

УДК 681.385

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗАКАЗНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

В. Н. Балашов, Б. Н. Васичев

Московский Государственный институт электроники и математики
(технический университет), Москва, Россия

Рассмотрены перспективы создания электронно-литографического оборудования для производства СБИС и ССИС методами однокристалльной технологии. Показана целесообразность создания электронно-оптической системы электронного литографа с полем экспонирования, равным кристаллу СБИС, на основе электронных линз с криволинейной оптической осью.

Одна из основных технологических операций в производстве сверхбольших интегральных микросхем — электронная литография, предназначенная для интегральной микросхемы методом последовательной печати его элементов на электронрезисте.

Электронная литография чаще всего используется для создания шаблона, позволяющего провести параллельной перенос топологии слоя на микросхему методами рентгеновской или фотолитографии или проекционной электронной и ионной литографии. Однако в производстве заказных СБИС частного применения электронную литографию целесообразно применять в режиме прямого экспонирования резиста, нанесенного на поверхность кристалла микросхемы.

Наиболее простым и дешевым технологическим процессом производства малосерийных заказных СБИС является однокристалльная технология, в которой на кремниевой пластине диаметром порядка 16 мм размещается один кристалл СБИС размерами 10x10 мм. Однокристалльная технология существенно упрощает конструкцию всех модулей технологической линейки, однако наибольшее упрощение приходится на установку для электронной литографии.

В настоящее время наметились две тенденции в развитии установок для электронной литографии.

Первая тенденция прослеживается в установках фирмы Rait (ФРГ) и состоит в экспонировании резиста на движущемся координатном столе и коррекции положения электронного пучка по командам от трехкоординатного лазерного интерферометра. В этих установках размер поля экспонирования электронным пучком существенно меньше размеров кристалла СБИС (обычно 1,6x1,6 мм при разрешении 0,2 мкм), что приводит к необходимости использования сложных лазерных систем совмещения.

Вторая тенденция состоит в экспонировании резиста на неподвижном координатном столе с использованием поля экспонирования размерами 10x10 мм (установки EL-3 и EL-4 фирмы IBM, США). Требования к конструкции координатного стола и системе совмещения для этих установок существенно ниже.

Основные трудности при создании установок первого типа приходится на конструкцию прецизионного координатного стола и системы совмещения, а второго типа — на конструкцию электронно-оптической системы с большим полем экспонирования.

Однокристалльная технология производства СБИС позволяет существенно упростить конструкцию электронно-литографической установки путем исключения прецизионного координатного стола и лазерной системы совмещения за счет применения новых технических решений в конструкции электронно-оптической системы — электронной линзы с криволинейной оптической осью.

Объективная система является наиболее сложным оптическим узлом электронно-оптической системы установки для электронной литографии и предназначена для позиционирования сформированного электронного пучка в заданную точку на мишени в пределах поля обработки. Именно технические характеристики объективной системы решающим образом влияют на технологические возможности установки в целом.

Известны три основные концепции построения объективных систем установок для электронной литографии:

объективная система с двухъярусным предотклонением электронного пучка через центр магнитного зазора несимметричной магнитной линзы (установка ZBA-32, ФРГ) (рис. 1, а). В этой системе магнитные поля линзы и отклоняющих систем разнесены в пространстве и не пересекаются между собой;

объективная система, в которой отклоняющая система помещена в центр магнитного зазора фокусирующей линзы (установки ПЭЛ-1, СССР; EL-1, США; ZBA 20, ФРГ, (см. рис. 1, б). Диаметр и длина магнитного зазора в такой линзе достаточно велики и существенно больше, чем соответствующие размеры в лин-

зе, приведенной на рис. 1, а. Пространственное распределение полей линзы и отклоняющей системы в этом случае специально не согласуется;

