МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ ДЛЯ ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

проф. ¹Карпович С.Е., маг. ¹Кузнецов В.В., студ. ¹Войтов А.Ю.

¹УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск

Введение. Технической основой средств вычислительной техники, систем управления и связи, бытовой радиоэлектронной аппаратуры и т.п. являются изделия электронной техники, такие как большие (БИС) и сверхбольшие (СБИС) интегральные схемы, гибридные интегральные схемы (ГИС), печатные платы. Развитие электронной техники, в особенности наиболее интенсивно развивающейся ее части – микроэлектроники, влечёт за собой развитие соответствующих областей электронного машиностроения и наоборот, появление оборудования нового уровня позволяет осваивать в производстве новые изделия электронной техники. Каждый этап перехода на новый уровень технических параметров изделий радиоэлектроники и их компонентов – будь то создание нового поколения элементной базы, повышение плотности топологии на печатной плате или улучшение качества изображения телевизионной трубки – сопровождается освоением новых или усовершенствованием существующих технологических процессов и нового или усовершенствованного оборудования.

Основой технологии микроэлектроники, как известно, являются процессы фотолитографии, используемые для формирования изображений оригиналов топологии на фотошаблонах и для проекционного переноса этих изображений на кремниевые пластины и другие подложки [1, 2].

Процесс развития фотолитографии представляет собой последовательный переход к обеспечению производства интегральных схем с топологическими элементами все меньших размеров. Так с шестидесятых годов до нашего времени микроэлектроника в своём развитии прошла путь от схем с минимальным элементом 10 мкм до 0,065 мкм, а в экспериментальном освоении 0,045 мкм.

Проекционные системы высокого разрешения. Показатели назначения проекционных систем высокого разрешения оптико-механического оборудования микроэлектроники определяются точностью изготовления оптических элементов, точностью позиционирования их в оптической системе и стабильностью поддержания этих параметров в течение времени жизни проекционной системы [2, 3]. В настоящее время фирмы-изготовители проекционных систем высокого разрешения используют специальное технологическое оборудование для юстировки положения оптических элементов. Основной принцип наладки проекционных систем с помощью этого оборудования заключается в подгонке размеров оправок оптических элементов для того, чтобы исключить перекосы, заклоны, несовмещение оптических осей, устранение зазоров при установке в основной корпус конструкции проекционной системы. Такая технология может обеспечить наладку изделия в требуемом диапазоне показателей назначения на момент изготовления. При эксплуатации геометрия проекционной системы подвержена тепловому (динамическая составляющая) и временному (постоянная составляющая) дрейфам, при этом координаты позиционирования оптических элементов могут выйти за допустимые пределы, обеспечивающие показатели назначения проекционной системы: разрешающая способность, глубина резкости и контрастности изображения, дисторсия.

Проекционные системы конструктивно очень сложны и содержат весьма дорогие объективы с большим количеством линз. Так, современный объектив фотолитографического оборудования имеет длину до 1 м и вес до 1000 кг.

Только сборочный процесс изготовления фотолитографического объектива включает многоэтапную процедуру сборки и разборки с подгонкой и юстировкой оправок линз по схеме, представленной на рисунке 1.

Дальнейшее совершенствование оптических систем фотолитографического оборудования уже становится практически невозможным только за счет повышения качества и точности изготовления и сборки оправок с линзами. Необходимы новые решения, приводящие к автоматической адаптивной юстировке оптических элементов объектива без выполнения многоэтапной процедуры сборки и разборки с соответствующей подгонкой посадочных мест оправок. Нами предложено решение этой проблемы на основе использования системы перемещений на управляемом многокоординатном кольцевом приводе прямого действия [4] и механизме параллельной кинематики с шестью степенями свободы.



Рис. 1. Схема сборки фотолитографического объектива

Взамен традиционной схемы сборки объектива, описанной выше, нами предлагается все юстировочные операции корректировки положения и ориентации линз осуществлять в автоматическом режиме в собранном объективе за счет использования компьютерно-управляемой системы малых пространственных перемещений в виде двух кинематически связанных колец, встраиваемых в объектив взамен одной оправки [5].

Системы перемещений на кольцевом приводе. Рассмотрим исполнение интегрированной системы многокоординатных перемещений на кольцевом сегментном приводе в проекционных системах фотолитографического оборудования для юстировочных перемещений оправок с линзами. Для этого в конструкцию проекционной системы может быть встроен механизм стабилизации координат позиционирования оптических элементов, позволяющий подстраивать их при сборке и в процессе работы изменении геометрии проекционной системы и расположения оптических элементов вследствие «старения». В результате специальные адаптивные механизмы позиционирования позволят поддерживать на требуемом уровне показатели назначения. При этом для каждого подстраиваемого оптического элемента адаптивный механизм позиционирования предлагается делать на основе исполнительных механизмов с шестью или меньшим числом степеней свободы кольцевого типа с сегментными электромагнитными модулями.

