

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СТОЛИКА ЗОНДОВОЙ УСТАНОВКИ

Грицкевич Г.И., Жук Р.С., Лешко А.С., Пашкевич В.Э., Смолкин Ю.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ловшенко И.Ю. – ст. преподаватель кафедры МиНЭ

Аннотация: В работе представлен анализ методов позиционирования и фиксации направляющих и несущих систем предметного столика зондовой измерительной установки. Выявлены достоинства и недостатки каждого из рассмотренных подходов. Предложена система позиционирования, обеспечивающая оптимальное соотношение между точностью перемещений и максимальным рабочим ходом.

Введение

Проектирование систем позиционирования для зондовых установок требует выбора компонентов с оптимальными эксплуатационными характеристиками. При этом необходимо учитывать КПД, износостойкость элементов, достигаемую точность позиционирования, а также диапазон перемещений столика, соизмеримый с габаритами исследуемой подложки (в настоящей работе рассматриваются подложки диаметром 200 мм). Анализируются три типа систем: на основе пьезоэлектрического актуатора, на основе серводвигателя, а также гибридная конфигурация, объединяющая оба указанных устройства.

Системы позиционирования столика зондовой установки.

Биморфный пьезоэлектрический актуатор (БПА) представляет собой электрофизическое устройство, преобразующее электрическую энергию в механическую энергию деформации. Функционирование БПА базируется на обратном пьезоэффекте – явлении деформации материала с пьезоэлектрическими свойствами под воздействием приложенного электрического поля.

Конструктивно БПА состоит из двух спечённых пьезокерамических пластин с нанесёнными электродами. Пластины поляризуются во внешнем электрическом поле, приобретая пьезоэлектрические свойства. При подаче постоянного напряжения на электроды одна из пластин удлиняется, в то время как вторая сохраняет исходные размеры. В результате бипластина изгибается в сторону, причём величина прогиба пропорциональна приложенному напряжению [1].

В зависимости от взаимной ориентации векторов поляризации пластин различают последовательные и параллельные БПА (противоположно и однонаправленно поляризованные пластины соответственно).

БПА позволяет осуществлять позиционирование объектов с точностью до 1 мкм. При этом предпочтительным является параллельный тип актуатора, поскольку для него реализуема схема подключения, исключая деполяризацию одной из пластин (рисунок 1).

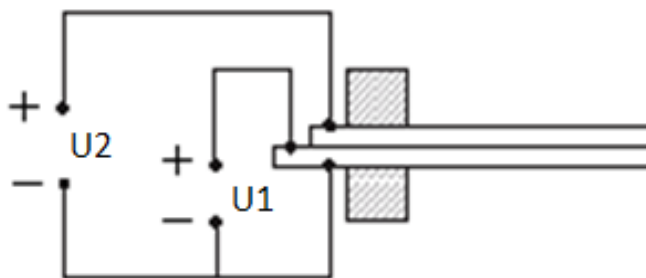


Рисунок 1 – Подключение параллельного БПА с избеганием деполяризации

Зависимость прогиба пластины от приложенного напряжения носит линейный характер, что упрощает управление позиционированием. Однако отсутствие обратной связи требует дополнительного визуального или аппаратного контроля. Основным ограничением является малый рабочий ход – до 5 мм, что при рассматриваемых размерах подложек не позволяет обеспечить необходимое перемещение. Следовательно, данный метод применим только для объектов, размеры которых сопоставимы с максимальным прогибом актуатора, и в рамках данной задачи от его использования следует отказаться.

Серводвигатель – это электромеханическое устройство, позволяющее изменять и контролировать положение своей подвижной части. В рассматриваемой конфигурации поступательное перемещение столика достигается за счёт преобразования вращательного движения вала серводвигателя с помощью винтовой передачи. По сравнению с БПА серводвигатели характеризуются более сложной, но и более экономичной системой управления.

Управление серводвигателями осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с периодом 20 мс. Длительность импульса определяет угол поворота вала (например, 1 мс соответствует 0° , 1,5 мс – 90° , 2 мс – 180°). Существуют как серводвигатели с ограниченным углом поворота (180° , 270° и т.д.), так и с неограниченным вращением (серводвигатели постоянного вращения). В последнем случае длительность ШИМ-сигнала задаёт скорость и направление вращения.