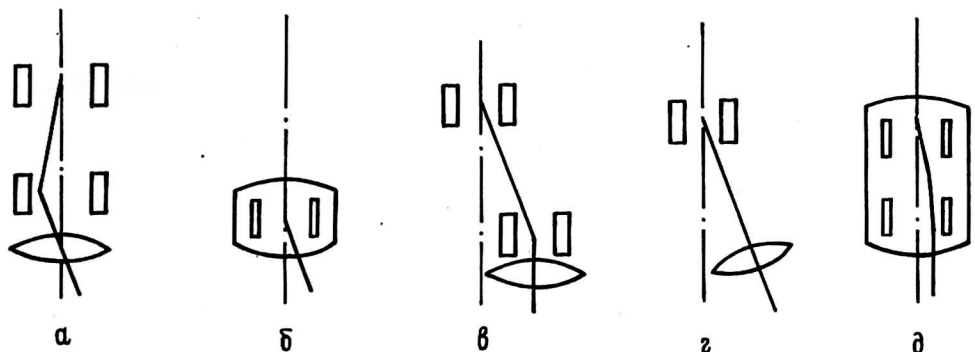


Рис. 1. Оптические схемы объективных систем установок для электронной литографии: а — с двухъярусным отклонением; б — типа Пфайфере; в — с подвижной оптической осью; г — с наклонной оптической осью; д — с криволинейной оптической осью

объективная система рассматриваемого типа позволяет при работе с малым рабочим отрезком реализовать лучшие соотношения между центральными аберрациями линзы, определяющими качество изображения в приосевой области, и аберрациями отклонения, определяющим качество изображения на краю поля сканирования. В этой системе центральные аберрации выше, чем в системе на рис. 1, а, а аберрации отклонения — ниже. Это делает целесообразным применять объективные системы с совмещенными отклоняющими и фокусирующими полями в электронных литографах с промежуточным размером поля обработки, работающие, как правило, с движущимся координатным столом;

объективная система с переменной оптической осью, в основу которой положено предположение, что суммарные аберрации в оптической системе с совмещенными фокусирующим и отклоняющим полем будут минимальны, если электронный пучок движется по ее оптической оси (не обязательно прямолинейной и совпадающей с геометрической осью фокусирующей линзы). Для реализации этой концепции требуется точное согласование пространственных распределений фокусирующего и отклоняющих полей, сложности которого увеличиваются по мере увеличения размеров поля обработки. Аберрации отклонения в таких системах при больших отклонениях пучка от оптической оси в принципе ниже, чем в объективных системах других типов, что делает целесообразным применение этих систем в электронных литографах с размером поля обработки, равным или перекрывающим размеры кристалла СБИС.

Объективные системы с переменной оптической осью, в свою очередь, делятся на системы с подвижной, наклонной и криволинейной оптической осями.

В линзах с оптической осью (см. рис. 1, в) последняя перемещается параллельно геометрической, при этом электронный пучок направлен по нормали к поверхности мишени. Электронный пучок выводится на подвижную ось при помощи двухъярусной отклоняющей системы предотклонения, расположенной вне линзы (установки EL-3 и EL-4, США).

В линзах с наклонной осью (см. рис. 1, г) прямолинейная оптическая ось поворачивается вокруг центра отклонения отклоняющей системы предотклонения

электронного пучка, расположенного вне линзы, при этом пучок выводится на наклонную оптическую ось под углом к поверхности мишени.

В линзах с криволинейной оптической осью (см. рис. 1, д) поля фокусирующей линзы, отклоняющих систем перемещения оси и отклоняющих систем предотклонения совмещены между собой и образуют комбинированное поле сложной конфигурации. Эта линза позволяет значительно сократить габаритные размеры объективной системы при сохранении основных оптических характеристик по сравнению с другими типами объективных систем.

