

УДК 621.235.015

Миниатюрная система вакуумной откачки электронно-зондовых устройств

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

Рассмотрены перспективы создания миниатюрных электронно-зондовых устройств с использованием миниатюрных элементов вакуумной электроники. Представлены результаты проектирования и исследования миниатюрных базовых элементов электронно-оптических систем и откачных вакуумных средств. Рассмотрены принципиально новые подходы к проектированию миниатюрных электронно-оптических и вакуумных систем, позволяющие перейти к практическому использованию низковольтной техники, обеспечивающей снижение радиационной нагрузки на объект при высокой разрешающей способности, а также переход к технологии вакуумной микросистемной техники. Приведены новые миниатюрные системы вакуумной откачки для использования в данных устройствах.

PACS: 07.30.Cy

Ключевые слова: электронно-зондовые устройства, микросистемная электронно-лучевая техника, миниатюрная откачная система, безкорпусные вакуумные клапаны, миниатюрные вакуумные клапаны, насос на основе сплава накопителя водорода, сифонный насос, сифонно-поршневой насос, мембранный насос.

Васин Владимир Анатольевич, доцент.
Васичев Борис Никитович, профессор.
Степанчиков Сергей Валентинович, доцент, докторант.
Московский государственный институт электроники
и математики.
Россия, 109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3.
Тел. (495) 235-64-35.
E-mail: vasichtv@yandex.ru; vacuumwa@list.ru
Статья поступила в редакцию 20 декабря 2009 г.

© Васин В. А., Васичев Б. Н., Степанчиков С. В., 2010

Введение

Вакуумная микросистемная электронно-лучевая техника — это научно-техническое направление, целью которого является создание миниатюрных электронно-зондовых микросистем с заданными свойствами, структурой и геометрией, совокупность которых обеспечивает выполнение процессов эмиссии пучков заряженных частиц, их формирования и регистрации.

Мировой рынок микросистемной техники является наиболее динамичным, и ежегодный прирост продукции на нем составляет до 20 % по данным NTXUS (организации по проблемам развития микросистемной техники при Европейской комиссии). Перспективами развития вакуумной микросистемной электронно-зондовой техники (ВМЭЗТ) является создание миниатюрных устройств для осуществления процессов электронной литографии в микро-, нано-, микромеханике, а также для контроля над технологическими процессами с высокой разрешающей способностью, что особенно важно в нанотехнологических процессах.

Экономическая эффективность ВМЭЗТ определяется не только тем, что она должна базироваться на интегрально-групповых принципах производства с минимальным участием человека, но и тем, что исходя из геометрических размеров устройств вакуумной и ионно-плазменной электроники и простоты управления, она может широко использоваться в тех областях деятельности, где ранее не могла применяться подобная техника.

Широкая реализация ВМЭЗТ зависит от степени разработки теоретических и прикладных задач и овладения технологией изготовления миниатюрных функциональных элементов, таких как электронные пушки, электронные линзы и другие элементы вакуумной электроники.

В состав ВМЭЗТ входят такие составные части, как электронно-оптические системы (ЭОС), вакуумная откачная система, детекторы вторичных и отраженных электронов, электронные системы управления на базе микропроцессоров, дисплеи и источники питания.

К настоящему времени созданы электронные системы управления, дисплеи, детекторы вторичных и отраженных электронов, источники питания в миниатюрном исполнении и освоены промышленностью в серийном производстве благодаря развитию микроэлектроники.

Создание миниатюрных электронно-лучевых и ионно-лучевых устройств тормозится из-за отсутствия электронных линз, электронных пушек, систем отклонения электронного пучка и бланкирующих систем, являющихся составными частями ЭОС, а также систем вакуумной откачки в миниатюрном исполнении.

Электронно-оптическая система современного электронно- и ионно-лучевого оборудования, как правило, имеет высоту 450—900 мм и диаметр 90—150 мм, а в некоторых случаях еще большие размеры.

В настоящей работе основное внимание уделено концептуальному подходу к проектированию миниатюрных ЭОС (на первом этапе 10—30 мм в диаметре и около 100 мм в высоту, на втором —

значительное сокращение этих размеров), составляющих основу ВМЭЗТ для растровой электронной микроскопии и электронной литографии.

