

3. Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications / Darband G.B. [et al.] // J. Magnesium Alloys. – 2017. – Vol. 5, № 1. – P 74–132.
4. Plasma electrolysis for surface engineering / Yerokhin A.L. [et al.] // Surf. Coat. Technol. 1999, 122, 73.
5. Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A review / Lu X. [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2016. – Vol. 307, Part C. – P. 1165–1182.
6. Graphene: a new emerging lubricant / Berman D. [et al.] // Sumant, Materials Today. – 2014. – Vol. 17, № 1. – P. 31–42.
7. The effects of carbon-based additives on corrosion and wear properties of Plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Aluminum and its alloys: A review / Kazem B. [et al.] // Surfaces and Interfaces. – 2020. – Vol. 21. 100677.
8. Effects of the Graphene Additive on the Corrosion Resistance of the Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Coating on the AZ91 Magnesium Alloy / Baojun H. [at al.] // Int. J. Electrochem. Sci. – 2018. – Vol. 13. – P. 9166-9182.
9. Graphene and graphene oxide as new class of materials for corrosion control and protection: present status and future scenario / Chauhan D.S. [et al.] // Prog. Org. Coat. – 2020. – Vol. 147. 105741.
10. PEO of AZ31 Mg Alloy: Effect of Electrolyte Phosphate Content and Current Density / Hadzina B. [et al.] // Metals. – 2020. – Vol. 10, № 11. 1521.

СИСТЕМЫ МИКРОЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

С. А. Завацкий, А. В. Бондаренко

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
П. Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: s.zavatskij@bsuir.by*

Эффективное пространственное разделение многокомпонентных водных смесей различных веществ при помещении их в неоднородное электрическое поле достигается за счет баланса между системой противодействующих сил, связанных с электрокинетическими эффектами, такими как диэлектрофорез и электротермофорез. Показано, что этот баланс обеспечивается за счет использования массивов планарных металлических микроэлектродов со встречно-штыревой геометрией со сниженной площадью поверхности в совокупности с правильным выбором удельной проводимости водной среды и частоты приложенного электрического поля.

Ключевые слова: диэлектрофорез; электротермический эффект; микроэлектроды; полистироловые наночастицы.

MICROELECTRODE SYSTEMS FOR SEPARATION OF MACROMOLECULAR OBJECTS IN LIQUID MEDIA

S. A. Zavatski, H. V. Bandarenka

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki 6, 220013 Minsk, Belarus
Corresponding author: S.A. Zavatski (s.zavatskij@bsuir.by)*

Effective spatial separation of various particulates exerted in a nonuniform electric field can be accomplished via balancing a system of opposing forces generated by individual electrokinetic effects, including dielectrophoresis and electrothermophoresis. To do this,

we utilize planar metal microelectrodes arrays with the interdigitated geometry and reduced surface area, while selecting a suitable electric conductivity of the solvent and applied electric field frequency.

Key words: dielectrophoresis; electrothermal effects; microelectrodes; polystyrene nanoparticles.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной задачей является разработка новых методов анализа биологических жидкостей сложного состава, где целевые молекулы обычно находятся в малых концентрациях в многокомпонентной среде, а объемы проб, забираемых у пациентов и/или клинически здоровых людей, лежат в диапазоне нескольких микролитров. При этом достаточно серьезной проблемой является отделение целевых молекул от остальных соединений, содержащихся в пробах. Одним из перспективных методов, который может позволить решить эту задачу, является диэлектрофорез (ДЭФ) [1].

Ключом к селективному и точному управлению целевыми объектами с помощью ДЭФ является платформа, содержащая микроразмерные структуры, которые обеспечивают все необходимые для этого условия, а именно: высокую напряженность и контролируемое пространственное распределение электрического поля [2]. В качестве такой платформы может выступить, например, массив планарных металлических микроэлектродов различной геометрии, сформированный с помощью стандартных технологических операций современной микроэлектроники. Однако, до сих пор остается ряд неразрешенных вопросов по выбору их оптимальной конфигурации для решения конкретных практических задач. Так, для успешного «захвата» целевого объекта и последующего его перемещения в заданную область необходимо, чтобы сила, вызванная ДЭФ, преобладала над другими силами, действующими на объект. Одной из таких противодействующих сил, например, является электротермическая сила, связанная с выделением Джоулева тепла электродами и вызывающая объемное движение жидкой среды [3]. При определенных условиях развиваемая скорость потока жидкости может значительно затруднять управляемое движение объекта за счет ДЭФ, что ведет к потере контроля за точным пространственным расположением объекта.