Основная техническая сложность в создании объективных систем с большим полем отклонения — разработка методов и соответствующих технических решений для динамической коррекции aberrаций отклонения электронного пучка. Разработка методов коррекции основана на подходах вычислительной электронной оптики, состоящих в создании точных математических моделей электронно-оптических систем и их численном исследовании и оптимизации. Возможности такого подхода иллюстрируются на рис. 2, где показаны результаты динамической коррекции полевых aberrаций отклонения в объективной системе литографа типа ПЭЛ-1. Левая и правая границы допуска $d = 0,1$ мкм; апертурный угол $1,5 \cdot 10^{-3}$ рад; координаты точки относительно оси: $x = 1,5$ мм, $y = 1,5$ мм. Оптимизация проведена траекторным методом [1] путем подбора конфигураций корректирующих полей, при этом добивались минимума площади aberrационной фигуры в заданной точке поля отклонения.

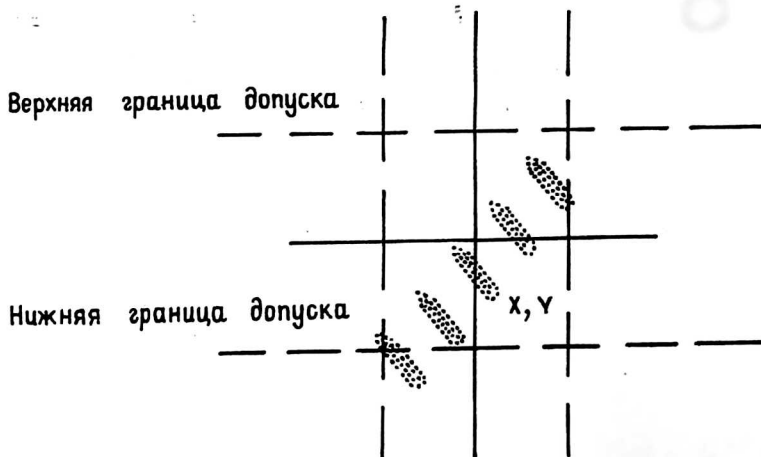


Рис. 2. Суммарные aberrации комбинированного поля, полученные моделированием траекторным методом.

Фигуры размытия — геометрические aberrации. Пять групп фигур размытия — хроматическая aberrация

Эти результаты, а также результаты оптимизации подобных систем методами, предложенными в работах [2, 3], показывают, что основной вклад в размытие пучка при больших отклонениях от геометрической оси линзы оказывает поперечная хроматическая aberrация отклонения, не устранимая при помощи динамической коррекции aberrаций. Основным реалистичным путем уменьшения этой aberrации является ограничение величины отклонения пучка от оптической оси линзы, что возможно только в рамках идеологии электронных линз с переменными оптическими осями.

Традиционные математические модели электронной оптики не позволяют построить адекватную модель электронной линзы с переменной оптической осью. Это связано прежде всего с традиционным представлением распределения полей в оптической системе в виде степенного ряда (ряда Буша) и основанной на этом представлении теории геометрических aberrаций. Такое представление, достаточно точное в малой окрестности геометрической оси линзы, оказывается совершенно неудовлетворительным для линз с переменными оптическими осями при большом отклонении подвижной оси от геометрической. Кроме того, традиционная математическая модель не позволяет достаточно просто сформулировать условия осевой симметрии поля в окрестности переменной оптической оси, выполнение которых необходимо для создания высококачественной оптической системы.

Новые математические модели [1, 3, 4] основаны на отказе от представления электромагнитных полей в форме степенных рядов и используют прямую интерполяцию полей на сетке или представление полей в форме интеграла Фурье и позволяют достаточно точно описать оптические характеристики электронных линз с переменными осями при любой величине отклонения подвижной оси от геометрической. Использование этих моделей позволило разработать теоретические основы новых нелинейных электронных линз с переменными оптическими осями [5—7].