Элементы вакуумной микросистемной электронно-зондовой техники

Электронно-оптические системы ВМЭЗТ становятся чрезвычайно малой протяженности, что накладывает новые условия на процесс моделирования.

Для обеспечения требуемого увеличения (уменьшения) электронного изображения необходимо значительно увеличить апертуру пучков. Численный метод расчета и моделирования широкоугольных ЭОС [1, 2] позволяет увеличить апертуру и ток пучка.

Исследования показали, что для повышения эффективности пропускания потока заряженных частиц через низковольтную ЭОС с использованием широкоугольных апертур необходимо в первую очередь минимизировать сферическую и хроматическую абберации объектива. Одновременно ЭОС ВМЭЗТ становится чрезвычайно малой в диаметре, что дает возможность создавать блоки из многих ЭОС для многолучевых устройств, расстояния между которыми в принципе могут быть равными размеру чипа современных больших интегральных схем (БИС). Это позволяет вести экспонирование топологических слоев сверх БИС одновременно на множестве полей — чипах.

Таким образом, время экспонирования пластины, например диаметром 300 мм, может быть сокращено до времени экспонирования одного чипа размером 10×10 мм.

Управление всеми ЭОС может производиться от одной ЭВМ, что значительно повышает производительность оборудования электронной литографии, экономит производственные площади и средства на обслуживание чистых помещений, уменьшает привносимую дефектность изделий. Использование таких систем позволит производить 100-процентный контроль элементов топологии интегральных схем (ИС), благодаря чему можно значительно повысить процент выхода годных изделий [3—5].

Учитывая вышесказанное, на первом этапе проектирования ЭОС ВМЭЗТ было проведено моделирование электронных пушек, магнитных и электростатических электронных линз и других элементов ЭОС. Толщина электродов варьировалась в пределах 0,5—1,5 мм, а диаметры отверстий в электродах — 30—300 мкм. Расстояние между электродами изменялось от 100 мкм до 2 мм.

Пушки рассчитаны на ускоряющее напряжение 100—1000 В. Проектирование электронных пу-

шек, линз, квадр- и октуполей производилось с учетом требований планарной технологии с тем, чтобы иметь возможность получить результаты испытаний, которые затем будут служить прототипом таких же элементов в микроисполнении по методу МОП-технологии (металл—окисел—полупроводник). Такой подход к проектированию позволил выявить принципиально новые конструкции: электронных пушек, электронных линз, в частности, магнитных линз и квадруполей.

Получены основные характеристики миниатюрных электронных пушек (ток пучка и диаметр кроссовера в зависимости от геометрических размеров элементов пушек, апертурного угла пучка, ускоряющих напряжений и т. д.). На рис. 1 представлены некоторые конструкции мини-пушек, спроектированных для изготовления по планарной технологии.

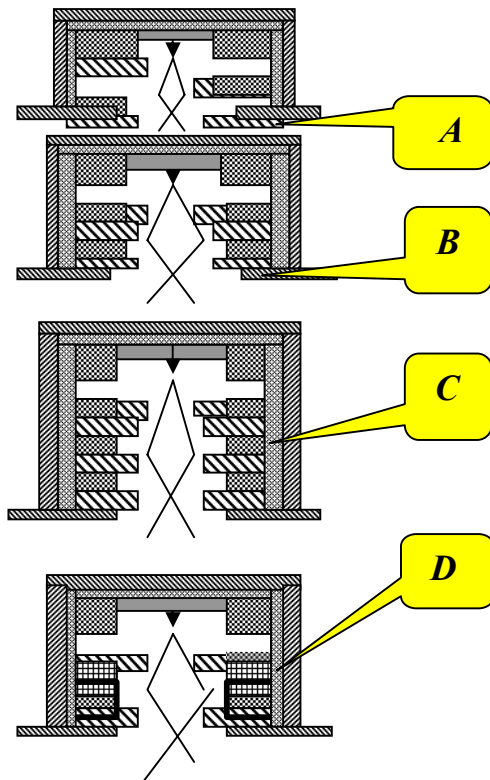


Рис. 1. Схемы конструкций миниатюрных электронных пушек:

