

УДК 621.38, 539.23

САМОСОБИРАЮЩИЕСЯ ТРЕХМЕРНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ МИКРОУСТРОЙСТВА

Никита Сергеевич Смирнов, Анастасия Владиславовна Нечипоренко

Студенты 3 курса,

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Т. Каменихин

Доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Ключевые слова: самосборка (*self-assembly*), микроконтейнеры (*microcontainers*), микрозахваты (*microgrippers*)

Аннотация: В работе представлен обзор объёмных самособирающихся устройств. Описаны области их возможного применения и технология изготовления. Рассмотрены конструкции устройств и материалы для создания трёхмерных микроконтейнеров и микрозахватов.

Введение

Электронные технологии обладают особенностью решать нетрадиционные задачи для микро и нанотехнологий. Например, в медицине при употреблении лекарственного препарата только 1 % попадает в цель, остальные 99 % распределяются по организму и вызывают побочные действия. В настоящее время проблему локальной доставки лекарств пытаются решить с помощью контейнеров и захватов, по размерам не превышающих пылинку.

Задача, связанная с получением трехмерных объектов даже в субмиллиметровом масштабе, оказывается трудновыполнимой. Особенно, если при этом требуется массовость и экономичность производства. При использовании традиционных способов изготовления миниатюрных объёмных изделий, например, с помощью микрофрезерования, массовое производство таких изделий высокочастотн. Требуется иной подход к изготовлению и сборке трехмерных микроустройств, который позволит сочетать высокую производительность, точность и сравнительно небольшую стоимость.

Один из таких подходов заложен в природе электронных технологий. В электронной технике существуют методы создания двухмерных структур, которые достаточно хорошо изучены, высокопроизводительны и позволяют получать высокое разрешение. В работе [1] показана возможность применения планарной технологии для получения трёхмерных объектов за счёт сгибания или складывания исходных плоских структур. Возможности групповой обработки позволяют обеспечить массовость производства подобных объектов.

Целью данной работы является анализ технологических решений, позволяющих создавать миниатюрные микроконтейнеры и микрозахваты с использованием электронных технологий.

Конструкции миниатюрных транспортных устройств

В качестве транспортирующих микроконтейнеров могут быть использованы полые многогранные объекты: кубической или иной, более сложной, формы. На рис.1 показаны два подхода к созданию таких объектов на примере емкости 12-тигранной формы. Сборка такого объекта из 12 несоединенных друг с другом панелей (рис. 1а) требует использования специальных приспособлений и определённого навыка. Если предварительно соединить некоторые панели друг с другом, то, тем самым, можно существенно снизить трудоёмкость сборки (рис. 1б). Такой подход к сборке применим для получения полых контейнеров, имеющих форму многогранников, например, додекаэдра или куба (рис. 2). В этом случае

формы можно получить из заранее заготовленных разверток, элементы которых соединены между собой с помощью шарниров [1].

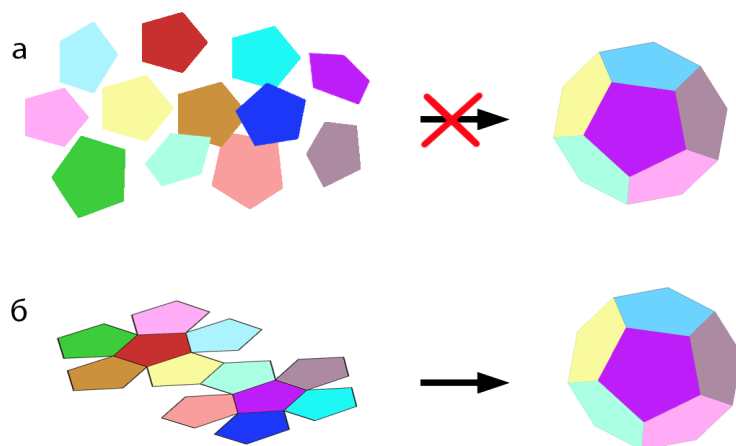


Рис. 1. Варианты сборки додекаэдра

а – сборка из несоединённых панелей;

