанесения, проявления и удаления резиста.

#### **Основные технические параметры комплекса**

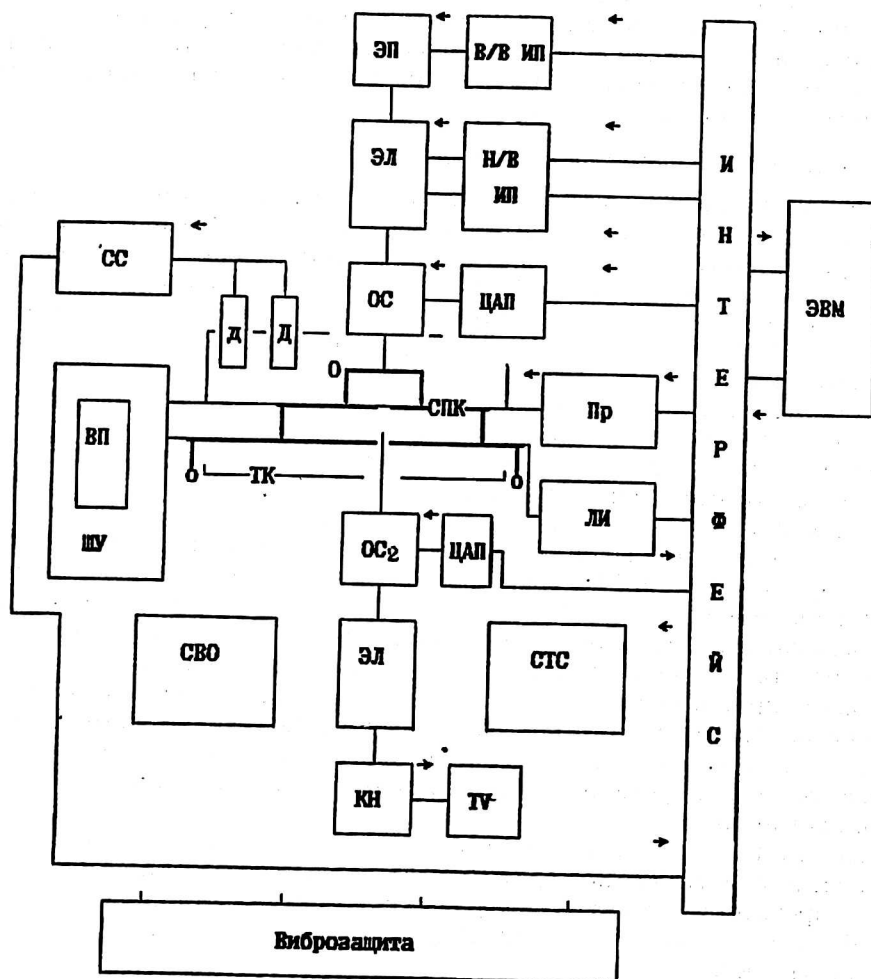
Комплекс "КЭЛИТ" можно охарактеризовать следующими основными показателями качества: минимальный размер экспонируемого элемента диаметром 0,2 мкм и прямоугольного размером 0,2×0,2 мкм при среднеквадратичной ошибке воспроизведения размера 0,05 мкм; дискретность перемещения пучка по полю экспонирования 0,01÷0,1 мкм; неровность края изображения — не хуже 0,1 мкм; максимальный размер поля экспонирования пучком при неподвижном координатном столе 6,3×6,3 мм; размер пластин до 100 мм в диаметре (100×100 мм — для стеклянных пластин); максимальная частота отклонения пучка и бланкирования — 20 МГц; ошибка совмещения двух изображений ± 0,1 мкм; скорость перемещения координатного стола при непрерывном движении 40 мм/с; скорость перемещения стола (в старто-стопном режиме) из одного положения в другое ± 0,3 мкм; дискретность перемещения координатного стола ± 1,0 мкм; дискретность отсчета лазерного интерферометра по каждой из осей X и Y — 0,05 мкм; стабильность питающих устройств  $1 \cdot 10^{-5}$  за 16 ч; ускоряющее напряжение: ПЭЛ-1 — 15, 20, 25 кВ, РЭМ-И — 10, 20, 30 кВ; осуществляется автоматическая коррекция ошибок технологических процессов посредством обратной связи от РЭМ-И; погрешность измерения — не более ± 0,05 мкм при измерении размеров элементов топологии в диапазоне 0,1—100 мкм, а в диапазоне 100 мкм÷100 мм погрешность измерения ширины линии — не более ± 0,1 мкм; возможен визуальный контроль поверхности изделия с разрешением 0,001 мкм и увеличением 25÷40 000 крат.

Осуществляется бездефектная автоматическая перегрузка пластин из кассет комплекса на стандартные приемники данного технологического процесса, а также осуществляется бездефектная транспортировка пластин в герметичном модуле.

Производительность зависит от ряда параметров: процента заполнения пластины рисунком топологических слоев, минимальных размеров элементов топологии, относительного количества площади, занятой минимальными элементами топологии, к общей площади рисунка, чувствительности электронорезиста и ряда других факторов.

**Установка ПЭЛ-1**

На рис. 2 представлена блок-схема электронно-лучевой установки ПЭЛ-1 [1].



**Рис. 2. Блок-схема электронно-лучевой установки ПЭЛ-1:**

ЭП — электронная пушка; В/В ИП — высоковольтный источник питания пушки; ЭЛ — электронные линзы колонны; Н/В ИП — низковольтные источники питания; СС — система совмещения; Д, д — детекторы вторичных и отраженных электронов; ОС, ОС<sub>2</sub> — отклоняющие системы; ЦАП — цифроаналоговые преобразователи; О — объект; СПК — стол прецизионный координатный; ТК — технологическая камера; Пр — электропривод; ЛИ — лазерный интерферометр; ВП — вакуумный перегрузчик пластин; ШУ — шлюзовое устройство; КН — камера наблюдения; ТВ — телевизионная система; СВО — система вакуумной откачки; СТС — система температурной стабилизации элементов комплекса; о — шариковые опоры вне технологической камеры

Электронно-оптическая система, формирующая технологический инструмент в виде электронного пучка с переменным сечением и формой, состоит из двух самостоятельных по назначению частей, связанных технологической камерой. Первая ее часть (ЭП, ЭЛ, ОС) формирует и позиционирует рабочий пучок. Вторая состоит из ОС, ЭЛ, КН, TV и осуществляет визуализацию увеличенного изображения сечения пучка, находящегося в плоскости экспонирования. Между объективами той и другой части колонны располагается экспонируемая пластина. Два идентичных объектива могут создавать в промежутке между ними конфокальное поле.

В этом же промежутке симметрично размещено два идентичных сцинтилляционных детектора вторичных электронов с цилиндрическими электронными линзами и электродами, создающими вытягивающие поля. Эти поля взаимно компенсируются в области поля сканирования пучка. На торцевой стороне объектива зондовой ЭОС прикреплены четыре полупроводниковых детектора отраженных электронов.

