

УДК 537.29

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОЛЕЙ И ЗАРЯДОВ, СОЗДАВАЕМЫХ  
СФОКУСИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ****Ф.Э. Комиссаренко, А.И. Денисюк**

Исследуется эффект перемещения диэлектрических наночастиц, наблюдаемый в электронном микроскопе. В проведенных экспериментах наблюдалось перемещение наночастиц полистирола размером 120 нм по подложке и их фиксация на острие подведенной металлической иглы, заряжающейся под электронным пучком. Проведен анализ механизмов взаимодействия в системе игла—частица—подложка под электронным пучком. Результаты моделирования и расчетов коррелируют с экспериментально наблюдаемыми явлениями. Наблюдаемый эффект может служить основой нового метода прецизионного перемещения нанообъектов.

**Ключевые слова:** электронная микроскопия, методы прецизионного перемещения наночастиц.

**Введение**

Наряду с развитием методов создания наноструктур, важной задачей нанотехнологий является прецизионное перемещение и фиксация нанообъектов. Метод оптического (лазерного) пинцета является исторически первой реализацией прецизионного перемещения микро- и наночастиц. В настоящее время этот метод [1, 2] достаточно развит и с его помощью можно создавать различные устройства опто- и наноэлектроники, биологические и химические сенсоры. В основе метода лежит взаимодействие электрического поля световой волны с индуцированным дипольным моментом микро- или наночастиц, в результате этого частица смещается вдоль градиента электрического поля волны. Данный метод весьма успешно работает при прецизионном перемещении микрочастиц, однако он не вполне пригоден для манипулирования наночастицами с размерами меньше длины волны управляющего лазера.

Прецизионное перемещение наночастиц возможно с помощью различных типов сканирующих зондовых микроскопов. В данных приборах для перемещения наночастиц могут быть задействованы различные механизмы взаимодействия зонда с частицей – механическое [3], химическое [4–6], электростатическое [7]. Более того, в зондовых микроскопах можно не только осуществлять прецизионное перемещение наночастиц по подложке, но и фиксировать наночастицу на острие зонда микроскопа. Тем самым можно создавать различные функциональные наноструктуры, такие как специализированные зонды для сканирующих зондовых микроскопов, обладающие уникальными характеристиками [4–6]. Существенным недостатком всех методов манипулирования наночастицами в зондовых микроскопах является отсутствие возможности непосредственной визуализации процесса и результата перемещения и фиксации наночастицы. Такая возможность реализуется в электронном микроскопе, снабженном микроманипулятором. Однако существующие в настоящее время работы по манипулированию частицами в электронном микроскопе [8, 9] описывают, в основном, возможность перемещения и фиксации крупных частиц микронного и субмикронного размера и основываются на механическом взаимодействии микроманипулятора с образцом. Также необходимо отметить работу [10], в которой описан эффект перемещения наночастиц под действием электромагнитного поля, создаваемого сфокусированным электронным пучком. Однако описанное явление наблюдалось лишь для наночастиц, находящихся в расплавах.

В настоящей работе экспериментально и теоретически исследуется эффект перемещения наночастиц по подложке под действием электронного пучка. Наблюдаемый эффект может служить основой нового метода прецизионного перемещения нанообъектов, который важен как при изучении их свойств, так и при создании различных функциональных элементов на основе этих объектов [11]. Преимуществом данного метода является то, что весь процесс и результат перемещения визуализируются на электронных изображениях в микроскопе в реальном времени.

**Эксперимент**

Экспериментальные исследования проводились со сферическими наночастицами полистирола диаметром 120 нм. Частицы были нанесены из водного раствора на кремниевую подложку, которая затем была помещена в камеру электронного микроскопа Neon 40 EsB (фирмы Carl Zeiss). Микроскоп дополнительно оборудован механическим микроманипулятором. Для проведения экспериментов по перемещению наночастиц к подвижной части микроманипулятора была приклеена заостренная вольфрамовая игла, полученная с помощью электрохимической заточки вольфрамовой проволоки до радиуса скругления острия менее 100 нм. Важно, что вольфрамовая игла не была заземлена. Движение вольфрамовой иглы над подложкой с частицами полистирола можно было непосредственно отслеживать на электрон-

ном изображении (ускоряющее напряжение электронного пучка 5 кВ, ток 60 пА). Оказалось, что при подведении вольфрамовой иглы к наночастицам на подложке на расстояние порядка нескольких сотен нанометров одна или несколько частиц притягивались к игле и фиксировались вблизи ее острия (рис. 1).