Поэтому в данной работе представлена новая ДЭФ платформа на основе массива планарных металлических микроэлектродов со встречно-штыревой конфигурацией, в которой за счет уменьшения площади поверхности микроэлектродов и использования водных сред с удельной проводимостью менее 10^{-2} См/м был значительно подавлен электротермический эффект. Благодаря этому удалось реализовать эффективное пространственное разделение двухкомпонентных смесей на основе тестовых объектов в виде полистироловых наночастиц размером 190 нм и 520 нм в водной среде, при котором частицы размером 190 нм локализовались в областях с максимальным градиентом напряженности электрического поля, а частицы размером 520 нм – с минимальным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изготовления ДЭФ платформы использовались стандартные методы микроэлектроники, включающие взрывную фотолитографию, электронно-лучевое испарение, химическое и плазменное травление [4]. В качестве подложки использовалась

боросиликатная пластина диаметром 100 мм. Массив микроэлектродов состоял из слоев 10 нм Ti и 100 нм Au.

Для исследования ДЭФ люминесцирующих полистероловых частиц использовалась экспериментальная установка ручной сборки, включающая источник в виде светодиодного излучения широкого спектра, систему фильтров на основе фильтра коротких волн и полосового фильтра, двух воздушного 20× и масляного 60× объективов, а также цифровой камеры. Прецизионный контроль за положением образца осуществлялся с помощью ху пьезостолика, который был совмещен с генератором электрического сигнала произвольной формы для создания необходимых условий для генерации ДЭФ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве одной из возможных конфигураций ДЭФ электродов, обеспечивающих одновременно четко выраженные области максимумов и минимумов величины градиента напряженности электрического поля, которые позволят разделять многокомпонентные смеси различных веществ, в данной работе рассматривались массивы планарных металлических микроэлектродов на основе встречно-штыревой конфигурации. Схематическое и оптическое изображение первого варианта таких электродов представлено на рисунке 1. Как видно из рис. 1, *а*, длина и ширина каждого штыря, а также расстояние между ними (*В*) составили 5 мкм. Ширина базы микроэлектродов (*А*) составила 20 мкм.

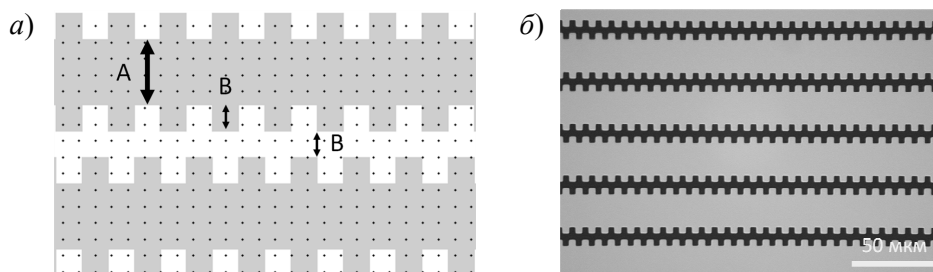


Рисунок 1. Схематическое (*а*) и оптическое (*б*) изображение массива планарных металлических микроэлектродов со встречно-штыревой геометрией

На рисунке 2 представлены результаты численного моделирования напряженности и пространственного распределения электрического поля вблизи разработанных электродов, помещенных в деионизованную воду с различной удельной проводимостью σ . На рис. 2, *б* показана абсолютная величина градиента напряженности электрического поля $\nabla|E|^2$ вдоль прямой линии, проходящей вблизи углов геометрии моделируемой структуры. Как видно из рис. 2, градиент напряженности электрического поля принимает максимальные значения вблизи наибольшего радиуса искривления геометрии металлического микроэлектрода. При этом область минимальных значений расположена вблизи базы электродов между двумя соседними штырями.

На основании полученных результатов численного моделирования напряженности электрического поля и согласно общепринятой теоретической модели ДЭФ [1], можно заключить, что, при правильно выбранных условиях ДЭФ эксперимента, тестовые объекты с меньшим размером в смеси будут двигаться к областям микроэлектродов с наибольшим радиусом искривления геометрии. В то же время объекты

большого размера должны собираться около базы микроэлектродов между двумя соседними штырями.

Для экспериментальной проверки этих предположений, разработанные ДЭФ платформы в дальнейшем использовались для ДЭФ зеленых люминесцирующих полистироловых наночастиц. На рисунке 3 представлены флуоресцентные фотографии этих наночастиц размером 520 нм, полученные при приложении к микроэлектродам переменного синусоидального напряжения с частотой 0,5 МГц или 10 МГц и пиковой амплитудой 10 В.