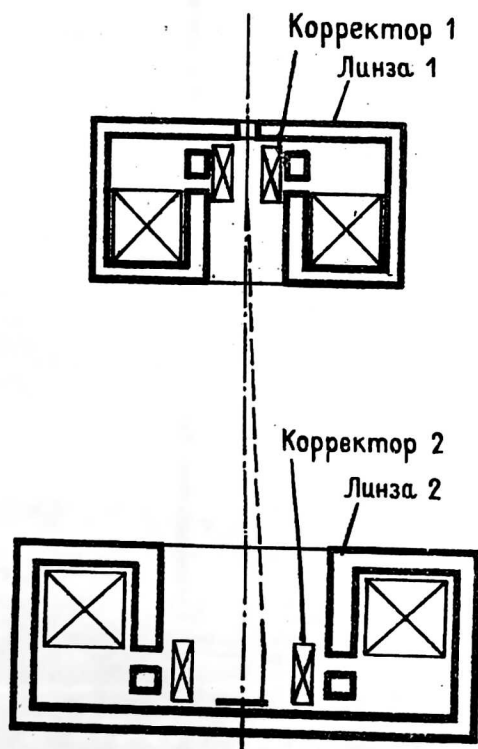


Рис. 3. Объективная система с криволинейной оптической осью

Другой сложной задачей при создании электронных линз с переменными оптическими осями является создание корректирующих элементов, создающих заданное распределение магнитных полей (рис. 3). Применяемый при этом метод подбора распределения витков с током показал свою неэффективность, что

связано с некорректностью этой задачи. Для ее решения предложены методы проектирования электронных линз с переменными осями, основанные на решении обратных задач [8—10].

Полученные теоретические результаты и основанные на них программы расчета и моделирования электронных линз с переменными оптическими осями открывают перспективу создания простых и малогабаритных электронно-оптических систем для субмикронных электронных литографов нового поколения, предназначенных преимущественно для производства заказных интегральных микросхем.

Л и т е р а т у р а

1. Балашов В. Н., Васичев Б. Н. Метод расчета ошибок изображения в электронно-оптических системах установок для электронной литографии // Известия АН СССР. Сер. Физическая, 1984. Т. 48. № 12. С. 2414—2417.
2. Балашов В. Н., Васичев Б. Н., Мельников А. А. Многокритериальная оптимизация электронно-оптических систем установок для электронной литографии // Радиотехника и электроника, 1986. Т. 31. № 5. С. 989—992.
3. Балашов В. Н., Трофимов В. А., Шахбазов С. Ю. Метод расчета ошибок изображения электронно-оптических систем любой сложности // Известия РАН. Сер. Физическая, 1993. Т. 57. № 8. С. 127—130.
4. Балашов В. Н., Васичев Б. Н. Корректный метод расчета электронно-оптических систем // Известия АН СССР. Сер. Физическая, 1991. Т. 55. № 8. С. 1639—642.
5. Балашов В. Н. Нелинейная теория электронной линзы с криволинейной оптической осью // Известия РАН. Сер. Физическая, 1993. Т. 57. № 8. С. 110—114.
6. Электронная линза с подвижной оптической осью с нелинейной коррекцией аберраций // Там же. С. 115—117.
7. Балашов В. Н., Филипчук Т. С., Трофимов В. А., Шахбазов С. Ю. Расчет электростатических линз с подвижной оптической осью // Там же. С. 118—122.
8. Балашов В. Н. Проектирование электронных линз с подвижной оптической осью путем решения обратных задач // Там же, 1996. Т. 60. № 2. С. 168—173.
9. Балашов В. Н., Васичев Б. Н. Метод расчета распределения плотности тока в обмотке отклоняющей системы в электронной линзе с подвижной оптической осью // Известия АН СССР. Сер. Физическая, 1990. Т. 54. № 2. С. 346—349.
10. Балашов В. Н., Васичев Б. Н. Обратная задача расчета электронных линз // Там же. С. 350—352.

PROSPECTS OF BUILDING AN ELECTRON-LITHOGRAPHIC EQUIPMENT FOR ORDERED INTEGRAL MICROCIRCUIT MANUFACTURING

V. N. Balashov, B. N. Vasichev

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

Prospects for building an electron-lithographic equipment for integral microcircuit manufacturing with the single-crystal technology are considered.

The utility of electron-optical system elaboration for an electron lithographic unit with exposure area equal to the VLSI crystal size is shown on the basis of electron lenses with a curvilinear axis.