### *Унифицированная технологическая камера*

Технологические камеры, используемые в комплексе, имеют прямоугольную форму и выполнены из магнитно-мягкой стали. Верхняя часть камеры имеет ребра жесткости, и на одной из них установлена электронно-оптическая колонна установки ПЭЛ-1, а на другой — электронно-оптическая колонна установки РЭМ-И. Внутри камер размещены двухкоординатные столы СПК-3, детекторы вторичных и отраженных электронов. Лазерный луч лазерного интерферометра входит в камеру через специальное окно. Штанга с экспонируемой пластиной входит в камеру через окно с тыльной стороны. Вакуумный ввод возвратно-поступательного движения осуществляется через крестообразную сильфонную группу больших диаметров (до 110 мм) с компенсаторами атмосферного давления.

К боковой стенке камеры крепится автоматизированное шлюзовое устройство с автономной откачкой и контролем за остаточным давлением, связанным с управляющей ЭВМ. В шлюзе смонтирован автоматизированный вакуумный перегрузчик, осуществляющий перегрузку пластин из кассеты в шлюзе на координатный стол и обратно. Емкость кассеты 20 пластин. После завершения работы с одной из пластин подается команда на швартовку стола к шлюзовому приемнику, т. е. в положение перегрузки, и перегрузка автоматически осуществляется. ЭВМ получает информацию об остаточном давлении в шлюзе, о ходе перегрузки пластин, о количестве пластин в накопителе, о количестве экспонированных пластин и о готовности установки к новому экспонированию.

В камеру ПЭЛ-1 может подаваться высокое напряжение на специальный электрод, размещенный под срезом объектива. Поле с отрицательным потенциалом препятствует выходу электронов из пластины, что приводит к снижению фоновой засветки резиста и уменьшению эффекта близкодействия (эффект близости).

К нижней части камеры ПЭЛ-1 прикреплена электронно-оптическая система, обеспечивающая наблюдение формы пучка при юстировке установки. Имеются также вводы вакуум-подводов для откачки камеры и контроля за остаточным давлением в ней.

Камера опирается на платформу, связанную с пассивной системой виброзащиты установки.

### *Унифицированный координатный стол*

Координатные столы СПК-3, используемые в комплексе, также унифицированы. Опоры координатного стола с лазерным интерферометром и преоб-

разователем фазы в код (ПФК) размещены вне технологической камеры и опираются на массивную платформу, связанную с пассивной системой виброзащиты установки, на которую опирается и технологическая камера, а через нее и электронно-оптические системы ПЭЛ-1. Таким образом, положение экспонируемой пластины определяется только допусками на изготовление и сборку узла технологической камеры и координатного стола.

Экспонируемая пластина в специально сконструированной кассете размещается на держателе, который с помощью жесткой штанги и через вакуумную сильфонную развязку соединена с координатным столом. Опоры подвижных кареток стола разнесены достаточно далеко друг от друга (более 1 м) для того, чтобы принцип Аббе выполнялся наилучшим образом для пластины.

Между пластиной и держателем находится платформа, обеспечивающая разворот пластины на  $360^\circ$  при ее автоматическом совмещении с осями сканирования пучка. Разворот пластины осуществляет специально разработанный пьезопривод. На этом же держателе размещаются специальные метки и тест-объекты, позволяющие автоматически контролировать и регулировать параметры электронного пучка во время работы установки.

Координатный стол состоит из двух кареток, перемещающихся во взаимно перпендикулярных направлениях по осям  $X$  и  $Y$ . Ход по каждой из осей составляет 100 мм. Координатный стол осуществляет перемещение экспонируемых пластин по оптимизированной траектории или по задаваемой с ЭВМ программе вдоль осей  $X$  и  $Y$  со скоростью 40 мм/с в "старт-стопном" режиме. Привод стола осуществляется с помощью электродвигателей постоянного тока со следящим приводом. Передача движения осуществляется посредством шариковинтовой пары. Погрешность позиционирования стола  $\pm 1$  мкм.

Контроль за перемещением стола выполняет двухкоординатный лазерный интерферометр. Дискретность отсчета составляет 0,05 мкм. Информация с лазерного интерферометра поступает на ЭВМ для коррекции координат позиционирования рабочего пучка электронов в ПЭЛ-1. Идентичный лазерный интерферометр использован и в установке для контроля за технологическим процессом РЭМ-И.

Более подробно лазерный интерферометр описан в работе [2].

### *Электронно-оптическая система установки ПЭЛ-1*

Электронно-оптическая колонна установки ПЭЛ-1 представлена на рис. 3, а. Она состоит из электронной пушки или эмиссионной системы (генератора электронов); двух согласующих линз 1 и 2, осуществляющих согласование параметров источника электронов с генератором формы пучка; генератора формы пучка, состоящего из линзы 3, двух уголковых (или специальной формы) диафрагм Д3 и Д4 и отклоняющей системы ОСГФ; электронно-оптической системы регулирования силы тока пучка, состоящей из линзы 4 и апертурной диафрагмы; бланкирующей системы, состоящей из отклоняющей системы (ОСБ) и диафрагмы-ширмы; двух проекционных линз 5 и 6; объектива (линзы) 7.

Функциональное назначение ЭОС состоит в том, что она позволяет выполнять все необходимые электронно-оптические операции: создание прямоугольного сечения пучка с изменяемой геометрией (со сторонами прямоугольника по осям  $X$  и  $Y$  от 0,1 до 10 мкм); создание и фокусировку гауссова пятна с разным диаметром сечения (от 30,0 нм до 10 мкм); ориентацию изображения фигурной диафрагмы относительно положения мишени; ориентацию направления растра вдоль направления движения координатного стола; запираение и отпираение электронного пучка с минимальными искажениями