б – сборка предварительно соединённых некоторых панелей

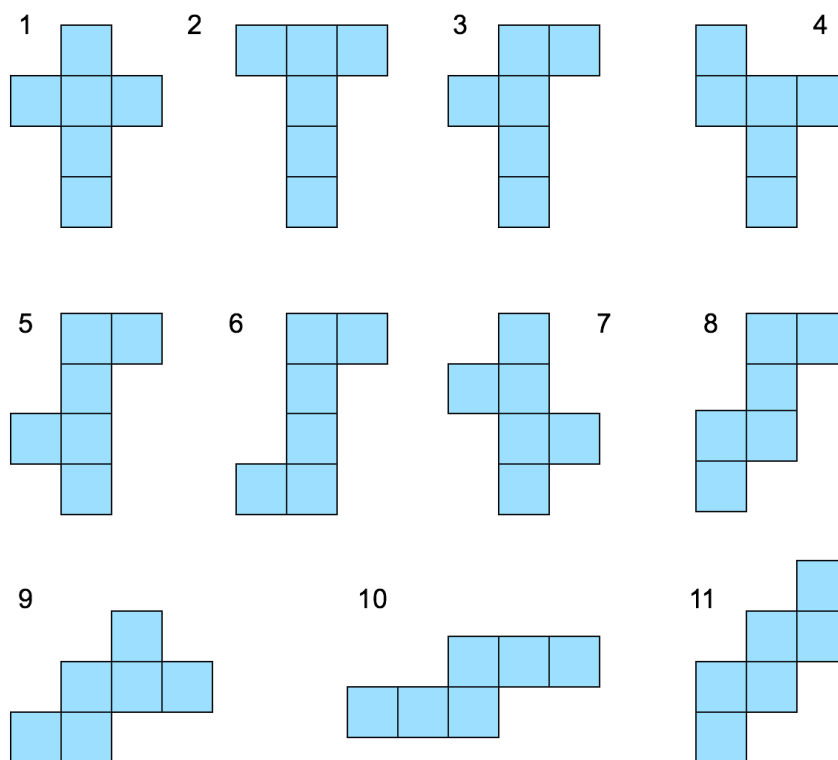


Рис. 2. Возможные варианты развёртки куба

Конструкция микрозахвата включает от трёх до шести конечностей, расходящихся из центрального многоугольника (рис. 3). Такая конструкция напоминает грейферный ковш. Когда устройству требуется захватить какой-либо предмет, его конечности сворачиваются или сгибаются в шарнирах. От конструкции таких микрозахватов требуется не только закрываться под каким-либо воздействием, чтобы захватить какой-нибудь объект, но и раскрываться, чтобы захват мог, перенести предмет из одного места в другое, его отпустить. [3] Микрозахваты принципиально отличаются от микроконтейнеров тем, что после проведения планарных технологических операций захваты уже готовы к использованию: не нужно проводить сборку

таких устройств, поскольку все нужные части изделия уже соединены между собой еще на двухмерном этапе производства. Остаётся только в нужный момент подействовать на материал захвата, чтобы привести его в действие и заставить его конечности сложиться, захватив какой-нибудь предмет.

Использование ферромагнитных материалов в конструкции микроустройств позволяет манипулировать ими с помощью магнитного поля и отслеживать их положение.

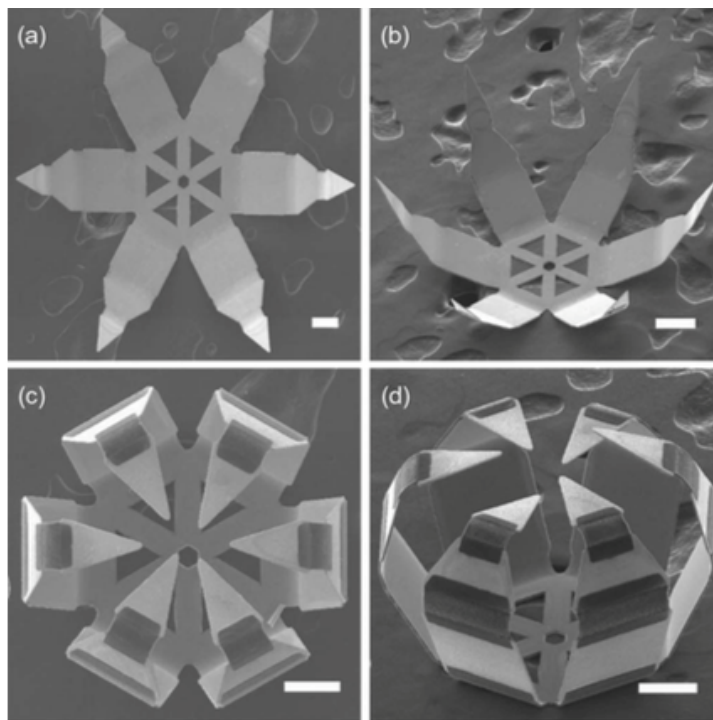


Рис. 3. Закрывающийся микрозахват с шестью конечностями [3]

Технология изготовления

Главная задача, которую необходимо решить, является создание возможности сборки без участия оператора или дополнительного исполнительного механизма. Необходимо «заставить» развертку собираться в трёхмерный многогранник, а конечности захвата сворачиваться или сгибаться.