При этом одно кольцо устанавливается неподвижно по отношению к корпусу объектива, а другое с линзой связывается с ним посредством механизма параллельной кинематики на кольцевом многокоординатном синхронном приводе. Такая компоновка объектива позволяет реализовать юстировку оптической системы в автоматическом

режиме в любое время в процессе эксплуатации оборудования. Возможна также реализация адаптивного режима управления многокоординатным приводом по граничным характеристикам глубины резкости, контрастности изображения, дисторсии и разрешающей способности оптической системы. Структурная кинематическая схема такой системы перемещений показана на рисунке 2.

Подвижное кольцо при этом используется для установки на нем оправки с оптическим элементом. В результате конструктивно и кинематически обеспечивается возможность управляемого (в том числе и адаптивного) позиционирования отдельных оптических элементов, в общем случае, с шестью степенями свободы, в небольшом, но достаточном для юстировки оптической системы диапазоне изменения координат как линейных перемещений x, y, z, так и угловых $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$, задаваемых в координатной системе конкретного оборудования.



Рис. 2. Система перемещений с шестью степенями свободы 1, 2, 3, 4, 5, 6 – подвижные сегменты; 7, 8, 9, 10, 11, 12 – шатуны; 13 – платформа; 14 – кольцевой статор; A₁, A₂, A₃, – двойные сферические соединения платформы и шатунами

Необходимые малые изменения координат при реализации адаптивной юстировки позволяют легко встраивать исполнительный механизм позиционирования в конструкцию проекционной системы, конфигурируя его в виде двух колец, одно из которых неподвижное в корпусе с электромагнитными модулями движения, а другое подвижное с оправкой для оптического элемента, управляемое через промежуточные кинематические цепи или элементы в виде шатунов со сферическими парами, эксцентриков или клиновых преобразователей.

Алгоритмизация и имитационное моделирование системы перемещений. В основе алгоритмов управления исполнительным манипулятором интегрированной перемещений лежат аналитические зависимости, связывающие системы кинематические характеристики задаваемых движений на каждом подвижном сегменте многокоординатного двигателя с тремя линейными x, y, z и тремя угловыми φ, θ, ψ обобщенными координатами перемещаемой каретки в трехмерном пространстве. Такие аналитические зависимости получают при решении прямой и обратной задач кинематики, для которых ранее [4, 6] были предложены математические модели описания топологии и кинематики рассматриваемого манипулятора, обеспечивающего требуемые положение и ориентацию подвижной системы координат каретки по отношению к неподвижной системе координат статора гибридного синхронного двигателя. Как следует из принятой расчетной модели, взаимное положение этих систем координат зависит одновременно от всех кинематических связей и текущих обобщенных координат.

Разработанный алгоритм решения прямой задачи кинематики основывается на равенстве матрицы M_1 текущего кинематического состояния исполнительного механизма, записываемой в виде:

$$M_{1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
(1)

матрице M_2 , описывающей положение и ориентацию подвижной каретки:

$$M_{2} = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\theta & -\sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\sin\theta\sin\psi & \sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\sin\theta\cos\psi & x_{0} \\ \sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\cos\psi + \sin\varphi\sin\theta\sin\psi & -\cos\varphi\sin\psi + \sin\varphi\sin\theta\cos\psi & y_{0} \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\psi & z_{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
(2)

где a_{ij} (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3) – элементы матрицы, рассчитываемые по значениям обобщенных координат привода и конструктивным параметрам механизма, которые определяются по формулам, полученным в работе [4]; φ, θ, ψ , x_0, y_0, z_0 – угловые и линейные независимые координаты, задающие положение и ориентацию рабочей каретки в трехмерном пространстве.

На основании условия равенства матриц M_1 и M_2 получены в явном виде формулы решения прямой задачи, состоящей в расчете текущих линейных (x_0 , y_0 , z_0) и угловых (φ, θ, ψ) координат рабочей каретки в системе координат статора в виде:

$$x_{0} = a_{14}; \quad y_{0} = a_{24}; \quad z_{0} = a_{34}; \quad \sin \phi = \frac{a_{21}}{\sqrt{a_{11}^{2} + a_{21}^{2}}}; \quad \cos \phi = \frac{a_{11}}{\sqrt{a_{11}^{2} + a_{21}^{2}}}; \\ \sin \theta = -a_{31}; \quad \cos \theta = \sqrt{a_{11}^{2} + a_{21}^{2}}; \quad \sin \psi = \frac{a_{32}}{\sqrt{a_{11}^{2} + a_{21}^{2}}}; \quad \cos \psi = \frac{a_{33}}{\sqrt{a_{11}^{2} + a_{21}^{2}}}.$$
(3)

Нетрудно видеть, что формулы (3) обеспечивают однозначный алгоритм решения прямой задачи кинематики и полностью соответствуют требованиям реализованной системы управления.

