

## МИНИАТЮРНЫЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ МИКРОМАНИПУЛЯТОР

И. А. Кон, А. С. Ильин, А. Г. Коваленко

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

Статья поступила в редакцию 20 октября 2016 г.

**Аннотация.** В современной микро и наноэлектронике нередко возникает необходимость прецизионного позиционирования. В данной работе рассмотрен манипулятор с субмикронным позиционированием, габариты которого допускают размещение в камере растрового электронного микроскопа.

**Ключевые слова:** микроманипулятор, параллельный манипулятор, микроэлектроника, наноэлектроника, иммерсионная линза, электронный микроскоп.

**Abstract.** Precision positioning is a common task in modern micro- and nanoelectronics. In our case it was a precise placement of detector microchip on an immersion lense. A serial manipulator is a common choice for micromanipulation, however making a compact design is not an easy task. This paper covers a parallel sub-micron positioning manipulator, compact enough to fit in a scanning electron microscope vacuum chamber. The actuation is performed by pulling the sample by four tethers with stepper motors, and a worm drive. An ultimate expected precision is 60 nanometers. The positioning is done manually by the operator, controlled by the operator via SEM imaging. A further development may incorporate a fully automatic system with image recognition, and a proportional-integral positioning algorithm, and an addition of a shape memory or piezo effect micromanipulator to increase positioning precision to 1 nanometer.

**Key words:** micromanipulator, parallel manipulator, microelectronics, nanoelectronics, immersion lense, electron microscope.

### Введение

На данный момент микроманипуляторы весьма востребованы в разных областях науки, в первую очередь в биологии. В последнее время все больший

интерес микроманипуляторы приобретают в электронике для конструирования микро- и наносистем [1]. Задачи биологии, по большей части, имеют дело с размерами меньше 1 мкм и могут быть решены с помощью оптического контроля. Задачи микро- и нанoeлектроники часто выходят за рамки возможностей оптической микроскопии и требуют контроля с помощью других средств, например электронной микроскопии. Поскольку образец в электронном микроскопе должен находиться в вакууме, используемые микроманипуляторы должны быть достаточно компактны.

### **Постановка задачи**

В коллективе авторов возникла задача установить СВЧ микросхему в фокус иммерсионной линзы [2]. В данном случае это удлиненная полусферическая линза, с фокусом непосредственно на её поверхности. Согласно оценкам [3], точность позиционирования не должна быть хуже 20 мкм. Следует отметить, что покупка коммерческого стенда не рассматривается ввиду высокой цены и длительных сроков поставки. При традиционном подходе используется длиннофокусный микроскоп с увеличением 100x и двухкоординатный последовательный манипулятор в виде двух сопряженных платформ с микрометрическими винтами. Вначале определяется центр линзы посредством измерения координат точек на внешней окружности. Для этого необходимы индикаторы перемещения стола микроскопа. Далее микросхема устанавливается в центр линзы манипулятором. Следует отметить, что измерения и позиционирование с такой точностью весьма чувствительны к вибрациям. Таким образом, конструкция стенда становится довольно сложной, поскольку многие элементы работают на пределе точности.

Для достижения запаса по точности было предложено, вместо оптического микроскопа, воспользоваться растровым электронным. Растровый электронный микроскоп имеет ряд преимуществ, в первую очередь, это существенно большее увеличение и большая глубина фокуса. Современные электронные микроскопы оснащены прецизионным координатным столом, что

позволяет фокусироваться в декартовых координатах с большой точностью. Например, найти центр линзы по трем точкам не составляет труда. Основную сложность в применении электронного микроскопа представляет достаточно ограниченный объем вакуумной камеры. Стесненные условия не позволяют поместить последовательный манипулятор. Однако, параллельный манипулятор можно сделать достаточно компактным, учитывая пренебрежимо малые силы, необходимые для перемещения микросхемы.

## Принцип работы

На рисунке 1 представлена схема рассматриваемого параллельного манипулятора. Микросхема приклеивается парафином к кольцу, от которого идут четыре нити. Нити присоединены к валам червячных редукторов, которые приводятся в движение шаговыми двигателями. Шаговые двигатели управляются через драйверы микроконтроллером, который, в свою очередь, преобразует сигналы от энкодеров в управляющие импульсы, согласно кинематической модели [4,5].

Параллельные манипуляторы изучены достаточно хорошо, как теоретически, так и в ряде практических применений. Тем не менее, до сих пор не было предложено использовать параллельный манипулятор для микроперемещений. В то же время, описанная конструкция позволяет с легкостью осуществлять субмикронные перемещения. При дроблении шага на 16, шаговый двигатель делает один оборот за 3200 шагов. Червячный редуктор имеет передаточное число 1:50. Таким образом, в идеале, при диаметре вала 3 мм за один шаг нить изменяет длину на  $3\text{мм} * \frac{3,14}{50 * 3200} \approx 60\text{ нм}$ . В качестве нитей может быть использован сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности, обладающий очень большими значениями модуля Юнга и предела текучести. Для того чтобы компенсировать растяжение нитей, вводятся поправки в кинематическую модель, добавляющие натяжение при перемещении.