A — триодная; B — тетродная; C — пентодная;

D — триодная с “замагничиванием” электронов магнитной линзой (электроды совмещены с магнитными полюсами)

В табл. 1 представлены результаты моделирования триодной электронной пушки в миниатюрном исполнении при ускоряющем напряжении 500 В, радиусе отверстия в управляющем электроде 30 мкм, радиусе кончика катода 5 мкм, углублении катода в управляющий электрод пушки 0,01 мкм, токе насыщения $0,3 \text{ А/см}^2$. Здесь же представлены зависимости размера кроссовера d_{cross} от апертурного угла пучка электронов α триодной пушки.

Таблица 1

Результаты моделирования триодной пушки

№ п/п	Потенциал на управляющем электроде U_{drive} , В	Ток пучка i , А	Диаметр кроссовера d_{cross} , мкм	Апертурный угол пучка α , рад.	Положение кроссовера z , мкм
1	-10	0,028	230	0,015	332,2
2	-20	0,025	190	0,020	224,0
3	-50	0,020	175	0,025	150,0
4	-100	0,010	122	0,031	95,2

Эти результаты хорошо согласуются с данными работ [6, 7]. Для оценки хроматической aberrации разброс по энергии (ΔU) принят равным 1,0 эВ. Аналогичные характеристики получены для других конструктивных вариантов электронных пушек в миниатюрном исполнении. В табл. 2 приведены результаты сравнительного aberrационного исследования мини-пушек.

Таблица 2

Коэффициенты aberrаций миниатюрных электронных пушек

Тип пушки	$U_{accel}/U_{drive}=0,2$		$U_{accel}/U_{drive}=6,0$		$U_{accel}/U_{drive}=30$	
	C_{sph} , мм	C_{ahr} , мм	C_{sph} , мм	C_{ahr} , мм	C_{sph} , мм	C_{ahr} , мм
A	150	100	140	31	10	5
B	96	50	87	16	6	3
C	100	25	100	25	100	25
D	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8

Термоэмиссионная мини-пушка снабжена эмиттером с утоненной частью на изгибе катода, позволяющей поддерживать постоянную температуру кончика эмиттера. Омическое сопротивление более тонкой части катода R_{KK} много больше сопротивления подводящих проводов R_{wire} : $R_{KK} \gg R_{wire}$. Это дает возможность дистанционно отслеживать изменение сопротивления катода R_{KK} и автоматически регулировать напряжение накала на утоненном его участке, что позволило организовать активную стабилизацию тока эмиссии.

Известно, что ток пучка увеличивается в пушках с так называемым “замагничиванием” электронов, однако физическое объяснение этого эффекта в литературе отсутствует.

Выполненное исследование [8] показало, что при “замагничивании” электронов выигрыш в токе пучка может составлять до 200 % с одновременным уменьшением диаметра кроссовера. Поэтому в данной разработке использовалась пушка с “замагничиванием” электронов. Обмотка возбуждения магнитной линзы хорошо изолирована от электродов катодной линзы. Эмиттер электронов, помещенный в магнитное поле, испускает электроны, магнитные моменты которых строго ориентированы вдоль силовых линий поля, и благодаря снижению гироскопического эффекта умень-

шается пространственный разброс электронов и можно добиться меньшего диаметра кроссовера пушки. Наибольший эффект достигается, когда кончик эмиттера находится в области максимальной напряженности магнитного поля. Коэффициент сферической aberrации такой системы $C_{sph} = 0,7$ мм, а коэффициент хроматической aberrации — $C_{chr} = 0,8$ мм.

Конструкции миниатюрных магнитных электронных линз также претерпели значительное изменение, некоторые конструкции таких линз показаны на рис. 2. Для изготовления по планарной технологии наилучшим образом подходит линза с незамкнутым с внешней стороны магнитопроводом. Исследование этих линз показало, что внешний немагнитный зазор почти не оказывает заметного влияния на их aberrации.