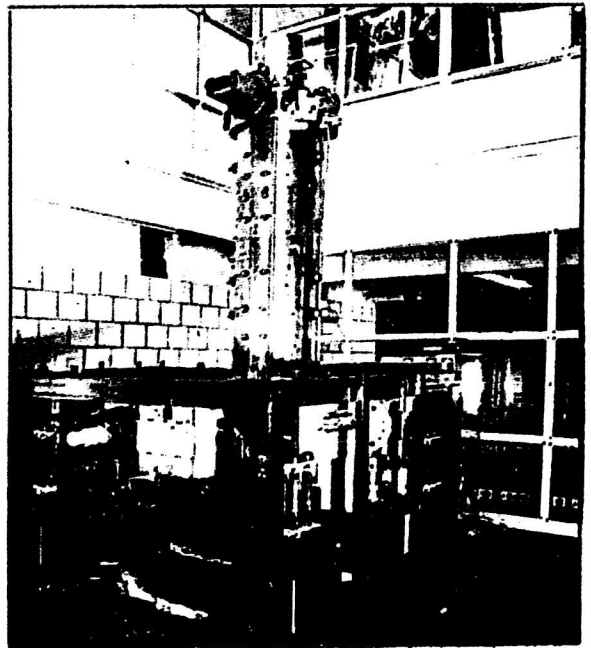
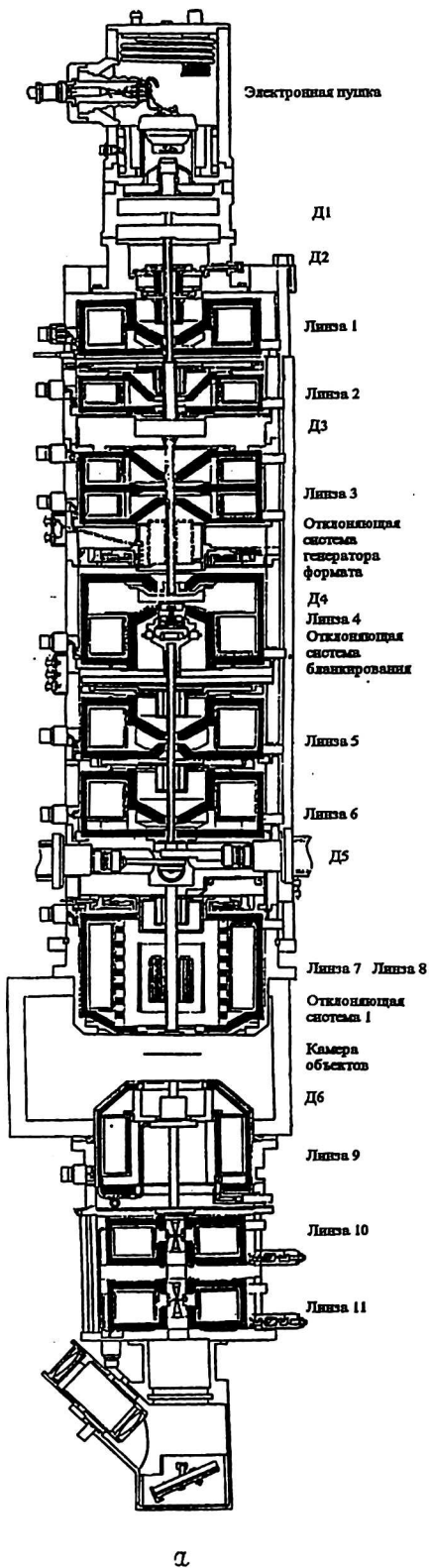


Рис. 3. Разрез электроно-оптической колонны установки ПЭЛ-1 (а); внешний вид установки ПЭЛ-1 (б)

последнего (бланкирование); формирование рисунка топологических слоев ИС методом анизотропной развертки (векторного отклонения пучка); юстировку и коррекцию параметров пучка; экспонирование; совмещение координат полупроводниковой пластины, имеющей специальные метки совмещения, с координатами ЭОС и координатного стола, путем введения необходимых поправок в систему управления пучком в автоматическом режиме; коррекцию пространственного положения электронного пучка по сигналам от лазерного интерферометра, осуществляющего слежение за перемещениями координатного стола; коррекцию aberrаций отклонения и фокусировки электронного пучка в динамическом режиме.

Все эти и другие операции учитывают и исключают ошибки совмещения за счет разворота изображения магнитными линзами. Иными словами, ЭОС сконструирована так, что подфокусировка объектива не вызывает ни поворота раstra, ни поворота изображения прямоугольного сечения пучка — штампа. Не происходит и расфокусировки объектива при установке направления растривания пучка или при развороте штампа. Предусмотрена коррекция полей рассеяния, предотвращающая влияние гистерезиса магнитных материалов на параметры пучка и его положение.

Здесь мы сталкиваемся с проблемами, которые не возникали в растровой электронной микроскопии и тем более в просвечивающей электронной микроскопии, где из-за круглого сечения пучка и разворот изображения, если он не стигматичен, не имеет большого значения, а разворот раstra и всей картинки в целом может оказаться существенным лишь в тех редких случаях, когда производятся какие-либо измерения на изображениях, как например, измерение линейных размеров на щелевидных и других структурах, например в специализированном растровом электронном микроскопе РЭМ-И [2].

Разработка ЭОС ПЭЛ-1 велась с учетом того, чтобы ее можно было использовать в двух режимах работы: с круглым сечением пучка при гауссовом распределении плотности тока и с программируемыми формой и размером сечения пучка при равномерном распределении плотности тока.

Эмиссионная система представляет собой трехэлектродную электронную пушку с прямоканальным катодом. В качестве источника электронов используется острый катод прямоканального типа, *V*-образной формы с нагреванием только острого конца, выполненный из монокристалла гексаборида лантана ( $\text{LaB}_6$ ). Это позволило получить точечный источник, существенно повысить электронную яркость и снизить мощность накала катода по сравнению с другими известными пушками такого типа. В пушке предусмотрена стабилизация теплового режима ее конструкции [3], что позволило устранить тепловые дрейфы, а специальная схема питания накала катода позволила стабилизировать температуру кончика катода и увеличить срок его службы.

Эти технические мероприятия позволили, во-первых, исключить изменение установленных зазоров между электродами, что неизбежно происходит при изменении режима работы пушки и приводит к неучитываемому изменению электронно-оптических характеристик электронной пушки, таких как электронная яркость, положение кроссовера на оси, размера сечения кроссовера, а во-вторых, позволило устранить изменение температуры катода, воз-

никающее за счет испарения материала и утонения катода, а следовательно, эмиссионной способности и долговечности катода. Этими важными свойствами пушек обычно пренебрегают, что допускалось, например, в установках для сварки материалов или электронных микроскопах, и оказывается совершенно недопустимым в прецизионных технологических установках для микролитографии.

Эмиссионная система электронной пушки, используемая в установке ПЭЛ-1, имеет следующие показатели качества: ускоряющее напряжение — 15, 20, 25 кВ; электронная яркость  $5 \cdot 10^{-6}$  А/(см<sup>2</sup>·ср); полный ток эмиссии с катода — до 1 мА; мощность накала катода 7 Вт; температура катода  $1500 \pm 30$  °С; срок службы катода не менее 350 ч; рабочее давление  $1 \cdot 10^{-7}$  Па.

Для формирования однородной плотности тока в пучке на мишени прежде всего необходимо обеспечить определенную однородность потока электронов, падающих на диафрагму Д2. Линза 1 увеличивает изображение источника электронов, благодаря чему на диафрагму попадает не весь пучок, а только его центральная часть. Разместив линзу 1 на расстоянии от источника электронов, равном 100 мм, получили однородность плотности потока электронов после диафрагмы, не выходящую за рамки 97 % на краях. Кроме того, линза 1 играет не менее важную роль в операции сопряжения положения источника электронов с плоскостью предмета линзы 2. Она позволяет заменить операцию точной установки кончика катода и его последующую юстировку операцией изменения оптической силы линзы.

