

УДК 621.235.015

Многофункциональная система для производства элементов микроэлектроники и компьютерной электронно-лучевой оптики

В. А. Васин, Б. Н. Васичев, С. В. Степанчиков, Н. Г. Фатьянова

Рассмотрены преимущества и различные возможности проектирования и разработки многофункционального многопучкового электронно-лучевого оборудования без привносимой дефектности, с низкими радиационными нагрузками на обрабатываемый объект при производстве изделий микроэлектроники, компьютерной электронно-лучевой оптики и системотехнических устройств.

PACS: 07.30.Cy

Ключевые слова: миниатюризация электронно-лучевого оборудования, многопучковая система, многофункциональная система, радиационные нагрузки.

Введение

Миниатюрные источники электронов (электронные пушки), электронные линзы, детекторы электронов и другие элементы электронно-лучевого оборудования, разработанные на кафедре «Технологические системы электроники» МИЭМ совместно с Институтом электронной и ионной оптики ФГУП «НПО "Орион"», используются в приборах различного назначения.

Миниатюризация преследует цели [1]:

создание малогабаритного и транспортабельного оборудования;

переход к использованию низкоэнергетических электронных пучков для снижения радиационной нагрузки на обрабатываемые структуры полупроводниковой техники;

создание многопучковых, синхронно работающих систем, в целях повышения производительности электронно-лучевого технологического оборудования.

Создание миниатюрных электронно-лучевых устройств тормозилось из-за отсутствия решения теоретических и прикладных задач низковольтной электронной оптики, технологии изготовления миниатюрных элементов электронно-лучевых устройств, систем управления электронными пучками и эффективных автоэмиссионных катодов и других элементов вакуумной электроники.

Разработка магнитных миниатюрных электронных линз и других элементов вакуумной электроники и их исследование является промежуточным этапом перед созданием микро- и наноэлементов вакуумной электроники, микросистемной электронно-зондовой техники и компьютерной электронно-лучевой оптики.

Перспективами развития вакуумной микросистемной электронно-зондовой техники является разработка микро- и наноустройств для осуществления технологических процессов параллельной электронной микро- и нанолитографии при изготовлении изделий микроэлектроники и микромеханики, при создании приборов для научных и поисковых исследований, для массового контроля на промежуточных стадиях изготовления изделий микро- и наноэлектроники и для применения в других нанотехнологиях. Она должна базироваться на интегрально-групповых принципах производства с минимальным участием человека. Геометрические размеры устройств микросистемной вакуумной электроники позволят широко использовать ее в тех областях деятельности человека, где ранее не могла применяться подобная техника.

Для осуществления технологического процесса электронной микролитографии и особенно в нанотехнологии, важное значение имеют [2]:

конструкция координатного стола, обеспечивающего прецизионное перемещение по осям X , Y обрабатываемой полупроводниковой подложки;

конструкция системы слежения за перемещениями стола и совмещения координат полупроводниковой подложки и координат прицеливания электронных пучков;

конструкция системы обеспечения вакуумной гигиены, не допускающая влияния привносимой дефектности изделий на процент выхода годных.

Многофункциональность достигается тем, что электронно-лучевые системы могут использовать

Васин Владимир Анатольевич, докторант.
Васичев Борис Никитович, профессор.
Степанчиков Сергей Валентинович, доцент.
Фатьянова Наталья Георгиевна, аспирант.
Московский государственный институт электроники и математики.
Россия, 109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3.
E-mail: vasichev@yandex.ru; vacuumwa@list.ru
Статья поступила в редакцию 23 декабря 2010 г.

ся то как растровые электронные микроскопы, осуществляющие контроль поверхности обрабатываемой подложки, то как электронные литографы, экспонирующие электронный резист, осуществляя нанесение скрытого изображения одинаковых рисунков топологических слоев интегральных схем.

В настоящей работе главное внимание уделяется концептуальному подходу к проектированию многопучковых многофункциональных электронно-лучевых систем для контроля и производства микро- и наноструктур электронной техники.

Общая компоновка многофункциональной электронно-лучевой системы для производства микро- и наноструктур

На рис. 1 представлена схема компоновки многофункциональной электронно-лучевой системы для производства микро- и наноструктур.