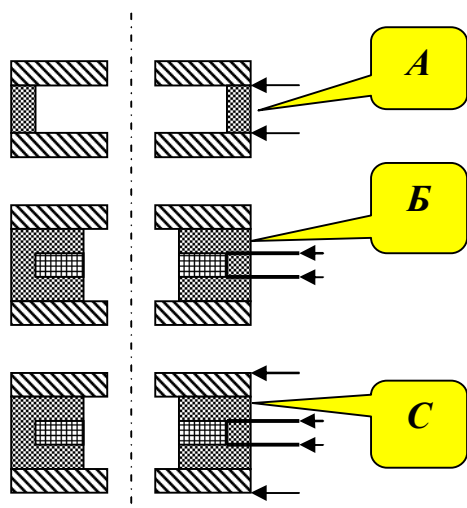


Рис. 2. Схемы миниатюрных линз:

A — электростатическая иммерсионная линза; *B* — магнитная с незамкнутым магнитопроводом; *C* — с совмещенными аксиально-симметричными полями, катушка возбуждения изолирована от электродов-магнитопроводов. (Стрелками показана подача напряжения на электроды и тока на катушки возбуждения)

Обмотка возбуждения линз также может изготавливаться по планарной технологии. На диэлектрическую подложку с хорошей теплопроводностью наносится металлическая пленка методом осаждения через маску или получается вытравливанием металла. Такой метод изготовления очень хорошо согласуется с изготовлением спирали из высокотемпературных сверхпроводников, так как они не обладают требуемой пластичностью.

Исследованы линзы с аксиально-симметричными совмещенными электрическими и магнитными полями, у которых магнитопровод выполняет две функции одновременно: как проводник магнитного потока и как электрод электростатической линзы.

Методом численного моделирования получены распределения магнитной индукции в зависимости

от плотности тока в катушках и конфигурации последних, необходимые для оптимизации конструктивных элементов.

Рассчитаны коэффициенты сферической и хроматической aberrаций для линз с разной конфигурацией магнитопровода при разном возбуждении обмотки. Погрешности счета определялись в основном погрешностью задания кривой намагничивания материала линзы. Исследования показали, что линзы с совмещенными полями обладают на порядок меньшими сферическими и хроматическими aberrациями.

Важным элементом устройств для осуществления электронной литографии являются окту- и квадрупольные, с помощью которых производится позиционирование электронных пучков, прерывание (бланкирование), юстировка ЭОС и компенсация астигматизма пучков. Впервые выполнен анализ влияния точности изготовления на электронно-оптические показатели этих устройств в миниатюрном исполнении.

В электронно-лучевом оборудовании для электронной литографии чаще всего применяют магнитные отклоняющие системы (ОС), иногда для повышения быстродействия — без магнитопровода. Для обеспечения быстродействия системы должны иметь малую индуктивность, что ограничивает число витков в отклоняющей системе. В миниатюрных ЭОС невозможно использовать катушки с большим числом витков, планарная технология не позволяет их изготавливать. Очевидно, что в этом случае в миниатюрных низковольтных устройствах можно ограничиться маловитковыми катушками отклонения электронного пучка либо применить другой тип отклоняющих систем.

Из-за ограниченности числа витков в ОС по технологическим причинам возможно изменение формы витка и, как следствие, нарушение симметрии отклоняющего поля, которое не может быть скомпенсировано за счет случайных отклонений в других витках и усреднения вызванных ими ошибок. Поэтому была проведена количественная оценка влияния этих ошибок при изменении геометрических параметров витков ОС на отклоняющее магнитное поле.

Окту- и квадрупольные ЭОС могут использоваться как в бланкирующих системах, так и в качестве системы сбора и фокусировки низкоэнергетичных отраженных или вторичных электронов в качестве датчиков в системе совмещения при электронной литографии.

Исследования показали, что максимальное значение ошибок в результате отклонения реального поля миниатюрных отклоняющих систем, состоящих из отдельных рамок, обтекаемых током, может составлять до 5,16 % от идеального поля.