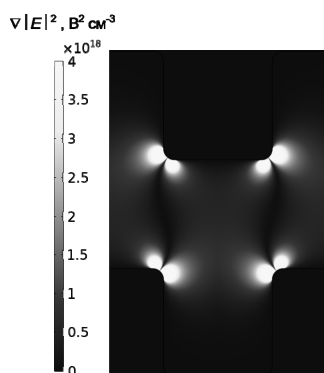


Рисунок 2. Рассчитанное пространственное распределение и величина градиента напряженности электрического поля вблизи массива планарных металлических микроэлектродов со встречно-штыревой конфигурацией

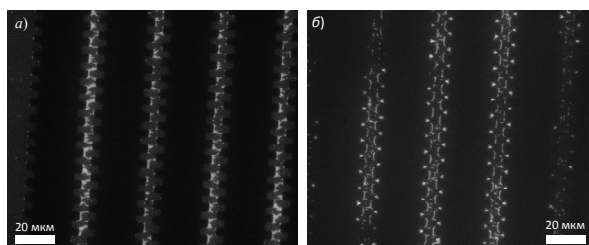


Рисунок 3. ДЭФ полистироловых наночастиц размером 520 нм при подаче переменного синусоидального напряжения с пиковой амплитудой 10 В и частотой 0,5 МГц (а) или 10 МГц (б)

Представленные на рис. 3 фотографии получены спустя несколько секунд после подачи внешнего электрического сигнала. Из рис. 3, а видно, что на малых частотах переменного электрического сигнала (0,5 МГц), наночастицы скапливаются вблизи углов штырей микроэлектродов. С другой стороны, из рис. 3, б видно, что аккумуляция тех же самых полистироловых наночастиц при ДЭФ на увеличенной в 20 раз частоте (10 МГц) электрического сигнала происходит преимущественно между соседними штырями одного массива электродов. Оба наблюдения хорошо согласуются с результатами численного моделирования (рис. 2) и общепринятой теорией ДЭФ [1].

Следует отметить, что точно такой же характер пространственного распределения при ДЭФ на низких (0,5 МГц) и высоких (10 МГц) частотах будет наблюдаться и для водных растворов полистироловых наночастиц меньшего размера (190 нм). Однако в обоих случаях ДЭФ наночастиц происходит одновременно с объемным движением жидкости, вызванным электротермическим эффектом, что затрудняет точный контроль за их пространственным положением, особенно в случае экспериментов по разделению их смесей. В качестве примера такого деструктивного влияния электротермических эффектов на ДЭФ, на рисунке 4 показана временная развертка цифрового видео, записанного во время эксперимента по разделению смеси на основе 190 нм и 520 нм полистироловых наночастиц. Из рисунка видно, что наночастицы на

этапе до подачи напряжения случайно распределены по объему раствора. При этом сразу после подачи переменного напряжения с частотой 2 МГц и пиковой амплитудой 10 В, наблюдается быстрое скопление частиц в зазорах между соседними штырями каждого массива микроэлектродов (рис. 4, б), что противоречит ранее полученным результатам по их раздельному ДЭФ (рис. 3). Более того если проследить их движение на более поздних этапах ДЭФ (рис. 4, в и 4, г), то можно заметить, как со временем наночастицы устремляются из зазоров между соседними штырями в область пространства между двумя встречными массивами микроэлектродов, образуя достаточно большие двигающиеся скопления наночастиц над электродами. Поэтому становится понятным, что кроме действующей на наночастицы ДЭФ силы, в системе присутствуют и другие эффекты, а именно – электротермические.

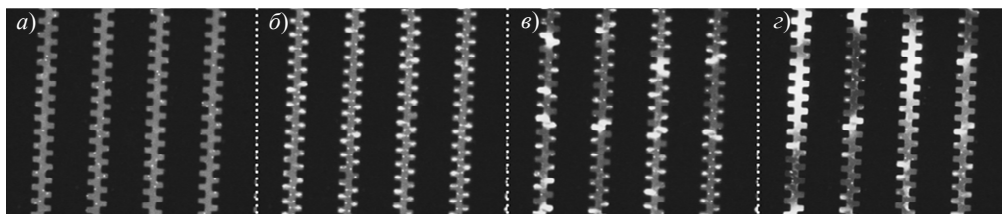


Рисунок 4. Влияние электротермических эффектов на ДЭФ смеси полистироловых наночастиц размером 190 нм и 520 нм до (а), сразу после (б), а также через 2 с (в) и 5 с (г) после подачи переменного напряжения