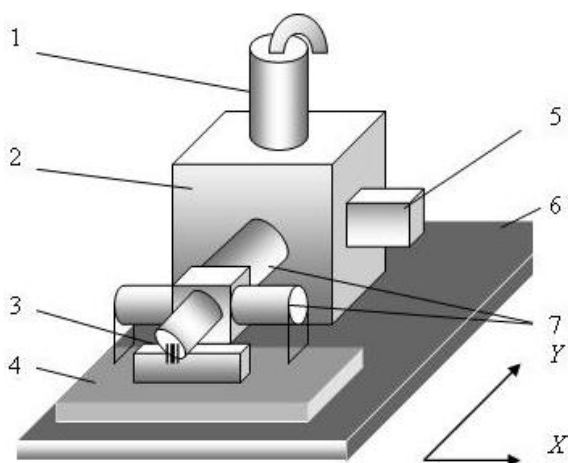


Рис. 1. Общая компоновка многофункциональной электронно-лучевой системы для производства микро- и наноструктур

Многолучевая электронно-зондовая система 1 установлена на технологической камере 2, соединенной с сильфонной группой 7. Внутри сильфонной группы, состоящей из трех сварных сильфонов диаметром 200 мм, находится Т-образная штанга, на одном из концов которой закреплен координатный стол. Другие концы крестообразной штанги закреплены на держателях, соединенных с каретками 3 и 4. Каретка 3 перемещает стол вдоль оси Y, а каретка 4 — вдоль оси X. Перемещение осуществляется с помощью механизмов винта-гайка. Дискретность перемещения 1000 нм. Технологическая камера снабжена шлюзовой камерой 5. Вся конструкция расположена на основании 6.

Многолучевая электронно-зондовая колонна состоит из нескольких идентичных миниатюрных электронно-оптических систем диаметром 15 мм и

длинной 180 мм. Каждая из систем состоит из электронной пушки, электронных линз, систем управления электронными пучками: отклоняющих систем, систем бланкирования пучка. Детекторы электронов позволяют определять координаты электронного пучка, а в режиме растрового электронного микроскопа — формировать изображения отдельных участков поверхности подложки.

Координатный стол заимствован от установки прецизионной электронной литографии ПЭЛ-1. Он перемещается с помощью электродвигателей, управляемых системой управления. Погрешность позиционирования ± 500 нм. Лазерный интерферометр ЛИ-1 контролирует перемещение стола с погрешностью измерений 60 нм. Электронная схема совмещений, объединяющая систему обнаружения метки совмещения, управления электронными пучками и систему лазерного интерферометра, осуществляет коррекцию погрешностей перемещения стола после каждого шага механического перемещения. Погрешность системы совмещения, включая обнаружение и фиксацию меток совмещения, составляет ± 10 нм.

Использование сильфонной группы позволило исключить применение устройств ввода движения в вакуумное пространство, благодаря чему удалось исключить попадание в технологическую камеру элементов смазки, натекания воздуха и образования загрязняющих микрочастиц, создаваемой трущимися механизмами привода стола.

Элементы вакуумной микросистемной электронно-зондовой техники

Создание миниатюрных электронно-лучевых систем с заданными свойствами, структурой и геометрией, совокупность которых обеспечивает выполнение процессов эмиссии пучков заданной интенсивности частиц, их формирование и управление ими, позволило приступить к исследованию и проектированию многопучковых устройств. Электронно-оптические системы стали чрезвычайно малой протяженности. Их вакуумный объем значительно уменьшился. Это облегчило процесс организации вакуумной откачки и поддержания вакуумных допустимых условий. Миниатюризация элементов изображающей вакуумной электроники наложила новые условия на процесс их моделирования, проектирования и технологию изготовления.

Моделирование миниатюрных электронных пушек, электронных линз (электростатических и магнитных), отклоняющих систем позволило выявить оптимальное конструктивное решение, отвечающее требованиям миниатюризации, без по-

тери основных электронно-оптических свойств, а также позволило выявить новые свойства, характерные только для миниатюрных элементов. При моделировании электронно-оптических элементов использовались методы моделирования широкоугольных систем.