В целях расширения функциональных возможностей ЭОС предусмотрено компенсирование изменения электронно-оптических параметров электронной пушки. Это достигается благодаря включению в схему ЭОС линз 1 и 2. Наличие этих линз позволяет точно совмещать изображение источника с центром отклонения пучка в генераторе формата и обеспечивать равномерное освещение диафрагмы Д3.

Линза 1 имеет фокусное расстояние  $f_1 = 36,7$  мм при магнитодвижущей силе катушки возбуждения  $NI = 650$  А·В. Эта линза в 5 раз уменьшает изображение источника электронов и, соответственно, в 5 раз увеличивает апертуру пучка. Расстояние между фокусом линзы 1 и диафрагмой Д3 выбрано из конструктивных соображений равным 100 мм. Линза 2 обеспечивает регулирование плотности тока пучка.

Проекционная система состоит из объектива 7, двух проекционных линз 5 и 6 и управляющей линзы 4 и служит для создания уменьшенного изображения фигурной (угловой) диафрагмы Д4 на пластине. Диафрагма Д4 помещена в центре немагнитного зазора линзы 4. Линзы 5 и 6 создают уменьшенное изображение этой диафрагмы, а объектив 7 переносит это изображение на пластину. В канале этой линзы (объектива) размещены две быстродействующие системы отклонения пучка, стигматор и системы для коррекции аберраций отклонения ОС<sub>1</sub>.

Для достижения равномерной плотности тока в изображении диафрагм и обеспечения максимального тока в пучке в схему введена так называемая управляющая линза 4.

При формировании пучка с изменяемой геометрией сечения в плоскостности экспонирования используют диафрагмы с фигурными отверстиями. ЭОС также должна иметь апертурную диафрагму, ограничивающую апертуру пучка для уменьшения aberrаций до приемлемых значений. Если не принять специальных мер, то фигурная и апертурная диафрагмы будут виньетировать друг друга, что приведет к резкому изменению плотности тока в пределах сечения пучка.

Известны две системы освещения, устраняющие виньетирование диафрагм. Это схема "критического" освещения и схема освещения по Келеру.

В схеме "критического" освещения конденсорная линза формирует увеличенное изображение источника в плоскости фигурной диафрагмы, а объективная линза отображает фигурную диафрагму в плоскость мишени. В схеме Келера объектив создает изображение фигурной диафрагмы на мишени, а конденсор образует увеличенное изображение источника электронов на плоскости апертурной диафрагмы. В установке ПЭЛ-1 предпочтение отдано схеме освещения по Келеру, позволившей уменьшить габаритные размеры ЭОС.

Линза б проецирует изображение диафрагмы Д4 в центр объективной линзы, благодаря чему обеспечивается исключение эффекта взаимного виньетирования диафрагм Д1 и Д4.

Формирование пучка прямоугольного сечения с минимальными искажениями формы сечения, с высокой резкостью и ровностью края — сложная техническая задача. При наложении изображения одной половины диафрагмы (угловой) на другую между диафрагмами может быть зазор, который является причиной расфокусировки одной из половинок изображения диафрагмы. Необходимая резкость края пучка может быть реализована путем использования линз, переносящих изображение одной диафрагмы на другую, и отклоняющей системы, смещающей указанное изображение относительно второй диафрагмы (генератор формата).

Изготовление дифрагм влечет за собой образование микронеровностей на кромках. Поэтому диафрагмы изготовлялись методом давления из меди и молибдена с помощью специального инструмента с последующей тщательной доводкой. Такие диафрагмы выдерживают большие тепловые нагрузки и являются хорошим проводником. Если использовать диафрагму с большим отверстием и затем уменьшить ее изображение, то можно добиться еще более высокой ровности края (у одной половины) штампа. Однако из-за относительно большого размера фигурных диафрагм полевые aberrации системы переноса изображения существенно влияют на форму пучка. Кроме того, при работе генератора формы, как правило, изменяется угол выхода пучка после второй диафрагмы. Это нарушает юстировку пучка относительно последующих линз ЭОС и приводит к изменению положения пучка на объекте при изменении его размеров и формы.

Размер отверстия фигурной диафрагмы Д4 равен 2×2 мм, размер второй фигурной диафрагмы Д3 равен 4×4 мм. Большой размер этих диафрагм позволяет не только добиваться проецирования больших фрагментов, но и снижает требования к неровности края диафрагм и их долговечности из-за снижения тепловой нагрузки на столь ответственный в формировании края рисунок — рабочую кромку диафрагмы.

Отклоняющая система генератора формата пучка расположена между линзами 3 и 4, отклоняющие системы бланкирования расположены вслед за линзой 4.

Линза 4 характеризуется следующими параметрами: фокусное расстояние  $f_4 = 71$  мм; магнитодвижущая сила, создаваемая обмоткой линзы  $NI = 854$  А·В; увеличение  $M = 2,5x$ ; предметная плоскость совмещена с плоскостью источника электронов; плоскость первичного изображения (предмета) расположена перед линзой 5, а плоскость вторичного изображения (изображения) — в плоскости апертурной диафрагмы Д1.

Изменением возбуждения в одной лишь линзе Л4 можно обеспечить переход к любому из основных режимов работы ЭОС: режим формирования прямоугольного пучка, режим формирования пучка с гауссовым распределением плотности тока и программируемым диаметром, режим формирования пучка диаметром 30,0 нм. При этом бланкирование пучка может осуществляться одной и той же бланкирующей системой, размещенной после линзы Л4. В режиме формирования пучка круглого сечения требуется введение диафрагмы с отверстием около 50 мкм в плоскость размещения диафрагмы Д3.

Для минимизации полевых аберраций целесообразно выполнить генератор формы пучка в виде системы, содержащей две одинаковые конфокальные линзы с противоположным направлением токов и двухкоординатную отклоняющую систему между ними [4]. При этом диафрагмы размещаются в фокальных плоскостях указанных линз. Увеличение такой системы  $M = -1$ , угол поворота изображения равен нулю. Размещение отклоняющей системы в фокусе второй линзы обеспечивает неизменность угла выхода пучка при изменении его размеров и формы. Кроме того, при освещении генератора формы параллельным пучком в центре отклоняющей системы находится кроссовер, что является оптимальным для уменьшения аберраций отклонения.

Основной особенностью конфокальной двухлинзовой системы с увеличением, равным единице, в идеальном случае является отсутствие дисторсии и комы.

Двухъярусные отклоняющие системы, выполняющие роль систем удержания электронного пучка на оптической оси (системы юстировки) расположены в промежутке между электронной пушкой и линзой 1, между линзами 1 и 2 и перед линзами 5 и 6.

Параметры линзы 6 имеют следующие значения: магнитодвижущая сила  $NI = 1100$  А·В (при ускоряющем напряжении 25 кВ); фокусное расстояние  $f_{k1} = 16,7$  мм; увеличение  $M_{k1} = 0,125x$ .