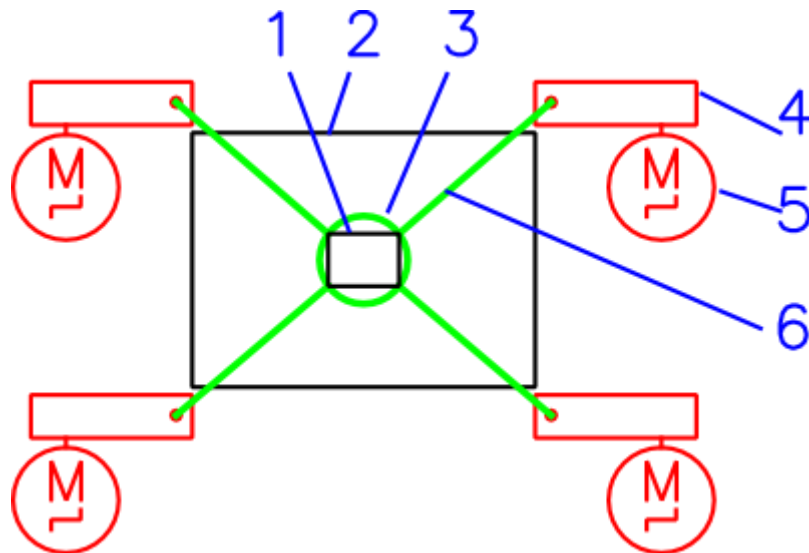


Рисунок 1- Схема микроманипулятора

- 1) позиционируемый объект 2) стол 3) кольцо 4) червячный редуктор  
5) шаговый двигатель 6) нить

### Дальнейшее развитие

На данном этапе управление и контроль осуществляется только в ручном режиме, но при необходимости, создать полностью автоматическую систему достаточно легко. Для этого нужна простейшая программная система обратной связи, анализирующая положение образца по изображению от РЭМ и подстраивающая положение образца. Для позиционирования целесообразно использовать алгоритм пропорционально-интегрирующего регулятора, т.к. точное математическое описание перемещения может быть затруднительным.

Если вместо кольца использовать платформу с прецизионными манипуляторами на базе пьезоэффекта или металла с эффектом памяти [6,7], возможно добиться еще большей точности позиционирования, вплоть до одного нанометра. В такой системе грубое перемещение будет осуществляться с помощью нитей, а тонкая подстройка манипуляторами на платформе.

### Заключение

Предложена конструкция параллельного микроманипулятора, позволяющая разместить его в камере сканирующего электронного микроскопа. Кинематические модели подобных манипуляторов хорошо

изучены, что позволяет достаточно просто запрограммировать систему управления. На данном этапе предполагается исключительно ручное управление, однако создание автоматической системы не представляет особой сложности. Использование дополнительных редукторов или добавление прецизионного звена в виде манипулятора на основе пьезоэффекта или металла с эффектом памяти позволит осуществить позиционирование с точностью до единиц нанометра.

### Литература

1. Du, E., Hongliang Cui, and Zhenqi Zhu. "Review of nanomanipulators for nanomanufacturing." *International Journal of Nanomanufacturing* 1.1 (2006): 83-104.
2. D. F. Filipovic, S. S. Gearhart and G. M. Rebeiz, "Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 41, no. 10, pp. 1738-1749, Oct 1993.
3. Uvarov, A. V., Shitov, S. V., Uzawa, Y., & Vystavkin, A. N. (2007). Tolerance Analysis of THz-range Integrated Lens Antennas. In *Proceedings of 2007 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2007)* (pp. 20-24).
4. Notash L. On the Solution Set for Positive Wire Tension With Uncertainty in Wire-Actuated Parallel Manipulators. ASME. *J. Mechanisms Robotics*. 2016;8(4):044506-044506-9.
5. GOSSELIN, C. (2014). Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives. *Mechanical Engineering Reviews*, 1(1), DSM0004-DSM0004.
6. Jain, R. K., Majumder, S., Ghosh, B., & Saha, S. (2015). Deflection control for piezoelectric actuator through voltage signal and it's application in micromanipulation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 62, 305-323.
7. Shelyakov, A. V., Sitnikov, N. N., Menushenkov, A. P., Koledov, V. V., & Irjak, A. I. (2011). Nanostructured thin ribbons of a shape memory TiNiCu alloy. *Thin Solid Films*, 519(15), 5314-5317.