Электронно-зондовая система состоит из нескольких идентичных миниатюрных электронно-оптических колонок с внешним диаметром 15 мм и длиной 180 мм, каждая из которых содержит триодную электронную пушку, четыре электронных линзы, отклоняющие системы для бланкирования пучка, отклоняющие системы для формирования пучка и отклоняющие системы для позиционирования пучка на обрабатываемом изделии. Пушки рассчитаны на ускоряющее напряжение 500—1000 В. Магнитопровод линз изготовлен из пермаллоя. Каждая колонка собрана из сочетания электростатических и магнитных линз с совмещенными полями. Обмотки возбуждения изготавливаются по планарной технологии. Так как каналы в электронных линзах очень малы, то практически измерить распределения магнитной индукции невозможно. Методом численного моделирования определены распределения магнитной индукции в зависимости от плотности тока в катушках и конфигурации катушек и магнитопровода. Расчеты коэффициентов сферической и хроматической аберраций для электронных линз с разной конфигурацией магнитопровода при разном возбуждении обмоток, легли в основу оптимизации конструктивного выполнения этих элементов. Экспериментально определены электронно-оптические и эксплуатационные характеристики. Минимальный диаметр электронных пучков при ускоряющем напряжении 1 кВ может составлять 100 нм, а поле сканирования пучка 2×2 мм. Разброс параметров от колонки к колонке компенсируется системой управления.

Полупроводниковые детекторы электронов позволяют определять координаты электронного пучка, а в режиме растрового электронного микроскопа — формировать изображения отдельных участков поверхности подложки.

Производительность

Производительность экспонирования многолучевого электронно-зондового устройства η_1 , состоящего из нескольких идентичных миниатюрных электронно-оптических колонок, прямо пропорциональна току пучка (токи пучков предварительно унифицируются), количеству пучков, времени перемещения координатного стола, диаметру обрабатываемой подложки и обратно пропорциональна экспонируемой площади:

$$\eta_1 = \frac{int_1t_2}{S},$$

где i — ток пучка;

n — количество электронных пучков;

t_1 — время экспонирования;

t_2 — время, затрачиваемое на перемещения стола;

S — площадь экспонирования.

Из этого следует, что с увеличением числа пучков, осуществляющих одновременное экспонирование при равных прочих условиях, производительность увеличивается в n раз, по сравнению с существующими, однолучевыми установками. Это справедливо при одновременном процессе совмещения. Однако даже при последовательном процессе совмещения этот выигрыш уменьшается незначительно из-за быстродействия управляющего компьютера. В реальной конструкции многолучевой электронно-зондовой системы число электронных пучков зависит от внешнего диаметра электронно-оптической системы (ЭОС) и может доходить до нескольких сотен. В нашем случае при внешнем диаметре ЭОС, равном 15 мм, и диаметре полупроводниковой пластины 300 мм, число ЭОС плотно прижатых друг к другу и расположенных по оси X , $n_x = 10$ и по оси Y — $n_y = 1$. Производительность возрастает почти в 10 раз. Разумеется, свой вклад в потери в производительности, в данном случае, в основном, вносит время перемещений стола.

На рис. 2 представлена схема электромеханического привода, оснащенного сильфонным вводом движения в вакуум, для перемещения стола.