Пучок, выходящий из линзы 6, ограничивается апертурной диафрагмой Д1 с диаметром отверстия  $d_1 = 0,12$  мм при апертуре объектива  $\gamma = 5 \cdot 10^{-3}$  рад и  $d_1 = 0,15$  мм при апертуре  $\gamma = 6,25 \cdot 10^{-3}$  рад. Диаметр канала (полюсного наконечника) равен 20 мм. Предметом линзы 5 служит квадратное отверстие 2x2 мм в диафрагме Д4. Линза проецирует изображение этого отверстия с увеличением  $M_{k2} = 0,0288$  на предметную плоскость линзы 6. Фокусное расстояние линзы 5 равно  $f_{k2} = 7,2$  мм при магнитодвижущей силе  $NI = 2135$  А·В. Диаметр канала (полюсного наконечника) равен 19,5 мм.

Выбранный режим работы линзы 5 характеризуется тем, что поворот изображения диафрагмы Д4, вызываемый изменением тока в обмотке, происхо-

дит практически без изменения увеличения. В этом режиме работы обеспечивается минимальная расфокусировка изображения. Так, при повороте изображения диафрагмы Д4 на  $1^\circ$  расфокусировка системы из-за смещения главной плоскости линзы 6 приводит к расфокусировке этой линзы  $\Delta f = 1 \cdot 10^{-2}$  мм, что приводит к размыванию изображения только на 1,5 нм. Одновременно линза 5 вместе с линзой 4 формирует промежуточное изображение источника с увеличением  $M = 41$  в плоскости апертурной диафрагмы.

Объективная система является наиболее сложным электронно-оптическим узлом в ЭОС, который должен осуществлять процесс формирования рисунка на большой площади. Диаметр и длина магнитного зазора в таком объективе должны быть достаточно велики и существенно больше, чем соответствующие размеры в традиционно используемых линзах.

Поля высокочастотных отклоняющих систем, расположенных в канале линзы, скомпенсированы специальными катушками, создающими поля в противофазе основной ОС и препятствующими наведению "паразитных" высокочастотных магнитных полей, дестабилизирующих распределение магнитного поля и, следовательно, заданное пространственное положение электронного пучка из-за неизбежного влияния гистерезиса магнитных свойств материала магнитопровода линзы.

Для окончательного исключения влияния переменного поля предусмотрено программируемое управление переменным магнитным полем, возбуждаемым отклоняющими системами. Программа обеспечивает формирование поля отклоняющих систем таким образом, чтобы "работа" магнитопровода всегда осуществлялась в пределах одной и той же петли гистерезиса магнитопровода. Этот подход позволил свести неучтенные ошибки отклонения пучка к нулю по всему полю сканирования (экспонирования).

Параметры объектива ПЭЛ-1 имеют следующие значения: фокусное расстояние  $f_1 = 10,4$  см; положение фокальной плоскости  $Z_1 = 7,2$  см; положение предметной плоскости  $Z_a = 24$  см от центра объектива; увеличение  $M_0 = 0,614$ ; коэффициенты центральных аберраций — сферической и хроматической — равны  $C_{сф} = 19,2$  см,  $C_{хр} = 15,6$  см, соответственно; максимальная магнитодвижущая сила катушки возбуждения  $NI = 1738$  А·В (при ускоряющем напряжении 25 кВ); угол разворота раstra в объективе  $\Theta = 1,02$  рад, если центр отклонения находится на оптической оси объектива; диаметр канала объектива равен 120 мм при длине 180 мм.

При апертуре объектива  $\gamma = 6,25 \cdot 10^{-3}$  рад поперечные аберрации имеют следующие величины  $\delta r_{сф} = 0,006$  мм,  $\delta r_{хр} = 0,05$  мм. При этом хроматическая аберрация оценена с учетом эффекта Бёрша, приводящего к разбросу по энергии электронов в 2,5 В при ускоряющем напряжении 25 кВ.

При яркости источника электронов  $\beta_0 = 3 \cdot 10^5$  А/(см<sup>2</sup>·ср) ток в пучке квадратного сечения размером 10x10 мкм равен 36 мкА.

Система бланкирования расположена в районе диафрагмы Д4. Угол бланкирования пучка  $\alpha_\sigma$  связан с углом отклонения пучка около мишени  $\gamma_\sigma$  для данной схемы соотношением  $\alpha_\sigma = \gamma_\sigma m$ , где  $m$  — увеличение линзы. Положение центра бланкирования смещено вдоль оптической оси относительно плоскости, сопряженной с мишенью, на величину  $\Delta f_\sigma$ , связанную с дефоку-

сировкой в плоскости мишени  $\Delta f_m$  соотношением  $\Delta f_\sigma = \Delta f_m/m^2$ . Следовательно, для величины  $\Delta f_\sigma$  можно записать соотношение  $\Delta f_\sigma = \Delta r_\sigma/\alpha_\sigma m$ , где  $\Delta r_\sigma$  — допустимое смещение пучка на мишени во время бланкирования.

Таким образом, чтобы уменьшить ток пучка на мишени в  $10^3$  раз необходимо отклонить пучок в области отклоняющей системы бланкирования всего лишь на угол, больше чем  $1 \cdot 10^{-4}$  рад. Когда пучок отклонен от оптической оси, чтобы не вызывать локального разогрева диафрагмы, на катушки отклонения подается сигнал, заставляющий пучок описывать круги вокруг отверстия в диафрагме. Этим добиваются равномерной тепловой нагрузки на диафрагму.

Кроме механических систем для юстировки ЭОС, необходимых для механической установки электронно-оптических элементов колонны в требуемое положение, применены электронные системы юстировки.

Электронные системы юстировки являются электромагнитными и состоят из пяти двухъярусных отклоняющих систем, одна из которых установлена в канале линзы 9. Эти системы позволяют производить параллельное перемещение и наклон к оптической оси электронного пучка. Каждая электромагнитная система совмещена со стигматором.

Юстировочные системы обеспечивают: совмещение оси электронного пучка с центром диафрагмы Д3 (диафрагма имеет дополнительную механическую подвижку); установку оси электронного пучка параллельно оптической оси линзы 4; совмещение оси электронного пучка, прошедшего через отверстие диафрагмы Д3, с центром апертурной диафрагмы Д1; установку оси электронного пучка параллельно оптической оси объектива 7.

Важно, чтобы направление раstra совпадало с направлением движения координатного стола. Для первоначальной (грубой) установки направления раstra при настройке в конструкции колонны предусмотрены механический поворот ОС и динамического корректора в канале линзы 7 и их центровка относительно положения электронно-оптической оси линзы. Эта операция выполняется тщательным образом при настройке оборудования.

Тонкая установка направления раstra осуществляется изменением тока в объективе 7, при этом изображение прямоугольного сечения штампа неизбежно повернется и одновременно произойдет дефокусировка объектива. Чтобы исключить эти факторы при изменении тока возбуждения линзы 7 одновременно с этим изменяется ток в катушке подфокусировки и линзе 5.