При допуске на отклонение положения витков на 0,001 мм можно значительно уменьшить эту погрешность. Такие допуски были невыполнимы при механической сборке отклоняющих систем. Переход к планарной технологии позволяет с меньшими погрешностями воспроизводить положение витков отклоняющей системы. Если при планарном изготовлении проводников в плоскости подложки допуск на отклонение может быть реализован до 0,013 мкм (методом электронной литографии), то на протяженных проводниках вдоль оси Z (перпендикулярно к поверхности подложки) представляет определенные технологические трудности.

Наибольшая величина нарушения симметрии поля возникает при изменении длины одного или двух проводников, приводящих к перекосу отклоняющей рамки с током. Величина погрешности отклонения пучка может составлять до 48 %.

Аналогичное исследование проводили для явнопольной отклоняющей системы в микроисполнении. В этом случае анализировалось влияние искажения формы и расстояния между полюсами. При возможных допусках на воспроизведение формы полюсов современным оборудованием погрешности отклонения величины поля от идеального и отклонение от симметрии поля невелики (максимальная погрешность около 0,2 %). Наибольшее нарушение симметрии магнитного поля стигматора может составлять до 1000 %.

Нарушения симметрии в конструкции стигматора гораздо сильнее (в десятки раз) сказываются по сравнению с такими же нарушениями при изготовлении отклоняющих систем. Это объясняется тем, что поле рабочей области стигматора определяется разностью двух полей витков с током. При миниатюризации элементов систем отклонения пучка и стигматора резко возрастают погрешности создаваемого поля.

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод: при изготовлении миниатюрных электронно-оптических устройств в виде одновитковых отклоняющих систем и стигматоров необходимо особое внимание уделять их конструкции и технологии изготовления в целях обеспечения минимальных погрешностей управления позиционированием и обеспечения заданной формы сечения пучков.

Результаты этих исследований были использованы при проектировании ЭОС устройств ВМЭЗТ, ЭОС, содержащих электронные линзы с совмещенными полями. Анализ показал, что это позволяет увеличить силу тока в пучке в несколько раз. В отличие от известных классических схем, где используются линзы с совмещенными аксиально-симметричными электрическими и магнитными

полями, здесь мы имеем дело с совершенно иной конструкцией. В миниатюрном исполнении такая ЭОС легче реализуема в производстве, так как состоит из более простых конструктивных элементов.

В качестве видеоконтрольного устройства системы совмещения применяется компьютер с малогабаритным монитором.

Миниатюрные вакуумные откачные системы

Требования к откачной вакуумной системе в ВМЭЗТ снижаются по сравнению с требованиями к существующему высоковольтному оборудованию, так как вакуумный объем и длина электронного пучка значительно меньше. При вакууме, на порядок, а то и на два меньшем, чем в современных электронных микроскопах, вероятность столкновения заряженной частицы с атомами остаточных газов сильно уменьшается. Вакуумный канал одноканальной ЭОС и камера объектов имеют очень небольшой объем. Вакуумный канал ЭОС — до 5 мм³, камера объектов — 9—36 мм³. Для их откачки разработаны миниатюрные откачные системы модульного типа.

Коммутация осуществляется корпусными и безкорпусными миниатюрными вакуумными клапанами внешним диаметром $D = 10—20$ мм, при D_{eff} (внутреннем эффективном диаметре), составляющем $\approx 1/3D$. Клапаны оснащены интегрированным электромагнитным приводом и могут быть выполнены на упругодеформируемой мембране как нормально закрытыми, так и двухпозиционными на упругодеформируемой мембране с прощелкиванием [9].

Форвакуумная откачка может осуществляться сильфонными [10, 11] или сильфонно-поршневыми насосами [12, 13], оснащенными внешним электрическим или интегрированным электромагнитным приводом, а также мембранным [14]. Вакуумная откачка осуществляется мембранным насосом с жесткой упругодеформируемой (металлической) мембраной [15] с принудительным открытием всех клапанов. За счет колебаний мембраны частотой до 75 колебаний/с достигается производительность, эквивалентная производительности других механических насосов при несколько меньших размерах, и вакуум 10^{-2} Па, при использовании такого же насоса в качестве форвакуумного — до 10^{-3} Па, что несколько удорожает стоимость конструкции.