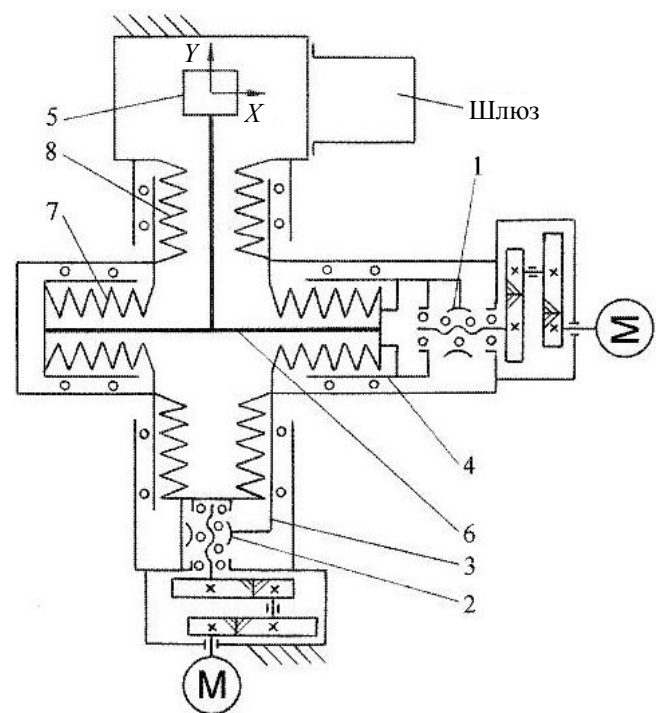


Рис. 2. Схема электромеханического привода и сильфонного ввода движения в вакуум

В приводе использованы шариковинтовые пары 1 и 2 [3], приводящие в движение нижнюю (ось *Y*, поз. 3) и верхнюю (ось *X*, поз. 4) каретки поступательного перемещения объектов. Объект 5 крепится на штоке 6, жестко связанном с ползуном верхней каретки. Для герметизации приводов использованы закрепленные попарно на концах кареток сварные сифоны 7 и 8.

В режиме автоматического контроля чистоты подложки производительность η_2 зависит от времени перемещения подложки, времени сканирования чипов, числа чипов, времени машинной обработки данных контроля:

$$\eta_2 = \frac{it_1t_2t_3Nn}{S},$$

где *i* — ток пучка;

*t*₁ — время перемещения подложки;

*t*₂ — время сканирования чипа;

*t*₃ — время машинной обработки данных контроля;

N — число контролируемых чипов;

n — число колонок ЭОС;

S — площадь контролируемых чипов.

Требования к вакуумной системе

Вакуумная откачная система должна обеспечить быструю откачку объема технологической камеры и электронно-оптических колонок после смены объекта обработки, отсутствие потоков натекания воздуха, отсутствие продуктов трения, вырабатываемых механизмами, чтобы исключить появление привносимой дефектности на топологических слоях при обработке изделий.

Значительно уменьшенный, по сравнению с существующими установками, вакуумный объем может откачиваться малогабаритными вакуумными сифонными, сифонно-поршневыми, мембранными насосами или насосом на основе сплава накопителя водорода [4].

На рис. 3 показан внешний вид вакуумного сифонно-поршневого насоса [5].

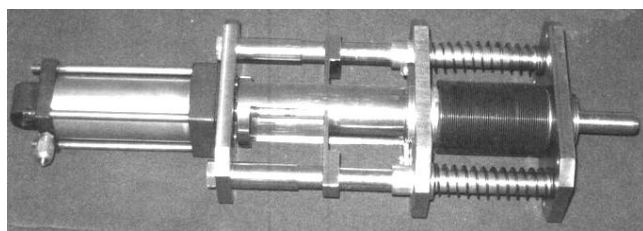


Рис. 3. Внешний вид вакуумного сифонно-поршневого насоса

Насос содержит полый поршень 1 (вытеснитель) (рис. 4), выполненный с возможностью про-

дольного перемещения, и сифонный элемент 2, один конец которого герметично закреплен на поршне, а другой — на основании впускного (нижнего) подпружиненного клапана 3. Поршень жестко закреплен на рамке 4, которая от внешнего привода имеет возможность продольно перемещаться по направляющим 5.

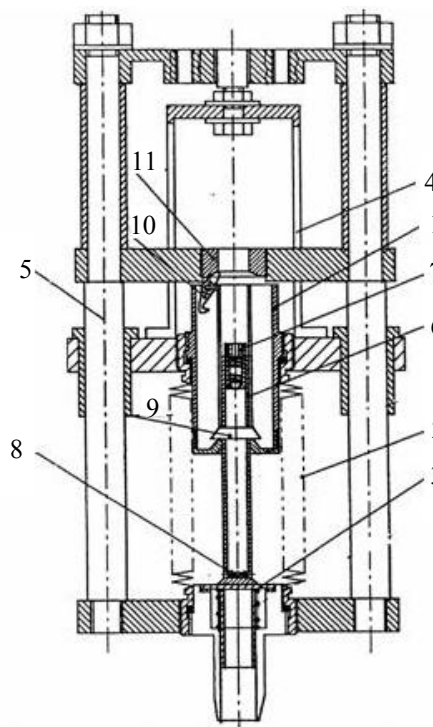


Рис. 4. Вакуумный сифонно-поршневой насос

Внутри поршня расположен полый цилиндрический шток 6 с глухим торцом со стороны впускного клапана и перекрытым выпускным обратным клапаном 7 торцом с противоположной стороны. Со стороны глухого торца поршня в его боковой стенке выполнены отверстия 8, сообщающие полости штока и сифонного элемента.