Действительно, при повороте раstra на угол  $\Delta\Theta_p$  необходимо изменить ток в катушке возбуждения линзы 7 на величину  $\Delta(NI)_o$ , которая связана с углом поворота раstra соотношением

$$\Delta(NI)_o = \left( \frac{\Delta\Theta_p}{\Theta_p} \right) (NI)_o,$$

где  $\Theta_p$  — полный угол поворота раstra. При этом объектив расфокусируется на величину

$$\Delta b = -17,2 \left( \frac{\Delta Q_p}{\Delta_p} \right), \text{ см.}$$

Для компенсации этой дефокусировки меняется ток в катушке подфокусировки на величину  $\Delta(NI)_п = \Delta b/0,97 \cdot 10^{-2}$ , А·В.

Изображение штампа повернется на угол

$$\Delta\Theta_{\text{отн}} = \Delta\Theta_o - \Delta\Theta_п - \Delta\Theta_p = \mu_o \sqrt{\frac{e}{8m_o U}} \left[ \Delta(NI)_o - \Delta(NI)_п - \frac{\Delta(NI)_o}{2} \right],$$

где  $m_0$  — магнитная проницаемость вакуума;  $U$  — ускоряющее напряжение;  $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона, соответственно;  $\Delta\Theta_0$  — угол поворота штампа полем объектива;  $\Delta\Theta_n$  — угол поворота штампа полем линзы подфокусировки.

Поворот штампа можно осуществить путем изменения тока в линзе 5, изменив возбуждение на  $\Delta(NI)_5$ . Это изменение тока в линзе 5 связана с изменением токов в объективе и линзе подфокусировки соотношением:

$$\Delta(NI)_5 + \frac{\Delta(NI)_0}{2} - \Delta(NI)_n = 0.$$

Здесь учитывается влияние только первой половины поля объектива.

Взаимная компенсация поля объектива и линзы подфокусировки связана соотношением

$$\Delta(NI)_n = -1,13 \Delta(NI)_0,$$

а влияние полей линзы 5 и линзы подфокусировки — соотношением

$$\Delta(NI)_5 + \Delta(NI)_n = 0.$$

Поворот штампа в пределах угла  $\leq 1^\circ$  производится изменением тока возбуждения в одной лишь линзе 5, при этом  $\Delta(NI)_5 = 0,86 \cdot 10^3 \Delta\Theta_5$ .

В канале объективной линзы 7 помещены линза разворота раstra (линза 8), отклоняющие системы фрагмента рисунка и целого кадра, катушка динамической подфокусировки объектива и динамический стигматор. Статические стигматоры установлены внутри юстировочных катушек.

Выходные параметры ЭОС во многом определяются системой позиционирования (системой отклонения) электронного пучка. При ее конструировании пришлось учитывать многочисленные противоречивые требования, накладываемые как электронной оптикой и аберрациями электронного пучка, так и возможностью системы управления, в частности, возможностью цифроаналоговых преобразователей (ЦАПов). Для решения этой задачи был применен двухканальный метод отклонения.

Повышение быстродействия установки возможно при уменьшении времени переходных процессов в цепи, образованной выходным каскадом ЦАП, соединительного кабеля системы отклонения, индуктивностью катушек отклонения, влиянием магнитопровода линзы, окружающего катушки. Известно, что быстродействие и точность отработки заданной величины тока в выходной цепи ЦАП увеличиваются с уменьшением числа двоичных разрядов. С другой стороны, уменьшение числа двоичных разрядов ЦАП приводит к уменьшению числа точек позиционирования на мишени и при заданном шаге позиционирования к уменьшению величины рабочего поля, обрабатываемого за одну остановку координатного стола. Именно эти соображения привели к выбору компромиссного двухканального метода позиционирования электронного пучка на мишени.

Система имеет два независимых блока ЦАП, соединенных, соответственно, с двумя блоками двухъярусной отклоняющей системы: относительно медленный 16-разрядный ЦАП, соединенный с отклоняющей системой, формирующей фрагменты или так называемые “кадры” рисунка, т. е. обеспечивающий позиционирование электронного пучка с большим шагом в пределах заданного поля обработки, например размером 3,2x3,2 мм, и быстродействующий 12-разрядный ЦАП, соединенный с отклоняющей системой, обеспечивающей быстрое позиционирование электронного пучка в пределах некоторой части обрабатываемого поля (в пределах фрагмента или “кадра”) с заданным малым шагом позиционирования.

Реализация двухканального метода отклонения электронного пучка вызывает серьезные трудности с точки зрения оптики системы. Дело в том, что суммарный центр отклонения электронного пучка перемещается по оптической оси системы в зависимости от величины углов отклонения в каждой из двух отклоняющих систем, что в свою очередь приводит к росту величины aberrаций отклонения. Эта особенность принятой схемы отклонения сделала необходимым проведение оптимизации конструктивных параметров отклоняющих систем в целях минимизации aberrаций отклонения, а также минимизации собственной индуктивности и емкости катушек отклоняющей системы при обеспечении заданной чувствительности и высокой однородности поля на электронно-оптической оси. Уменьшая индуктивную связь между ними и тем самым уменьшая паразитную связь между каналами отклонения, приводящую к увеличению длительности переходных процессов при позиционировании, удалось увеличить быстродействие системы.

В результате оптимизации, в соответствии с указанной целевой функцией, были получены следующие результаты. Анизотропный астигматизм и кома имеют минимум при  $\alpha_p = 60^\circ$ . Скручивание изображения также имеет минимум при  $\alpha_p = 60^\circ$ . Минимальное значение aberrации достигают при выполнении условий оптимизации.

Анализ влияния неточности изготовления высокоточных отклоняющих систем и стигматоров на симметрию создаваемых ими полей был изложен в [5].

Система коррекции неизбежно возникающих ошибок отклонения содержит динамический стигматор и катушку динамической подфокусировки электронного пучка, которые конструктивно выполнены в виде одного блока с двухъярусной системой позиционирования.

Основная обмотка катушки динамической подфокусировки намотана в один ряд на двух концентрически расположенных каркасах из полистирола, причем на одном каркасе направление намотки правое, а на другом — левое. Поверх основной обмотки намотана компенсирующая обмотка, включенная последовательно с основной и служащая для минимизации суммарного магнитного поля обмоток на внутренней поверхности канала магнитопровода объективной линзы. Конструктивно компенсирующая обмотка также намотана в один ряд на двух концентрически расположенных каркасах, надетых поверх каркасов основной обмотки. Укладка витков частей компенсирующей обмотки сделана также в противоположных направлениях — правая и левая. Геометрические размеры и соотношения между числами витков рассчитаны на ЭВМ с большой точностью [6] и с учетом закона Био-Савара.

Моделирование показало, что для минимизации величины суммарного магнитного поля на поверхности канала объективной линзы витки компенсационной обмотки целесообразно поместить только в районе торцевых витков основной обмотки.