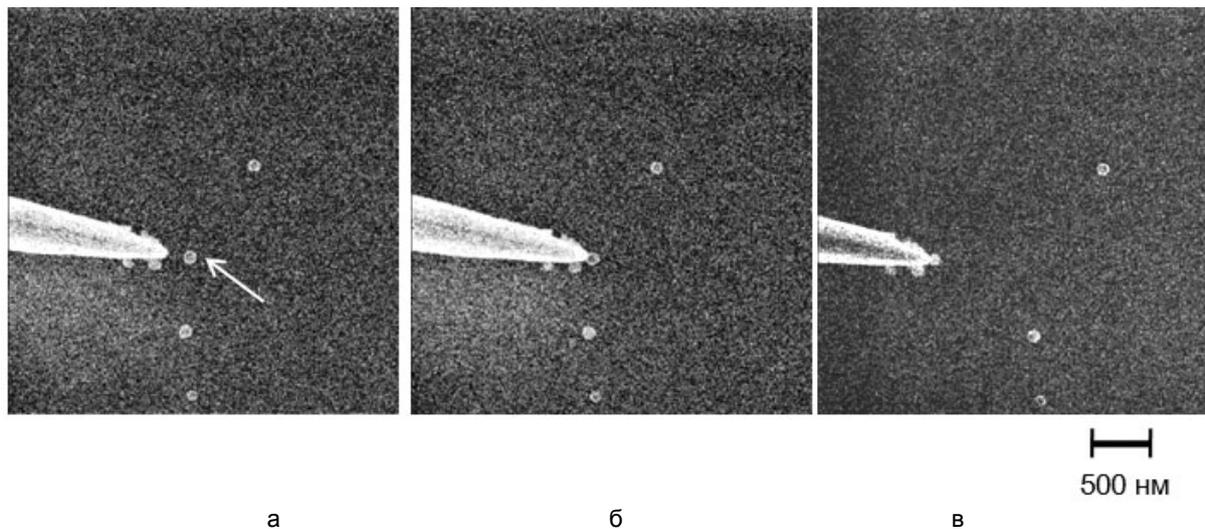


Рис. 1. Электронные изображения, иллюстрирующие фиксацию одиночной наночастицы полистирола на острие вольфрамовой иглы: подведение иглы к частице (а); фиксация частицы на острие иглы (б); отвод иглы (в)

### Расчеты и моделирование

Обнаруженный эффект фиксации диэлектрической наночастицы на острие металлической иглы, по-видимому, объясняется электростатическим взаимодействием в системе игла–частица–подложка под электронным пучком. Диэлектрические наночастицы на подложке удерживаются силами Ван-дер-Ваальса. Незаземленная металлическая игла заряжается отрицательно под электронным пучком. Таким образом, вблизи острия иглы будет создано сильное градиентное электростатическое поле. Это поле поляризует диэлектрическую частицу и притягивает ее (движение диэлектрических частиц в градиентных электрических полях известно как диэлектрофорез [11]) (рис. 2, а). Однако нельзя не учесть тот факт, что диэлектрическая частица сама заряжается под электронным пучком отрицательно. Тогда будет иметь место отталкивание частицы от иглы при взаимодействии двух отрицательных зарядов (рис. 2, б). Наконец, еще один механизм связан с тем, что отрицательный заряд частицы создает свое изображение в металлической игле. Таким образом, заряженная частица будет притягиваться к своему изображению в металлической игле (рис. 2, в).