Для создания микроконтейнеров могут быть использованы силы поверхностного натяжения. Это один из самых широко изученных методов для реализации перемещения на микроуровне. Силы поверхностного натяжения возникают в результате стремления поверхности минимизировать её свободную внутреннюю энергию, уменьшая площадь поверхности. Эти силы линейно зависят от характерной длины, а гравитационные силы кубически пропорциональны длине. В малых масштабах внутренние силы преобладают над гравитационными, поэтому такой метод вполне применим для изготовления изделий на микроуровне. Жесткие панели, соединенные между собой жидкой каплей расплавленного металла, перемещаются относительно друг друга под действием сил поверхностного натяжения расплава. Такая технология применяется в микро-опто-электромеханических системах [4]. Как только самосборка завершена, жидкие капли, выступающие в роли шарниров, охлаждаются и затвердевают. Таким образом можно получить сборные объёмные объекты.

На рис. 4 приведён пример изготовления микроконтейнеров кубической формы [5]. Такие изделия получили название «самособирающиеся».

Операции технологического процесса изготовления самособирающихся микроконтейнеров:

1. На подготовленную кремниевую подложку наносится жертвенный слой из полиметилметакрилата (ПММА).

2. Методом термического осаждения наносится слой хрома для увеличения адгезии и слой меди, который будет использоваться как электропроводящий слой.
3. Наносится слой фоторезиста и вскрываются области в форме панелей развертки микроконтейнера.
4. Методом гальванического осаждения наносится слой никеля, формируя панели.
5. Удаляется оставшийся фоторезист и наносится еще один слой фоторезиста.
6. В фоторезисте вскрываются области в форме шарниров и на краях панелей.
7. Гальваническим осаждением наносится припой из свинца и олова.
8. Удаляется фоторезист.
9. Травится слой меди, а затем слой хрома.
10. Растворяется жертвенный слой из ПММА, освобождая полученную развертку.
11. Двухмерная развертка нагревается для активации самосборки.