Динамический стигматор выполнен по явно полюсной схеме, что повышает его эффективность, и содержит две обмотки, каждая из которых намотана на четырех полюсах. Общее число полюсов 8.

Катушки динамической подфокусировки и динамический стигматор соединены с электронным блоком, вырабатывающим сигналы динамических коррекций. Этот блок вырабатывает сигналы, амплитуда которых зависит от координаты точки позиционирования электронного пучка, при этом величины и направления токов в обмотках системы коррекции подобраны так, чтобы минимизировать ошибки отклонения, вызванные как несовершенством конструкции системы отклонения, так и неточностью юстировки ЭОС. Ошибка на краях поля не превышает расчетную ( $\pm 0,05$  мкм).

На рис. 4 представлены фрагменты тестовых рисунков и рабочих топологических слоев, полученных экспонированием пучком прямоугольной формы.

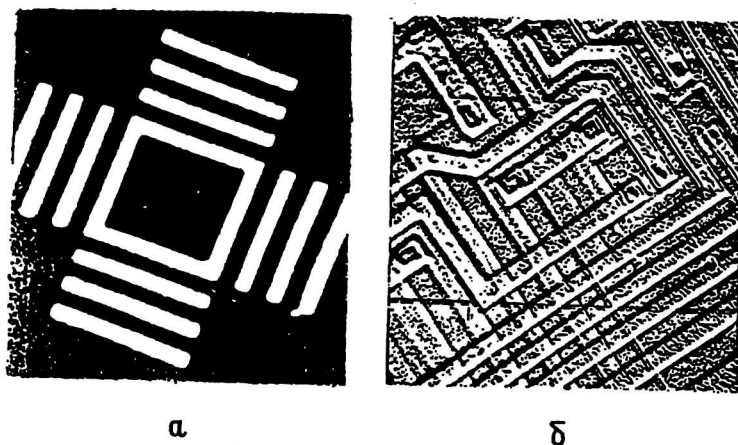


Рис. 4. Фрагменты тестовых структур (а); рабочих топологических слоев ИС, полученных после экспонирования топологических слоев на комплексе "КЭЛИТ" (б)

В комплексе "КЭЛИТ" применена трехступенчатая система совмещения.

Первая ступень осуществляет совмещение положения пластины, лежащей на координатном столе, с направлениями сканирования и хода движения по направлениям кареток координатного стола. Осуществляется это с помощью разворота пластины пьезопроводом.

Вторая ступень осуществляет совмещение координат электронно-оптической системы с координатами пластины. Это совмещение осуществляется перемещением координатного стола и слежением за этим перемещением с помощью лазерных интерферометров. Сигнал об ошибке позиционирования стола передается в систему отклонения пучка.

Третья ступень осуществляет совмещение координат меток совмещения, расположенных на пластине с координатами оптической оси ЭОС, путем сканирования пучка по поверхности меток совмещения и определения их пространственных координат и передачи их в ЭВМ, которая осуществляет управление положением пучка при экспонировании рисунка топологического слоя. Пучок многократно сканируется по метке совмещения в двух взаимно перпендикулярных направлениях с одновременным смещением вдоль края метки, чтобы избежать влияния неровности края, возникающей и изменяющейся от одного технологического процесса к другому.

Из электронно-оптической схемы видно, что установка снабжена системой для контроля за параметрами пучка во время настройки. Система контроля и наблюдения содержит линзу 9, по электронно-оптическим параметрам идентичную объективу 7, и две линзы 10, 11 (см. рис. 3,а), проецирующие увеличенное изображение электронного пучка на люминесцентный экран либо видеокамеру.

### Установка РЭМ-И

Растровый электронный микроскоп РЭМ-И предназначен для осуществления измерения и контроля качества топологических слоев после технологических обработок и автоматической коррекции ошибок технологических процессов посредством обратной связи от РЭМ-И к ПЭЛ-1 [1, 2].

Конструктивно установка РЭМ-И отличается от ПЭЛ-1 электронно-оптической системы (ЭОС) и наличием видеоконтрольного устройства (ВКУ), предназначенного для визуализации участков топологических слоев на промежуточных стадиях изготовления ИС и осуществления контроля за качеством пластин и процессов.

Колонна ЭОС содержит четыре электромагнитные линзы, которые обеспечивают разрешающую способность 0,001 мкм. ВКУ собрано по типовому проекту и снабжено устройствами для измерения линейных размеров элементов топологических слоев ИС.

РЭМ-И с помощью ЭВМ позволяет проводить сравнения заданного размера и конфигурации топологического рисунка и реального на обработанной пластине, а также измерения в диапазоне 0,1–100 мкм при разрешении 0,001 мкм, при этом погрешность измерения не более  $\pm 0,05$  мкм, а в диапазоне 100 мкм + 100 мм погрешность измерения ширины линии не более  $\pm 0,1$  мкм. Возможны визуальный контроль поверхности изделия с электронно-оптическим увеличением от 25 до 200 000 крат и фотографирование изображений на широкоформатную пленку типа "Поляроид".

На рис. 5 представлена блок-схема измерительной установки РЭМ-И, а на рис. 6 — функциональная схема лазерной измерительной системы координатного стола СПК-3.

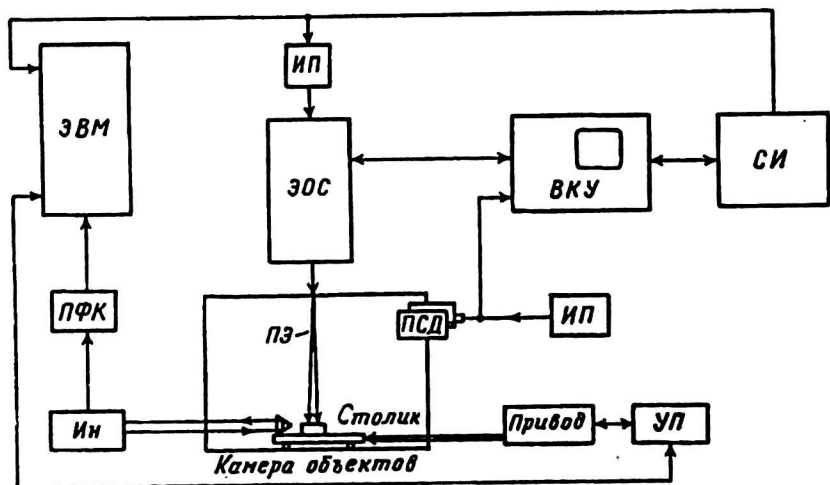


Рис. 5. Блок-схема измерительной установки РЭМ-И:

ПЭ — пучок электронов (рабочий инструмент); ИП — источник питания; ЭОС — электронно-оптическая система; ВКУ — видеоконтрольное устройство; ПФК — преобразователь фазы—код; ПСД — парносимметричный детектор вторичных электронов; ИН — интерферометр; УП — управление приводом; СИ — система измерения

### Перспективы однопиповой микролитографии

В настоящей работе представлены конструктивные особенности оборудования для электронной микролитографии, в том числе электронно-оптической системы с программируемыми параметрами электронного пучка.