Откачка может осуществляться насосом на основе сплава накопителя водорода путем продувки системы водородом на атмосферу и последующим поглощением оставшегося водорода.

Нагрев и охлаждение данного сплава производятся элементами Пельтье (или элементами на других термоэлектрических эффектах). Достигается вакуум до 10^{-1} Па, а при использовании параллельной ступени с обедненным сплавом накопителем водорода — до 10^{-4} Па. После 10—20 циклов насос требует подзарядки водородом. Конструкции насоса защищены заявками на изобретения [16, 17].

Сплавы накопителя водорода представляют собой интерметаллические соединения редкоземельных металлов из титаноникелевой группы, обладающих в определенном интервале температур высокими сорбционно-десорбционными свойствами в соответствии с реакцией $M_x + yH_2 \leftrightarrow M_xH_{2y}$, сопровождающейся выделением теплоты при образовании гидроида и поглощением — при его диссоциации. Этим процессом можно управлять в ту или другую сторону. При этом повышение давления газообразного водорода и понижение температуры смещают реакцию в сторону образования гидроида, а понижение давления и повышение температуры — его разложение.

Для термосорбционных компрессоров, формирующих рабочее давление 0,5—0,6 МПа, наиболее подходят два вида сплавов на основе TiFe и LaNi₅, которые по совокупности свойств наиболее полно соответствуют задаче создания эффективных пневмоисточников для приводов управляемой упругой деформации в диапазоне рабочих давлений при сравнительно низких температурах нагрева.

Изотермы абсорбции и десорбции водорода из сплавов на основе TiFe приведены на рис. 3.

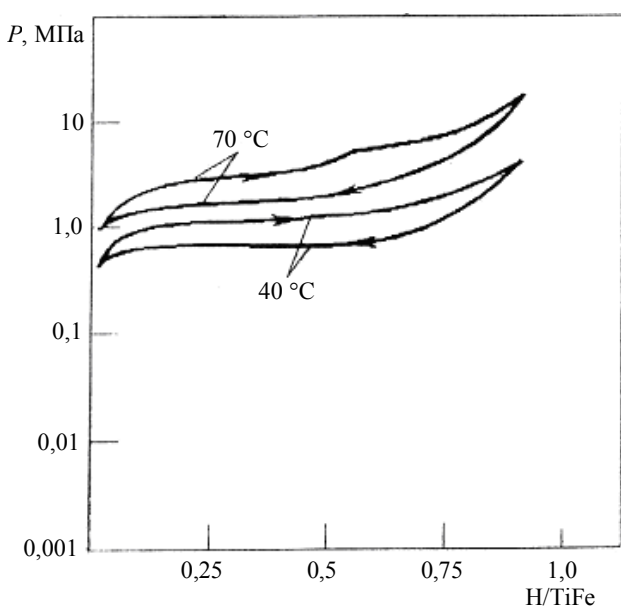


Рис. 3. Изотермы адсорбции (→) и десорбции (←) водорода для сплава TiFe

Конструктивная схема простейшего компактного малоинерционного термосорбционного ком-

прессора (рис. 4) состоит из герметичного корпуса и расположенной внутри него полупроводниковой пластины (или пакета пластин) с активированным покрытием порошком сплава — накопителя водорода. К пластине (или к пакету пластин) подается ток. При пропускании его в одном направлении пластины нагреваются и из покрытия выделяется (десорбируется) водород, при обратном направлении тока пластины охлаждаются, и водород поглощается (сорбируется). Нагрев и охлаждение пластин при изменении направления проходящего через них тока основаны на эффекте Пельтье.