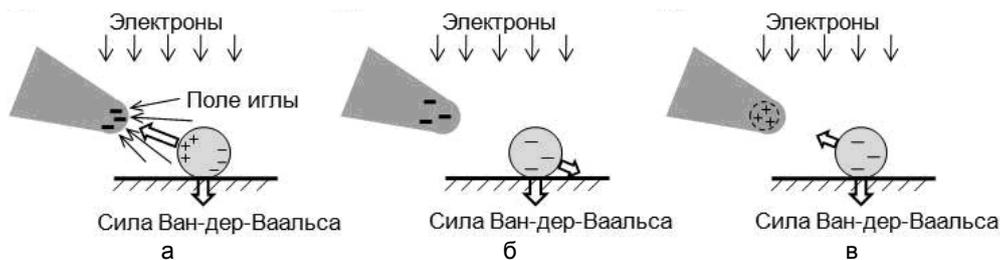


Рис. 2. Различные механизмы электростатического взаимодействия в системе игла–частица–подложка под электронным пучком: притяжение частицы градиентным полем заряженной иглы (а); отталкивание частицы от иглы при взаимодействии двух отрицательных зарядов (б); притяжение частицы к своему изображению в металлической игле (в)

Проведем оценку сил, действующих в системе игла-частица-подложка, согласно механизму, представленному на рис. 2, а. Исходные данные для расчета взяты из экспериментальных результатов. Для расчета силы Ван-дер-Ваальса, удерживающей частицу на подложке, воспользуемся формулой, представленной в работе [12]. Расчет показал, что сила Ван-дер-Ваальса в данном случае составляет около 6 нН.

Для оценки диэлектрофоретической силы рассчитаем заряд, накопленный вольфрамовой иглой, исходя из следующих данных: ток электронного пучка 50 пА, время облучения иглы 0,6 с (получено исходя из времени проведения эксперимента с учетом площади иглы), коэффициент поглощения электронов 0,6 (получено, исходя из результатов моделирования методом Монте-Карло рассеяния электронов с энергией 5 кэВ в вольфраме). Расчет показал, что заряд, накопленный вольфрамовой иглой, составляет

около 18 пКл. Следующим шагом является моделирование электростатического поля вблизи острия иглы. Эта задача решена методом конечных элементов, форма острия принята как круговой конус длиной 1 мм и радиусом основания 200 мкм, вершина конуса (острие иглы) имеет радиус скругления 50 нм. Результаты моделирования представлены на рис. 3, а (кривая значения напряженности в зависимости от расстояния от вершины иглы по ее оси), и рис. 3, б (картина поля вблизи острия иглы). На рис. 3, а, также представлены кривые, соответствующие радиусам скругления острия иглы 30 и 70 нм, а также двойному заряду, накопленному на игле (36 пКл) при радиусе скругления острия 50 нм.

При расчете диэлектрфоретической силы использована формула из обзора [12]. Согласно этой оценке диэлектрфоретическая сила, создаваемая иглой с зарядом 18 пКл и радиусом скругления острия 50 нм на расстоянии 100 нм от нее, составит порядка 7 нН, т.е. станет равной силе Ван-дер-Ваальса, удерживающей частицу на подложке. Данный расчет подтверждает возможность притяжения частицы к острию заряженной иглы. Расчеты также показывают, что диэлектрфоретическая сила, создаваемая заряженной иглой, слабо меняется при изменении радиуса острия иглы в диапазоне 30–70 нм, однако эта сила возрастает в два раза при двукратном увеличении накопленного заряда.