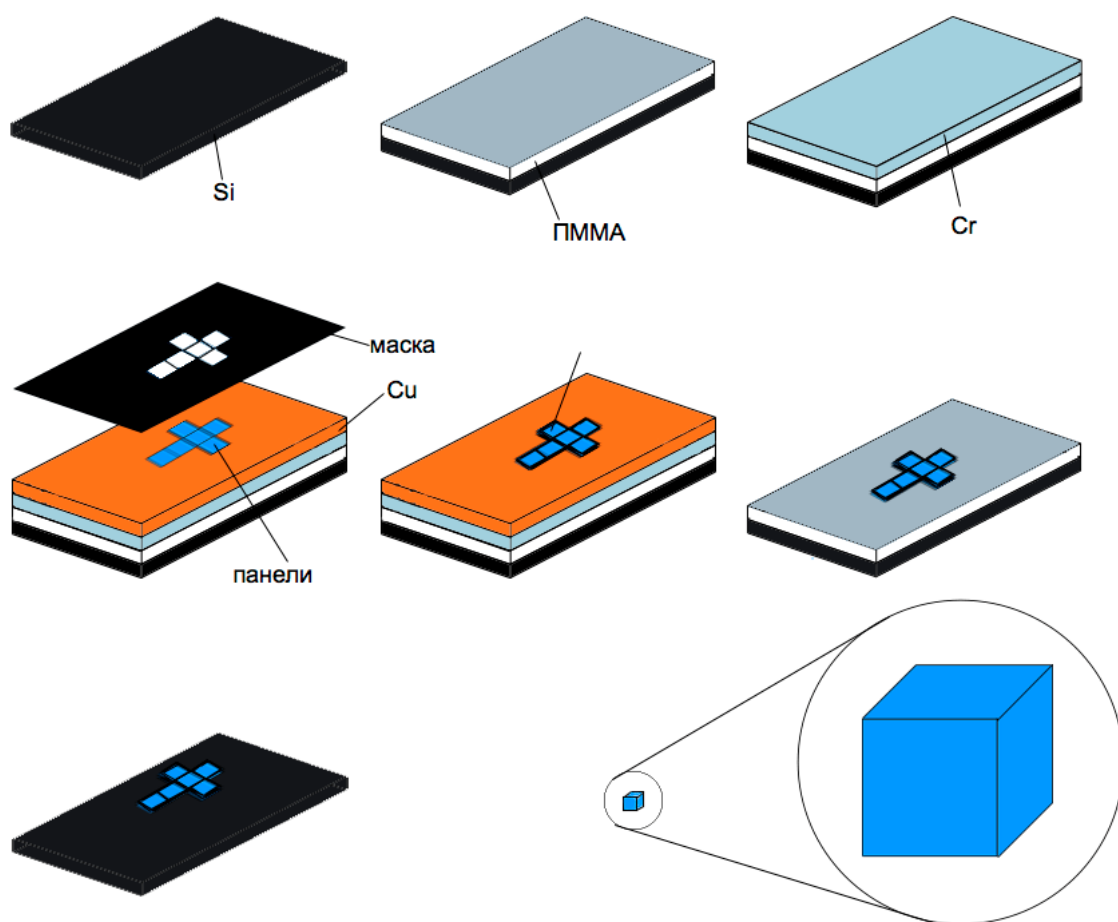


Рис. 4. Техпроцесс изготовления самособирающегося куба.

Для создания микрозахватов используется метод сборки, основанный на напряжении в тонких плёнках. При нанесении двух и более слоев тонких плёнок, в них могут возникать напряжения из-за разности коэффициентов термического расширения или из-за несогласования параметров кристаллических решёток осаждаемых плёнок и подложки. Нужной деформации добиваются формированием двухслойной конструкции из напряженного слоя и слоя, который несет поддерживающую функцию. При освобождении этих двух слоев от подложки, на которую они были нанесены, напряженная тонкая плёнка сжимается или растягивается из-за растягивающих или сжимающих напряжений соответственно, заставляя двухслойную конструкцию сворачиваться [1].

На рис. 5 приведена технологическая последовательность изготовления

термочувствительных микрозахватов [5].