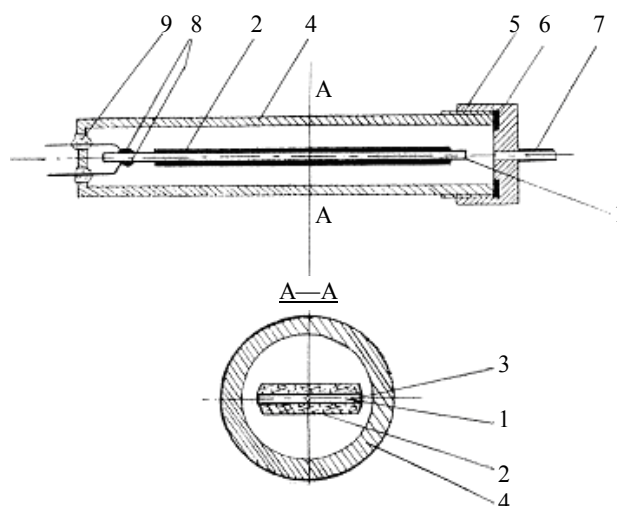


Рис. 4. Схема термосорбционного компрессора на основе сплавов накопителей водорода с использованием эффекта Пельтье:

- 1 — полупроводниковая пластина;
- 2 — активированное покрытие сплавом—накопителем водорода;
- 3 — электроизоляционный слой;
- 4 — корпус;
- 5 — крышка;
- 6 — уплотнитель;
- 7 — штуцер для выхода десорбируемого газа;
- 8 — проводящие контакты;
- 9 — герметичные электрические вводы

Расчет термосорбционных источников давления

Расчет термосорбционных источников давления — компрессоров сводится к определению массы порошка сплава накопителя водорода и объема рабочей полости пневмоисточника при заданном уровне потребляемого давления.

Количество требуемого сплава—накопителя водорода (СНВ) зависит от соотношения величины объема присоединяемого объекта-привода управляемой упругой деформации и каналов подачи выделившегося водорода от термосорбционного компрессора до исполнительного звена. Количество выделившегося газа зависит от газосодержания СНВ и скорости десорбции, которая заранее известна.

Для решения задачи воспользуемся уравнением состояния:

$$P_1 V_1 = P_0 V_0, \quad (1)$$

где P_1 — нормальное давление;
 V_1 — объем выделившегося газа (водорода), приведенный к нормальному давлению;
 V_2 — объем пневмоисточника;
 P_2 — уровень рабочего давления в термокомпрессоре.

Объем выделившегося водорода определяется из выражения

$$V_1 = V_{spH_2} m \tau, \quad (2)$$

где V_{spH_2} — удельная скорость десорбции водорода, л/мин;
 m — масса порошка СНВ в составе покрытия;
 τ — продолжительность процесса десорбции.

Из уравнений (1) и (2) следует

$$P_1 V_{spH_2} \cdot m \tau = P_2 V_2, \quad \text{т. е. } m = P_2 V_2 / (P_1 V_{spH_2} \tau). \quad (3)$$

В зависимости (3) объем V_2 задается из конструктивных соображений. Быстродействие системы складывается из трех составляющих, т. е.

$$t = \sum_{i=1}^{i=3} t_i,$$

где t_1 — время заполнения системы сжатым газом, выделившимся из СНВ, т. е. время десорбции до требуемой величины давления;
 t_2 — время срабатывания привода управляемой упругой деформации;
 t_3 — время затухания колебаний после взаимодействия с устройством позиционирования.

Расчет быстродействия привода при использовании в качестве энергоносителя водорода показал увеличение быстродействия в пять раз, что было подтверждено экспериментально. Таким образом быстродействие приводов фактически ограничивается быстродействием термосорбционного компрессора.

Формирование рабочего элемента

Обычно активированный сплав—накопитель водорода представлен в форме мелкодисперсного порошка. Для формирования рабочего элемента термосорбционных компрессоров получали композиционный материал из сплава—накопителя водорода и полимера.

Так, для TiFe смесь порошков сплава накопителя водорода и полимера формовали и спекали под нагрузкой в водородной печи с давлением водорода 30 МПа при температуре 250—350 °С в зависимости от вида полимера. Для улучшения механических характеристик рабочего элемента в смесь добавляли волокна полимера диаметром 0,05—0,3 мм, что позволяло их сохранять и после 10^4 циклов.

Для особоответственных конструкций рабочий элемент формировали из волокон полимера, в которые был впечен мелкодисперсный сплав — накопитель водорода.