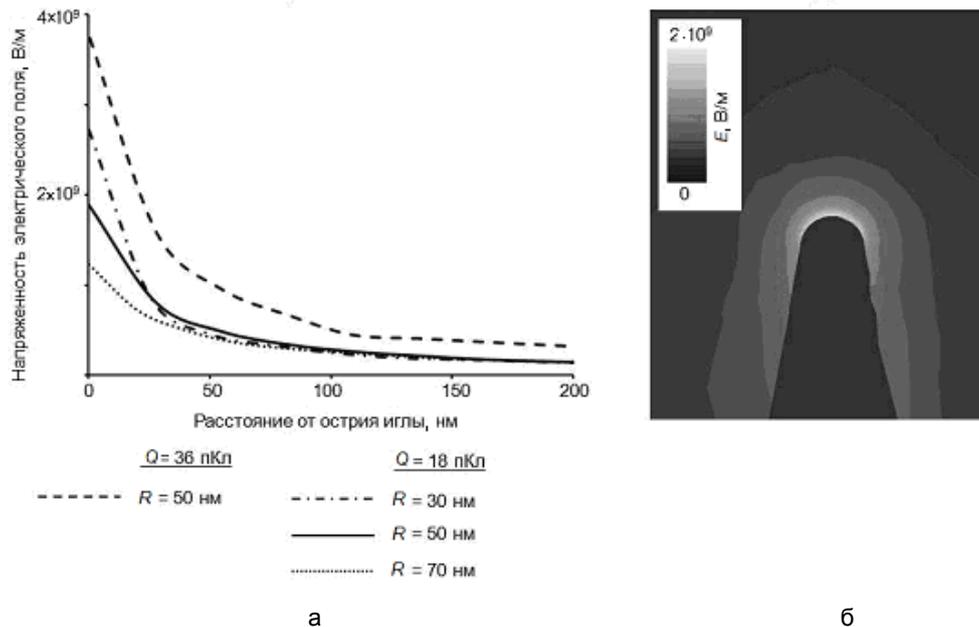


Рис. 3. Результаты расчетов электростатического поля вблизи острия заряженной металлической иглы: зависимость поля от расстояния от острия иглы (а); картина распределения электрического поля вблизи острия иглы (б)

### Заключение

В работе теоретически и экспериментально изучен эффект перемещения наночастиц под действием полей и зарядов, создаваемых электронным пучком. Проведенные эксперименты показали возможность перемещения сферических наночастиц полистирола диаметром 120 нм и их фиксации на острие подведенной металлической иглы, заряжающейся под электронным пучком. Расчеты взаимодействия в системе игла–частица–подложка под электронным пучком подтвердили экспериментально наблюдаемые результаты. Описанный эффект может являться основой нового метода прецизионного перемещения нанообъектов, который будет полезен как для изучения их свойств, так и для создания различных функциональных наноматериалов.

Работа выполнена в рамках реализации и при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № П1285).

### Литература

1. Neuman K.C., Block S.M. Optical trapping // Review of scientific instruments. – 2004. – V. 75. – P. 2787–2809.
2. Dienerowitz M., Mazilu M., Dholakia K. Optical manipulation of nanoparticles: a review // Journal of Nanophotonics. – 2008. – V. 2. – P. 021875.
3. Sitti M., Hashimoto H. Controlled Pushing of Nanoparticles Modeling and Experiments // IEEE/ASME transaction on mechatronics. – 2000. – V. 5. – P. 199–211.

4. Ducker W.A., Senden T.J., Pashley R.M. Direct Measurement Of Colloidal Forces Using An Atomic Force Microscope // Nature. – 1991. – V. 353. – P. 239–241.
5. Лебедев Д.В., Чукланов А.П., Бухараев А.А., Дружинина О.С. Измерение модуля Юнга биологических объектов в жидкой среде с помощью специального зонда атомно-силового микроскопа // Письма в ЖТФ. – 2009. – С. 54–61.
6. Höppener C., Novotny L. Imaging of membrane proteins using antenna-based optical microscopy // Nanotechnology. – 2008. – V. 19. – P. 384012.
7. Grobelny J., Tsai D.-H., Kim D.-I., Pradeep N., Cook R.F., Zachariah M.R. Mechanism of nanoparticle manipulation by scanning tunnelling microscopy // Nanotechnology. – 2006. – V. 17. – P. 5519–5524.
8. Meyer E., Braun H.-G. Micro- and nanomanipulation inside the SEM // Journal of Physics: Conference Series. – 2008. – V. 126. – P. 012074.
9. Nakazato Y., Yuasa T., Sekine G., Miyazawa H., Jin M., Takeuchi S., Ariga Y., Murakawa M. Micromanipulation system using scanning electron microscope // Microsyst Technol. – 2009. – V. 15. – P. 859–864.
10. Oleshko V.P., Howe J.M. Are electron tweezers possible? // Ultramicroscopy. – 2011. – V. 111. – P. 1599–1606.
11. Kadaksham A.T.J., Singh P., Aubry N. Dielectrophoresis of nano-particles // Electrophoresis. – 2004. – V. 25. – P. 3625–3632.
12. Hamaker H.C. The London – van der Waals attraction between spherical particles // Physica. – 1937. – V. 4. – № 10. – P. 1058–1072.

- Комиссаренко Филипп Эдуардович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, malkav86@mail.ru
- Денисюк Андрей Игоревич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, aidenisyuk@gmail.com