Основное внимание при конструировании уделено вопросам минимизации погрешностей при воспроизводстве основных параметров. Рассмотрены проблемы комплексного подхода к созданию специализированного оборудования для электронной литографии при массовом производстве ИС.

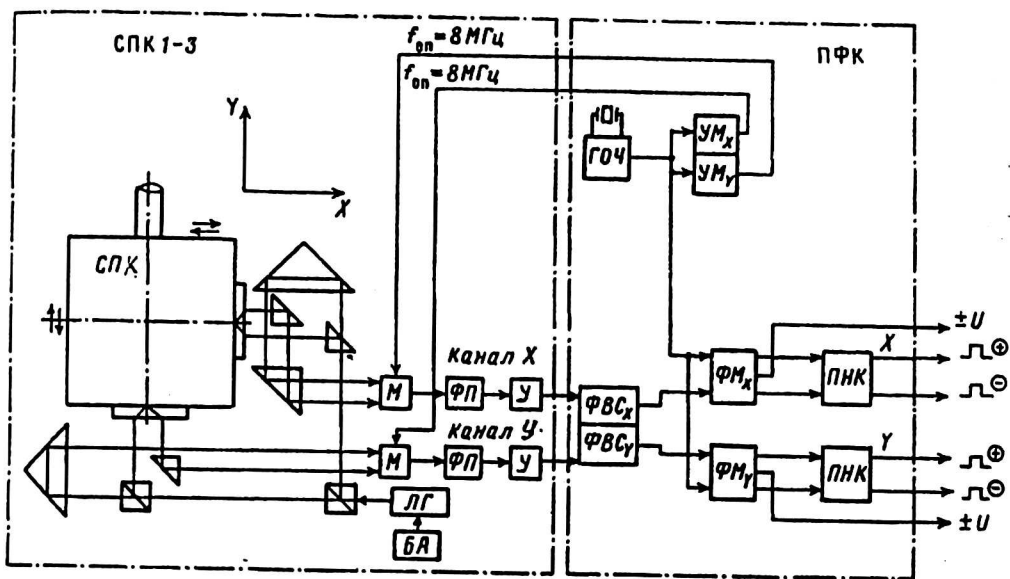


Рис. 6. Функциональная схема лазерной измерительной системы с преобразователем фазы в код ПФК, используемой в установках ПЭЛ-1 и РЭМ-И. Координатный стол СПК-3:

М — светомодулятор; ЛГ — лазер типа ЛГ-149-1; БА — блок автоматики;

ФП — фотоприемник; У — усилитель

Преобразователь фазы в коды (ПФК):

ГОЧ — генератор опорной частоты; УМ — усилитель мощности; ФВС — формирователь выходного сигнала; ФМ — фазометр; ПНК — преобразователь напряжение—код

Анализируя технические решения и характеристики комплекса “КЭЛИТ”, предназначенного для массового производства ИС, легко выделить те оригинальные решения, которые позволяют приблизиться к решению проблемы по созданию мини-производств изделий полупроводниковой микроэлектроники. Это позволит осуществлять индивидуальное изготовление СБИС или мини-ЭВМ малыми партиями заказных приборов полупроводниковой техники. Одночиповое производство позволяет скомпоновать производство так, чтобы сократить производственные площади. В данном случае можно пренебречь высокой производительностью, скомпенсировав это высоким процентом выхода годных и экономией времени, теряемого при перестройке производства. Конструктивно комплекс значительно сокращается в габаритах и упрощается, так как многие технические элементы и узлы необходимы лишь при массовом производстве изделий полупроводниковой техники. Кроме того, допустимы совмещения многих технологических процессов и создание технических кластеров при использовании новых “сухих” технологий, например таких, как нанесение сухого электронорезиста ЭР-1, его проявления и удаление, электронно-лучевого испарительного осаждения металлов, ионно-плазменных процессов для очистки подложек, травления и удаления материалов, электронно-стимулированных технологий и устройств для легирования и окисления, хорошо разработанных к сегодняшнему дню. Сокращаются высокообеспыленные технологические объемы.

Объективная система с подвижной (переменной) электронно-оптической осью, в основу которой положено продолжение этой работы, имеет суммарные aberrации в электронно-оптической системе с совмещенными фокуси-

рующими и отклоняющими полями (минимальные), если электронный пучок движется по ее новой электронно-оптической оси, которая меняет свое положение в пространстве в соответствии с программой [7]. Для реализации этой концепции требуется точное согласование пространственных распределений фокусирующего и отклоняющих полей, сложности которого увеличиваются по мере увеличения размеров поля обработки пучком.

Опыт, накопленный при создании ЭОС установок электронной литографии, и созданная конструкция, прошедшая опробацию в заводских условиях, позволяют проектировать ЭОС, наилучшим образом отвечающую всем современным требованиям, предъявляемым к таким устройствам, используя конструкции объектива, описываемые в данной статье.

### Л и т е р а т у р а

1. Васичев Б. Н. Электронолитография. Новое в жизни, науке, технике. Сер. Радиотехника и связь. — М.: Знание, 1982. № 8.
2. Васичев Б. Н. Измерения линейных размеров субмикронного размера в РЭМ//Известия АН. Сер. физич., 1993. Т. 57. № 8. С. 147—153.
3. Васичев Б. Н., Фролова В. А., Рыбаков-Ю. Л. Устройство для исследования катодов// Электронная техника. Сер. 7. 1977. Вып. 3(82). С. 127—132.
4. Васичев Б. Н., Розенфельд Л. Б., Михальцов Е. П. Электронно-лучевые конфокальные системы//Прикладная физика, 1997. № 2—3. С. 172—179; Михальцов Е. П.: Дис... канд. техн. наук/МГИЭМ. М., 1998.
5. Розенфельд Л. Б., Васичев Б. Н., Зотова М. О. Влияние неточности изготовления быстродействующих магнитных отклоняющих систем и стигматоров на симметрию создаваемых ими полей//Известия АН. Сер. физич., 1999. Т. 63. № 7. С. 1283—1289.
6. Балашов В. Н., Васичев Б. Н. Метод расчета распределения плотности тока в обмотке отклоняющей системы в электронной линзе с подвижной оптической осью// Там же. 1990. Т. 54. № 2. С. 346—349.
7. Балашов В. Н., Васичев Б. Н. Перспективы создания электронно-литографического оборудования для производства заказных интегральных схем// Прикладная физика. 1996. № 3. С. 55—60.

## Special feature complex equipment for electron-beam microlitography

*B. N. Vasichev*

Moscow Institute Electronics and Mathematics (Technical University), Moscow, Russia

*Varions structure complex equipment for electron litography for lot of production IS wiht minimum size elements topology abaut 0,1 mkm and develop produce alone chip IS microcomputers.*