Заключение

Принципиально новый подход к проектированию электронно-зондовых устройств является перспективным для развития микросистемной электронно-зондовой техники, используемой в технологии изготовления изделий микро-, наноэлектроники и микромеханики.

Исследование элементов ВМЭЗТ позволило выявить наиболее пригодные конструкции для перехода к микротехнологии изготовления устройств ВМЭЗТ. Эта техника может служить базой для создания и массового применения миниатюрных низковольтных растровых электронных микроскопов. Эти приборы могут быть незаменимыми для медиков, биологов, геологов, металлургов и др. Использование электронов низких энергий значительно снижает радиационную нагрузку на исследуемый или обрабатываемый объект, а значит, позволяет выполнять неразрушающий контроль и диагностику объектов или экспонировать электронорезист в технологическом процессе электронолитографии с использованием чувствительных к радиационным нагрузкам материалов.

Малые размеры ВМЭЗТ дают возможность применять их непосредственно в технологических камерах для контроля над технологическим процессом или для выполнения технологического процесса, например при многопучковой электронной литографии.

Л и т е р а т у р а

1. Васичев Б. Н., Розенфельд Л. Б., Михальцов Е. Н. // Прикладная физика. 1996. № 3. С. 28—37.
2. Васичев Б. Н., Розенфельд Л. Б., Михальцов Е. Н. // Там же. 1997. № 2—3. С. 166—168.
3. Васичев Б. Н. // Там же. 2000. № 2. С. 73.
4. Васичев Б. Н.: Тез. докл. XX Российской конф. по электронной микроскопии. — Черноголовка. 2004. С. 78.

5. Васичев Б. Н. Анализ электронно-оптических систем с позиций волновой модели электрона. Поверхность. — М.: Наука, 2005. С. 78.
6. Tuggle W., Swanson L. W.//J. Vac. Sci. Technol. 1985. No. B3 (1). P. 220.
7. Tuggle W. et al.//Journal of Microscopy. 1985. No. 140. P. 293.
8. Васичев Б. Н. Моделирование элементов вакуумной электроники с позиций волновой электронной оптики: Матер. XIII науч.-техн. конф. "Вакуумная наука и техника", октябрь 2006. С. 20—24.
9. Васин В. А.: Пат. на изобретение 2275541.
10. Александрова А. Т., Васин В. А. и др.: Пат. на изобретение 2251024.
11. Ануфриева И. В., Васин В. А. и др.: Пат. на изобретение 2260712.
12. Александрова А. Т., Васин В. А. и др.: Пат. на изобретение 2263820.
13. Александрова А. Т., Васин В. А. и др.: Пат. на полезную модель 38750.
14. Кеминев В. Н., Горюнов А. А. Васин В. А.: Пат. на полезную модель 48206.
15. Васин В. А.: Пат. на изобретение 2267648.
16. Васин В. А.: Пат. на изобретение 219121.
17. Васин В. А.: Пат. на изобретение 2191922.

Miniature system of creation of vacuum of electronic-probe devices

V. A. Vasin, B. N. Vasichev, S. V. Stepanchikov

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, 3, B. Trekhsvyatitel'skiy truded,
Moscow, 109028, Russia

E-mail vacuumwa@list.ru; vasichev@yandex.ru

Prospects of creation of tiny electron-beam systems. Designs of tiny base elements of electron-optical systems are submitted. Including a magnetic lens with open-ended of the core and lenses with combined electric and magnetic fields at which the core simultaneously carries out functions of electrodes of an electrostatic lens. Results of their research are resulted. Results of research high-speed 1 coil rejecting systems without the core and with the core, and also stigmator are submitted. Essentially new approaches to designing tiny electron-optical systems which allow to increase efficiency of formation of electronic beams are considered and to provide transition to manufacturing techniques of vacuum micro system technical equipment and nana technology. The new tiny vacuum systems for use in the given devices are given.

PACS: 07.30.Cy

Keywords: electron probe devices, cathode-ray micro device, miniature vacuum system, frameless vacuum valve, miniature vacuum valve, metalhydride vacuum pump, the bellows vacuum pump, the bellows-bucket vacuum pump, the membrane vacuum pump.

Bibliography — 17 references.

Received 20 December 2010