Для решения обратной задачи кинематики [7, 8] методами аналитической геометрии нами получены формулы расчета координат положения подвижных сегментов 1, 2, ..., 6 в зависимости от текущего положения каретки, задаваемого координатами точек C_1 , C_2 , C_3 (рисунок 3).



Рис. 3. Расчетная структурно-кинематическая схема исполнительного манипулятора: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – сегменты двигателя; 7, 8, 9, 10, 11, 12 – подвижные звенья кинематических цепей; 13 – рабочая каретка

Так, например, для точек $A_1(x_1, y_1)$ и $B_1(x_2, y_2)$ формулы расчета соответствующих координат имеют вид:

$$x_{1,2} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2ac}; \quad y_{1,2} = \pm \sqrt{R^2 - x_{1,2}^2}, \tag{4}$$

где *a*, *b*, *c* – параметры, рассчитываемые по формулам:

$$a = 4\left(\left(x^{(C_1)}\right)^2 + \left(y^{(C_1)}\right)^2\right); \ b = 2Ax^{(C_1)}; \ c = A^2 - 4\left(y^{(C_1)}\right)^2 R^2,$$
(5)

где $x^{(C_1)}, y^{(C_1)}$ – координаты точки C_1 в неподвижной системе координат; A, R – конструктивные параметры механизма.

Координаты точек A_2 , B_2 и A_3 , B_3 определяются по формулам, аналогичным (4) и (5). При выборе решения учитываются условия бесколлизионной работы подвижных элементов манипулятора.



Рис. 4. Интерфейс программы моделирования:

1 – текущие координаты (x, y) привода; 2 – текущее состояние механизма; 3 – текущие координаты каретки; 4 – задаваемые координаты каретки; 5, 6 – параметры визуализации

Для моделирования прямой и обратной задачи кинематики рассматриваемого исполнительного манипулятора в среде MATLAB разработана программа интерактивной визуализации, интерфейс которой представлен на рисунке 4.

Проведенное компьютерное моделирование показало, что для таких систем перемещений с малым осевым размером калибровочные передаточные коэффициенты по всем шести координатам (трем линейным и трем угловым) в диапазонах перемещений: линейных до 1 мм, угловых до 1°, лежат в пределах от 0,01 до 0,02. Это значит, что координатное разрешение по линейным координатам при точности сегментного привода 1 мкм будет равно 10 нм, а угловое разрешение составит 5". А это вполне удовлетворяет современным и перспективным требованиям, предъявляемым к проекционной систем фотолитографического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Аваков, С.М. Автоматический контроль топологии планарных структур / С.М. Аваков ; науч. ред. С.Е. Карпович. Минск : ФУАинформ, 2007. 168 с.
- 2. Оптико-механические комплексы бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм / С.М. Аваков // Фотоника. 2007. № 6. С. 35–39.
- 3. Emilio, M.D.P. Microelectronics / M.D.P.Emilio Springer Int. Publishing, Switzerland, 2016. – 100 p.

- 4. Карпович, С.Е. Системы многокоординатных перемещений на механизмах параллельной кинематики : монография / С.Е. Карпович [и др.]; под ред. проф. С.Е. Карповича // Минск : Бестпринт, 2017. 254 с.
- 5. Huang, Z. Theory of parallel Mechanisms / Z. Huang, Q. Li, H. Ding // Springer, 2012 419 p.
- 6. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования : моногр. / В.В. Жарский [и др.]; под ред. д-ра техн. наук, проф. С.Е. Карповича // Минск : Бестпринт, 2013. 208 с.
- 7. Жарский, В.В. Системы прямого привода «Рухсервомотор» / В.В. Жарский // Оборудование: рынок, предложение, цены : промышленный журнал. – 2006. – № 02(110). – С. 90–97.
- 8. Литвинов, Е.А. Компьютерное моделирование прямой и обратной задачи кинематики пространственной системы перемещений с шестью степенями свободы в среде MATLAB/Simulink / Е.А. Литвинов, С.Е. Карпович, В.В. Жарский // Теоретическая и прикладная механика. 2008. Вып. 23. С. 112–117.