Система на основе серводвигателя обладает существенно большими габаритами, поскольку требует дополнительных компонентов: направляющих реек, резьбовых шпилек, подшипников скольжения, опорных кронштейнов и крепёжных элементов. Однако в отличие от метода с БПА она обеспечивает неограниченное перемещение по двум координатным направлениям.

В качестве направляющих реек оптимальным выбором являются шариковые направляющие. Благодаря циркуляции шариков в замкнутых каналах достигается низкий коэффициент трения, высокая точность позиционирования и плавность хода. Равномерное распределение нагрузки на все шарики обеспечивает повышенную износостойкость по сравнению с аналогами. К недостаткам следует отнести чувствительность к ударным нагрузкам и вибрациям, способным повредить дорожки качения, а также требование высокой точности монтажа – перекосы при установке недопустимы, так как могут вызвать заклинивание кареток.

Для обеспечения требуемой точности позиционирования в зондовой установке критическое значение имеют опорные подшипники шарико-винтовой передачи (ШВП). Предпочтительным является использование парных радиально-упорных шарикоподшипников, смонтированных по схеме «спина к спине» (дуплекс). Такая конфигурация обеспечивает высокую осевую жесткость, необходимую для исключения осевого люфта [2].

Резьбовые шпильки в конструкции установки выполняют функцию ответственных крепёжных элементов, фиксирующих каретки направляющих и опорные узлы ШВП на основании. Для сохранения геометрической точности всей системы необходимо применять шпильки повышенной прочности с гарантированной соосностью резьбовых отверстий.

Выбор крепёжных элементов при сборке зондовой установки должен обеспечивать повторяемость монтажа и виброустойчивость. Все резьбовые соединения дополнительно фиксируются с использованием анаэробных клеев средней прочности, предотвращающих самоотвинчивание под действием вибраций. Для крепления кареток к подвижному столу и опорных кронштейнов к основанию целесообразно использовать винты с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником, обеспечивающие высокий момент затяжки при компактных габаритах.

Объединение двух описанных подходов позволяет реализовать систему позиционирования типа «грубо – точно». Размещение столика вместе с БПА на подвижной каретке, закреплённой на направляющих винтах, даёт возможность совместить высокую точность с большим рабочим ходом. Контроль положения каретки может осуществляться дополнительным энкодером, для которого на одном из углов каретки будет установлен источник излучения, над которым нанесена более грубая оптическая шкала, смещённая от основной (нанесённая над самим столиком). При проектировании гибридной системы необходимо рассчитать нагрузки на направляющие винты, момент на валу серводвигателя, достаточный для перемещения каретки, силу прогиба БПА и упругость пружинных элементов, обеспечивающих плавное и регулируемое перемещение.

Ещё одним вариантом гибридной конфигурации является система с грубым позиционированием столика с помощью серводвигателей, в которой положение зондов корректируется пьезоактуаторами. Такое разделение функций снижает требования к жёсткости направляющих и уменьшает износ механических компонентов. Основным преимуществом является то, что массивная конструкция из кареток и столика не нагружается дополнительными БПА, а коррекция положения зондов происходит с минимальными задержками. Однако такая конфигурация не позволит независимо контролировать положения каждого зонда, и преимущества использования БПА в ней будут незначительными.

Заключение

Система, основанная только на пьезоактуаторах, не подходит для данного проекта, т. к. не обеспечит необходимого отклонения столика. Гибридная конфигурация окажется слишком сложной и громоздкой или не обеспечит гибкости в манипулировании зондами. Наилучшими характеристиками для позиционирования с заданными параметрами обладает система, основанная на серводвигателях постоянного вращения с шариковыми направляющими и ШВП. Имея относительно несложную конфигурацию, она обеспечит наиболее экономичное преобразование энергии, износостойкость, относительно высокую точность позиционирования и требуемый рабочий ход.

Список использованных источников:

1. Биморфные пьезоэлектрические элементы: актюаторы и датчики / В. Никифоров, В. Климашин, А. Сафронов // Компоненты и технологии, 2003. – С. 47-48.
2. Радиально-упорный шариковый подшипник – это надежное решение для осевых и радиальных нагрузок / INNER // Статьи INNER, 2024. – URL: <https://inner.su/articles/radialno-upornyy-sharikovyy-podshipnik-eto-nadezhnoe-reshenie-dlya-osevykh-i-radialnykh-nagruzok/> (дата обращения: 27.03.2026).