Шток имеет возможность ограниченно перемещаться вдоль оси поршня, перекрывая впускной клапан в крайнем нижнем своем положении. На внешней поверхности штока выполнен упор 9, а поршень снабжен защелкой 10, выполненной в виде двуплечего рычага, взаимодействующего одним из своих плеч с упором, фиксируя тем самым шток относительно поршня в крайнем нижнем положении и освобождая шток относительно поршня путем взаимодействия другого плеча рычага с бобышкой 11, неподвижно закрепленной относительно направляющих, в крайнем верхнем положении поршня со штоком.

Работа насоса осуществляется следующим образом.

На рис. 4 показано начальное положение перечисленных функциональных элементов насоса, когда поршень находится в крайнем верхнем по-

ложении, а шток — в крайнем нижнем, перекрывая своим глухим торцом впускной клапан.

При движении рамки, а следовательно, и поршня вниз происходит сжатие сильфонного элемента, в результате чего газ из сильфонного элемента выдавливается и через отверстия в штоке, через впускной клапан выходит в атмосферу.

При движении рамки, а следовательно, и поршня вверх защелка зацепляет упор штока, и вся конструкция движется вверх. Сильфонный элемент растягивается и увеличивает объем, при этом шток с поршнем освобождают впускной клапан, который под действием пружины открывает вакуумный объем.

Защелка одним из своих рычагов наезжает на бобышку и, поворачиваясь, освобождает упор штока, который под действием пружины (не показана) перемещается вниз, закрывает впускной клапан, запирая газ в объеме сильфонного элемента.

После чего рассмотренная последовательность повторяется необходимое количество раз.

Вакуумный сильфонно-поршневой насос имеет простую конструкцию, надежен в эксплуатации и имеет относительно высокую производительность, так как является двухступенчатым.

Для определения предельного давления вакуумного насоса используется выражение [6]

$$P_{\text{пред}} = P_0 \frac{1}{1 + \left[1 + \left(\frac{V_k}{V_p} \right) \right]^n} + \sum a_1 \frac{V_{\text{вр}} P_{\text{выкл}}}{V_k} \frac{1}{1 + \left[1 + \left(\frac{V_k}{V_p} \right) \right]^m}, \quad (1)$$

где V_p — откачиваемый объем;

V_k — объем рабочей камеры насоса;

$V_{\text{вр}}$ — "паразитный объем";

$P_{\text{выкл}}$ — давление выхлопа;

a_1 — коэффициент, учитывающий газовыделение;

P_0 — начальное давление в откачиваемом объеме.

Выражение (1) может быть представлено в виде, широко используемом при оценке предельного давления вакуумных насосов:

$$P_{\text{пред}} = a_1 \frac{V_{\text{вр}}}{V_k} P_{\text{выкл}}.$$

Приняв $a_1 = 1$

$$P_{\text{пред}} = \frac{V_{\text{вр}}}{V_k} P_{\text{выкл}}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что при формировании необходимой величины предельного давления важным фактором является отношение "паразитного объема" к объему камеры.

В конструкциях вакуумных насосов на основе сильфонных камер необходимо оценить влияние межмембранных зазоров Δ , образующихся в результате недоскладывания сильфона, и рассмотреть совокупный "паразитный объем".

Очевидно, что длина сильфона в полном сложенном состоянии равна:

$$L_c = \delta n,$$

где δ — толщина мембраны сильфона;

n — количество гофр.

При $2\delta n > L_c$ на некоторую величину m имеет место недоскладывание сильфона, а межмембранный зазор Δ , создающий дополнительный "паразитный объем" во внутренней полости сильфона, может быть определен из следующего выражения

$$\Delta = \frac{m}{n}.$$

Предельное давление в поршневой ступени, обусловленное геометрическими параметрами ее элементов определяется из выражения

$$P_{\text{II пред}} = \frac{V_{\text{вр}}}{V_{k. \text{эф}}} P_{\text{выкл}}.$$

Здесь $V_{k. \text{эф}}$ — эффективный объем поршневой камеры, определяющийся следующим образом:

$$V_{k. \text{эф}} = \frac{\pi D_1^2}{4} L,$$

где D_1 — внутренний диаметр цилиндра, контактирующего с поршнем;

L — максимальный ход сильфона до состояния полного складывания гофр.