Поскольку электротермические эффекты связаны с локальным разогревом жидкости вблизи металлических электродов и возникновением за счет этого градиента σ и/или диэлектрической проницаемости жидкости, решением проблемы явилось уменьшение площади поверхности металлических электродов на 36 %, а также выбор подходящего σ деионизованной воды в смеси наночастиц, которая в данной работе сохранялось менее 10^{-2} См/м. В результате удалось достичь стабильного и эффективного разделение водной смеси двух разных по размеру типов тестовых наночастиц с помощью ДЭФ при подаче переменного электрического напряжения с частотой 2 МГц и пиковой амплитудой 10 В, флуоресцентное изображение которого представлено на рисунке 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

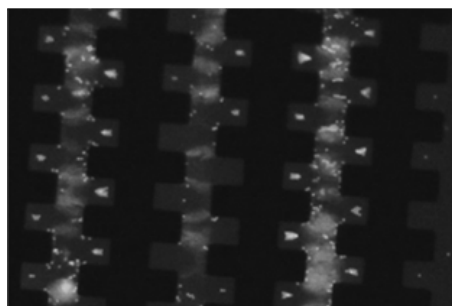


Рисунок 5. ДЭФ смеси полистироловых наночастиц размером 190 нм и 520 нм после подавления электротермических эффектов

В данной работе было разработано оптимальное ДЭФ устройство на основе массивов планарных металлических микроэлектродов для эффективного управления/разделения тестовых объектов, находящихся в многокомпонентной водной смеси. Результаты численного моделирования изготовленных микроэлектродов предсказали, а последующие эксперименты подтвердили локализацию наночастиц размером 190 нм за счет ДЭФ при подаче переменного напряжения с пиковой амплитудой 10 В и частотой 2 МГц

в областях максимума величины градиента напряженности электрического поля, которые находятся вблизи углов их геометрии, а частиц размером 520 нм – в областях минимума, расположенных в зазорах между соседними штырями. При этом для реализации стабильного во времени пространственного разделения смесей на их основе потребовалось подавить деструктивный электротермический эффект за счет снижения на 36 % площади поверхности электродов и использования водных сред с удельной проводимостью менее 10^{-2} См/м. Таким образом, предложенное в данной работе ДЭФ устройство может выступить в качестве надежного инструмента для управления/разделения более сложных веществ, например биоорганических макрообъектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Dielectrophoresis: Theory, methodology and biological applications / R.R. Pethig. – John Wiley & Sons, 2017. – 448 p.
2. Dielectrophoresis: Developments and applications from 2010 to 2020 / B. Sarno [et al.] // Electrophoresis. – 2021. – Vol. 42, №. 5. – P. 539–564.
3. The role of electrohydrodynamic forces in the dielectrophoretic manipulation and separation of particles / A. Ramos [et al.] // J. Electrostat. – 1999. – Vol. 47, № 1–2. – P. 71–81.
4. Manufacturing techniques for microfabrication and nanotechnology / M.J. Madou. – CRC press, 2011. – 670 p.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК МЕДИ НА СОСТАВ, СТРУКТУРУ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ TiAlCuN И TiAlCuCN

В. А. Зайков¹, С. В. Константинов², Ф. Ф. Комаров²,
И. А. Романов¹, И. В. Чижов²

¹⁾ Белорусский государственный университет, ул. Курчатова, 5, 220064, Минск, Беларусь,
e-mail: zaikov@bsu.by

²⁾ НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» БГУ, Курчатова,
7, 220045, Минск, Беларусь, e-mail: mymail3000@tut.by

Методом реактивного магнетронного распыления получены тонкопленочные покрытия многокомпонентных нитридов и карбонитридов TiAlCuN и TiAlCuCN различного стехиометрического состава с добавками меди. С помощью сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного рентгеновского анализа изучены влияние режимов осаждения на состав и структуру покрытий. Обнаружено, что во всех исследованных режимах осаждения покрытий добавки меди приводят к уменьшению среднего размера зерна по сравнению с тонкими пленками TiAlN и TiAlCN. Установлено, что добавки меди уменьшают удельное сопротивление тонкопленочных покрытий TiAlCuN и TiAlCuCN, причем этот эффект более заметен для покрытий нестехиометрического состава, обогащенных металлическими Ti и Al компонентами.

Ключевые слова: магнетронное распыление; тонкие пленки; сканирующая электронная микроскопия; энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия; удельное сопротивление.