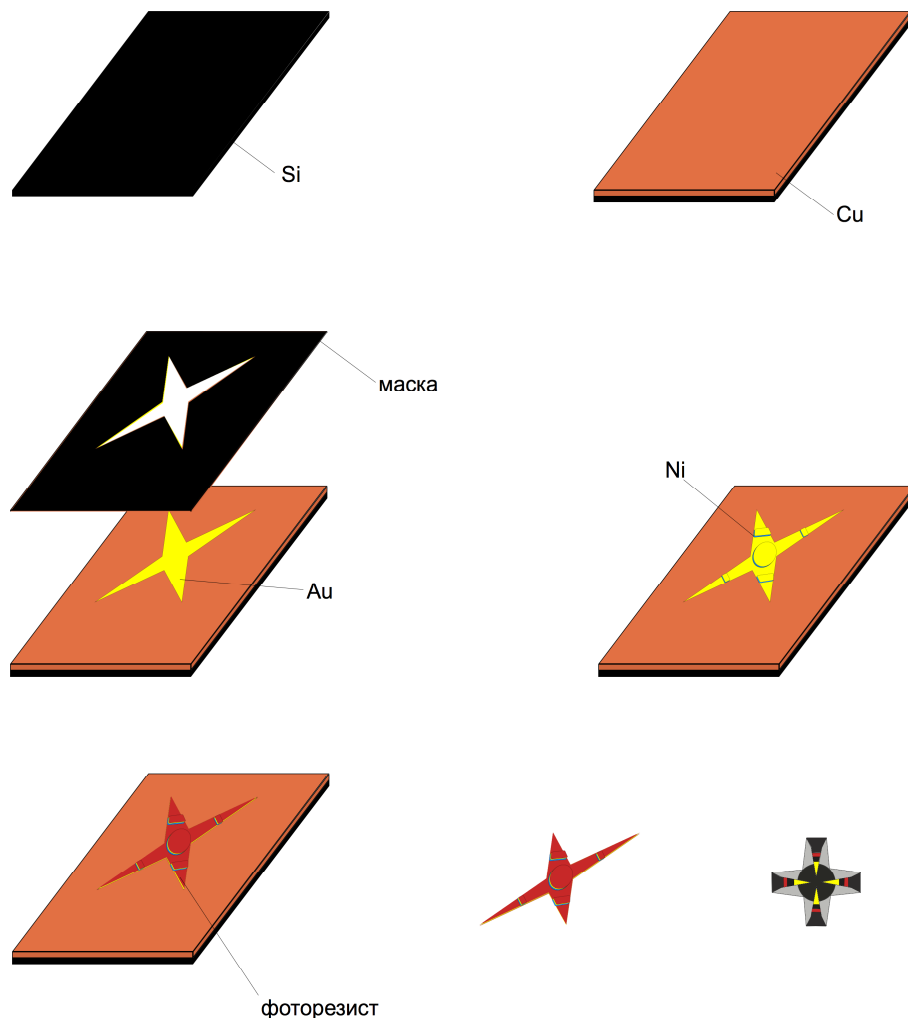


Рис. 5. Схематическое изображение процесса изготовления микрозахвата

1. На подготовленную кремниевую подложку термическим осаждением наносится слой хрома для увеличения адгезии и жертвенный слой меди.
2. Наносится фоторезист и в нем вскрываются области в форме микрозахвата.
3. Термическим осаждением наносится слой хрома и слой золота. Они будут заставлять конечности захвата сворачиваться. Остаточные напряжения сохраняются в слое хрома. Слой золота несёт поддерживающую функцию.
4. Удаляется оставшийся фоторезист и наносится ещё один слой фоторезиста, в котором вскрываются области для формирования основания микрозахвата.
5. Наносится слой никеля и золота гальваническим осаждением. Золото является защитным слоем для никеля при травлении меди.
6. Удаляется фоторезист и наносится новый слой фоторезиста, который выступает в роли слоя, активирующего процедуру самосборки.
7. Травится слой меди вплоть до момента отделения устройства от подложки.

Для закрытия захвата его помещают в воду температурой 37 °С.

Возможные области применения

Трёхмерные транспортные микроустройства могут найти применение в медицине, биологии и нанотехнологиях для захвата, перемещения и доставки в заданное место микрообъекта. Например, в области медицины микрозахваты могут использоваться при выполнении операции по изъятию объекта из кровеносной или пищеварительной системы, преодолевая витиеватую структуру кровеносных сосудов или множество изгибов кишечника.

Подобные микрозахваты могут использоваться не только для взаимодействия с биологическим материалом. Они могут переносить любой объект сопоставимого с ними размера. На данный момент таких инструментов не существует, но они могут оказаться полезными в работе с так называемой лабораторией на чипе (lab-on-a-chip), микрофлюидальными системами или для микросборки [3], [6].

Главным достоинством трёхмерных транспортных устройств является их высокая маневренность и автономность. Кроме того, они не могут нанести большого вреда окружающей их среде.

Заключение

Анализ технических решений, направленных на получение трёхмерных микроустройств, показал, что формирование таких объектов в субмиллиметровом диапазоне размеров возможен при использовании планарной технологии. Описаны конструктивные особенности устройств, которые позволяют преобразовывать плоские фигуры в объёмные.

Миниатюрность изделий ограничивает возможности использования человека-оператора или специальных приспособлений для сборки транспортных контейнеров. Проанализированы способы самосборки изделий.

Трёхмерные транспортные устройства в перспективе могут обрести широкое применение в таких областях науки как биология, медицина и нанотехнология, благодаря их миниатюрности, высокой маневренности и автономности.

Литература

1. *Leong T.G., Zarafshar A.M., Gracias D.H.* Three-Dimensional Fabrication at Small Size Scales // *Small*. 2010. Vol. 6, No. 7, P. 792–806. DOI: 10.1002/smll.200901704.
2. *Kaplan R., Klobušický J., Pandey S., Gracias D.H., Menon G.* Building Polyhedra by Self-Assembly: Theory and Experiment // *Artificial Life*. 2014. Vol. 20, No. 4, P. 409–439. DOI: 10.1162/ARTL_a_00144.
3. *Randhawa J.S., Leong T.G., Bassik N., Benson B.R., Jochmans M.T., Gracias D.H.* Pick-and-Place Using Chemically Actuated Microgrippers // *Journal of the American Chemical Society*. 2008. Vol. 130, No. 51, P. 17238–17239. DOI: 10.1021/ja806961p.
4. *Hong Y.K.* Surface tension self-assembly for three dimensional micro-opto-electro-mechanical systems. Diss. London. 2006.
5. *Pandey S., Gultepe E., Gracias D.H.* Origami inspired self-assembly of patterned and reconfigurable particles // *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*. 2013. No. 72, P. e50022. DOI: 10.3791/50022.
6. *Leong T.G., Randall C.L., Benson B.R., Bassik N., Stern G.M., Gracias D.H.* Tetherless thermobiochemically actuated microgrippers // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009. Vol. 106, No. 3, P. 703–708. DOI: 10.1073/iti0309106