

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЛОВУШЕК С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНИК SLA 3D ПЕЧАТИ И ГАЛЬВАНОПЛАСТИКИ

Лабуткин А.С. (Университет ИТМО), Белов Я.В. (Университет ИТМО),
Семьнин М.С. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – к.ф.-м.н., с.н.с. Щербинин Д.П. (Университет ИТМО)

Введение. В настоящее время, прецизионные сенсорные платформы на базе левитодинамических систем нашли применение в области квантовой физики, гравиметрии и астрофизики [1]. Электродинамические ловушки стали распространенной элементной базой для создания левитодинамических систем, так как они позволяют долговременно локализовывать заряженные микро- и наночастицы в ограниченном пространстве без прямого механического контакта с опорами или подвесами [2]. Характер движения локализованной “левитирующей” частицы в таком случае обуславливается ее взаимодействием с электрическим полем ловушки и действием внешних возмущений. В простейшем случае при локализации в воздухе заряженные микрочастицы будут совершать колебания на частоте электрического поля, создаваемого электродами ловушки. Принцип работы сенсоров на базе левитодинамических систем заключается в изменении динамического режима частицы под влиянием внешнего воздействия. Чем ближе реализованное на эксперименте распределение удерживающего поля к математической модели и чем лучше его воспроизводимость, тем стабильнее динамика частицы и, как следствие, выше чувствительность системы к внешним воздействиям. Качество электрического поля обуславливается параметрами электропитания и точностью изготовления электродов ловушки. В идеальном случае поверхность электродов должна повторять геометрию эквипотенциальных поверхностей математически рассчитанного удерживающего поля. Если геометрия электрода не совпадает с эквипотенциальной поверхностью, движение частицы в отсутствие внешних сил оказывается более сложным, в том числе нестабильным, что затрудняет ее анализ.

Методы изготовления электродов, актуальные на сегодняшний день, можно разделить на механические и литографические. Механические, к которым относятся токарная обработка и фрезеровка на станках с ЧПУ, требуют дорогостоящего оборудования, высокой квалификации оператора и могут быть ограничены вариативностью форм электродов. Помимо этого, вышеописанная техника требует дальнейшей взаимной юстировки деталей с высокой точностью. Метод фемтосекундной фотолитографии является более высокоточным и не требует последующей юстировки деталей, так как позволяет создавать монолитные конструкции из электродов [3]. Однако, такой подход требует уникального оборудования, что критически снижает распространение описанной технологии и значительно повышает экономические издержки. В связи с этим, актуальной задачей является разработка доступной и воспроизводимой технологии изготовления монолитных электродинамических ловушек с электродами сложной геометрии. Целью работы является разработка технологии создания электродов с использованием фотополимерной SLA 3D-печати и гальваноластики.

Основная часть. Предлагаемая технология создания электродов заключается в поэтапном формировании их структуры. При этом качество получаемых электродов определяется для каждого этапа набором параметров, оптимальные значения которых подбираются в ходе настоящей работы. Прототип электрода ловушки проектировался в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D. Детали ловушки были напечатаны из фотополимерной смолы D01S (Resione, Китай) на SLA 3D принтере Saturn 4 Ultra 16K (Elegoo, Китай). SLA 3D печать основывается на поэтапном формировании слоев

фотополимера под воздействием УФ излучения. Поверхность детали была охарактеризована методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе NTEGRA PRIMA (Нанотехнологии МДТ, Россия) в полуконтактном режиме. На поверхности было заметно большое количество выступов, перепад высот составил 3.8 мкм. На следующем этапе на заготовку был нанесен токопроводящий слой на основе графита методом аэрографии. Перепад высот на поверхности составил 5.9 мкм, поверхностное сопротивление графитового слоя – 800 Ом/см². Увеличение перепада высот обусловлено тем, что частицы графита оседали на уже сформированных выступах. Следующим этапом было нанесение меди гальваническим методом. Гальванопластика основана на осаждении ионов металла на токопроводящей поверхности детали под воздействием электрического тока. Для этого был подготовлен электролит из сульфата меди, серной кислоты, тиомочевины, хлорида натрия и деионизированной воды. В роли анода использовалась медная пластина с площадью поверхности 15 см², в роли катода – деталь ловушки с площадью поверхности 1 см². Осаждение меди производилось при токе 1 мА и напряжении 0.15 В в течение 18 часов до полного покрытия детали. Для электропитания системы использовался блок питания QJ3005H (Ningbo Jiuyuan Electronic, Китай). Для уменьшения количества выступов на поверхности детали была проведена химическая полировка в растворе ортофосфорной кислоты и калиевой селитры. Чтобы предотвратить окисление медного слоя, заключительным этапом стала гальванопластика никелем. Нанесение слоя никеля происходило в электролите из серноокислого никеля, серноокислого натрия, борной кислоты и деионизированной воды. В роли анода использовалась никелевая пластина с площадью поверхности 10 см². Параметры электропитания – 2 мА, 0.5 В в течение одного часа, далее сила тока была увеличена до 4 мА и нанесение продолжалось еще один час. Перепад высот составил 3.9 мкм, на поверхности детали не оказалось явных выступов.

Выводы. В настоящей работе была разработана методика создания электродов с помощью техник SLA 3D печати и гальванопластики. Определены оптимальные параметры электропитания, время формирования слоев и составы электролитов. Предлагаемая технология позволяет создавать не только монолитные электродинамические ловушки с меньшей ресурсозатратностью и технологической сложностью, но и конструировать произвольные сложные геометрии электродов. Ввиду этого, данная технология повысит доступность методов локализации частиц не только в направлении сенсорных систем, но также имеет перспективы в изучении химии поверхности микро- и наночастиц, масс-спектропии и микрокапельном синтезе.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 25-22-00694.

Список использованных источников

1. Moore D. C., Geraci A. A. Searching for new physics using optically levitated sensors //Quantum Science and Technology. – 2021. – V. 6. – №. 1. – P. 014008.
2. Paul W. Electromagnetic traps for charged and neutral particles //Reviews of modern physics. – 1990. – V. 62. – №. 3. – P. 531.
3. Xu S. et al. 3D-printed micro ion trap technology for quantum information applications //Nature. – 2025. – V. 645. – №. 8080. – P. 362-368.