Так как поршневая ступень насоса выходит на атмосферу, выражение для $P_{\text{II пред}}$ принимает вид

$$P_{\text{II пред}} = \frac{V_{\text{вр}}}{V_{k. \text{эф}}} \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Привносимые загрязнения, выделяемые из узлов трения механических систем, приводят к снижению выхода годных изделий электронной техники при проведении технологического процесса и должны быть учтены.

Среднее количество микрочастиц износа, образовавшихся в результате работы насоса в единицу времени, определяется по формуле [7]

$$N = \frac{I_h v_c S_H}{W},$$

где I_h — средняя линейная интенсивность изнашивания;
 v_c — скорость скольжения во фрикционном контакте;
 S_n — номинальная площадь поверхности трения;
 W — средний объем микрочастицы износа.

Средняя линейная интенсивность изнашивания

$$I_h = \frac{\pi}{8} 10^{-7} \left(\frac{\sigma_H \sqrt{1 + 4f^2}}{\sigma_{HP}} \right)^6 \frac{b(R - \sqrt{R^2 - b^2})}{R_{\max} (2R - R_{\max})},$$

где σ_H , σ_{HP} — контактное и допускаемое контактное напряжения;
 f — коэффициент трения;
 b — радиус фрикционного пятна контакта;
 R — радиус скругления микронеровностей;
 R_{\max} — максимальная высота микронеровностей.

Загрязняющие микрочастицы износа могут быть локализованы посредством гравитационных, электростатических и магнитных ловушек.

Режим функционирования вакуумной аппаратуры необходимо согласовывать с ограничениями, накладываемыми современными технологическими процессами.

Заключение

Принципиально новый подход к проектированию электронно-зондовых устройств является

перспективным для развития микросистемной электронно-зондовой техники, используемой в технологических процессах изготовления изделий микро- и наноэлектроники, микромеханики и компьютерной электронно-лучевой оптики.

Разработка элементов вакуумной микросистемной электронно-зондовой техники позволило приступить к проектированию нового поколения электронно-лучевого оборудования. Эта техника служит базой для создания и массового применения миниатюрных низковольтных multifunctional устройств. Использование электронных пучков с низкой энергией значительно снижает радиационную нагрузку на обрабатываемое изделие, а значит позволяет выполнять технологические операции на подложках из материалов, чувствительных к электронно-лучевым нагрузкам.

Л и т е р а т у р а

1. Васичев Б. Н. // Известия РАН, серия физическая. 2000. Т. 64. № 8. С. 1637.
2. Васичев Б. Н. // Прикладная физика. 2000. № 2. С. 26.
3. Васин В. А., Васичев Б. Н., Степанчиков С. В. // Там же. 2010. № 3. С. 132.
4. Александрова А. Т., Васин В. А., Горюнов А. А. и др.: Пат. на изобретение 2211114.
5. Александрова А. Т., Васин В. А., Кеменов В. Н. и др.: Пат. на изобретение 2263820.
6. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. 2-е изд. — М.: Высш. шк., 1995.
7. Васин В. А., Ивашов Е. Н., Кузнецов П. С., Степанчиков С. В. // Приводная техника. 2010. № 4(86). С. 31.

Multifunctional system for the production of microelectronic components and computer cathode-ray optics

V. A. Vasin, B. N. Vasichev, S. V. Stepanchikov, N. G. Fatjanova
 Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, 3 B. Trekhsvyatitsky Lane,
 Moscow, 109028, Russia

The advantages and different possibilities of designing and developing multi multibeam electron-beam equipment brought by without defects, with low radiation exposure to the object to be processed in the manufacture of microelectronic devices, and computer cathode-ray optics and system integrators devices.

PACS: 07.30.Cy

Keywords: miniaturization of electron-beam equipment, multibeam system, multifunctional system, the radiation load, miniature vacuum pump assembly, coordinate table, introduced by defects.

Bibliography — 7 references.

Received December 23, 2010