ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОМАНИПУЛЯЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОВЗРЫВОВ ЧАСТИЦ ПОЛИСТИРОЛА

Скиданов Р.В., Морозов А.А.

Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва

Аннотация

Описано поведение полистироловых микрочастиц в сфокусированном пучке ультрафиолетового импульсно-периодического лазера с длиной волны 355 нм. Представлен способ перемещения микрообъектов размером от 10 до 200 мкм за счёт микровзрывов частиц полистирола. Представлены результаты натурного эксперимента по перемещению микрообъекта размером около 200 мкм.

<u>Ключевые слова</u>: оптический захват, полистироловые микрочастицы, ультрафиолетовый лазер, микровзрыв.

Введение

Перемещение микро- и нанообъектов сфокусированными световыми пучками в настоящее время быстро развивающаяся область науки. Количество работ, посвящённых так называемому «лазерному пинцету», увеличивается с каждым годом. При этом развитие метода идёт в направлении уменьшения размеров перемещаемых объектов [1-3]. Однако кроме задачи перемещения объектов наномасштаба, существует задача перемещения объектов размером в десятки и сотни микрометров. Механические методы перемещения таких объектов (с помощью специальных игл) довольно грубы и сопровождаются риском повреждения образцов. Чисто оптические методы захвата и перемещения таких объектов также не работают из-за массы. Собственно, можно округлённо считать верхней границей размеров микрочастиц годных для оптического захвата и перемещения – 10 мкм. Объекты большего размера требуют большой мощности сфокусированного лазерного пучка (>3 Вт), что приводит к нежелательным тепловым эффектам в перемещаемых микрообъектах. В данной работе предложен метод перемещения таких микрообъектов с помощью микровзрывов частиц полистирола, инициированных сфокусированным излучением ультрафиолетового лазера. В настоящее время использование ультрафиолетовых лазеров в микроманипуляции ограничивалось некоторыми вспомогательными задачами [4-6]. Так, в [4] ультрафиолетовый лазер разрезал захваченные другим лазерным пучком клетки и они сливались вместе. В [5, 6] захваченная лазерным пучком с длиной волны 532 нм сферическая полистирольная микрочастица использовалась как микролинза для пучка ультрафиолетового лазера, который шёл параллельно основному пучку. Напрямую для оптического перемещения микрообъектов ультрафиолетовые пучки не использовались.

1. Оптическая схема эксперимента и свойства полистирола

Известно, что полистирол нестоек в ультрафиолетовом излучении. Под действием природного ультрафиолета изделия из полистирола постепенно теряют прозрачность и механическую прочность. Несмотря на это, в [5,6] полистироловые частицы использовались как микролинзы для фокусировки именно ультрафиолетового излучения с длиной волны 355 нм. Целью при этом было получение рельефа с наноразрешением на органической подложке. Очевидно, что интенсивность использованного в этих работах ультрафиолетового излучения была относительно невелика.

Ультрафиолетовое когерентное излучение с длиной волны 355 нм позволяет получить при фокусировке световое пятно размером менее 200 нм, что при оптическом захвате даёт более точно локализовать микрочастицы. Для проверки возможности захвата микрочастиц пучком ультрафиолетового лазера была собрана оптическая схема, представленная на рис. 1.



Рис. 1. Оптическая схема эксперимента по захвату полистироловых микрообъектов в пучке ультрафиолетового лазера

В оптической схеме введены обозначения: UV – ультрафиолетовый лазер DTL-375QT с длиной волны 355 нм и максимальной средней мощностью 40 мВт; M_1 , M_2 , M_3 – поворотные зеркала; I – лампа осветителя; L_1 – фокусирующий микрообъектив (20×); L_2 – изображающий микрообъектив (16×); CCD – видеокамера; V – кювета с микрообъектами. В эксперименте были использованы две CCD-камеры VS-CTT-252 с разрешением 2048×1536 и MDCE-5A с разрешением 1280×1024.

Использование в оптической схеме двадцатикратного фокусирующего микрообъектива позволило сфокусировать пучок лазера в пятно диаметром 1,5 мкм. При этом сама полистироловая частица также работает как микролинза [5], диаметр фокального пятна при этом составляет примерно 0,2 мкм. Диаметр самой полистироловой частицы при этом 5 мкм. Но в отличие от [5] световой пучок, падающий на микрочастицу, уже сфокусирован, т.е. волновой фронт искривлён. При этом, в зависимости от положения микрочастицы относительно фокальной плоскости микрообъектива, по-разному будет располагаться фокальное пятно, сформированное самой микрочастицей. На рис. 2 проиллюстрировано положение фокального пятна для сферической полистироловой микрочастицы, расположенной в воде.



Рис. 2. Расположение пятна фокусировки относительно полистироловой микрочастицы при разном расположении самой микрочастицы относительно фокальной плоскости

Если микрочастица значительно выше фокальной плоскости микрообъектива, то фокальное пятно располагается вне микрочастицы (рис. 2a). Если микрочастица находится вблизи фокальной плоскости, то пятно фокусировки располагается внутри микрочастицы (рис. 2δ).

Если частица в случае, изображённом на рис. 2a, расположена на поверхности подложки, то пятно фокусировки будет располагаться внутри материала подложки, что может привести к разрушению материала подложки. С учётом энергетических характеристик лазера и размеров фокального пятна интенсивность в фокальном пятне можно оценить в 10^{16} - 10^{17} BT/м². Т.к. полистирол на этой длине волны довольно сильно поглощает, такой порядок интенсивности, очевидно, должен приводить к мгновенному разложению и испарению продуктов распада полистирола, что и подтверждается экспериментально.

2. Полистироловые сферические микрочастицы в сфокусированном ультрафиолетовом пучке

Был проведён эксперимент, в ходе которого пучок ультрафиолетового лазера был сфокусирован на микрочастицах полистирола, расположенных внутри капли дистиллированной воды на поверхности стеклянной подложки. Для эксперимента была выбрана оптимальная частота следования импульсов лазера 3000 Гц, при которой достигается максимальная средняя мощность 40 мВт. На рис. 3. представлены различные стадии процесса микровзрыва полистироловой частицы диаметром 5 мкм.



Рис. 3. Стадии процесса микровзрыва полистироловой микрочастицы, снятые с интервалом 0,25 с

Т.к. ультрафиолетовое излучение этой длины волны не регистрируется ни одной из имеющихся ССD камер, фокусировка пучка осуществлялась по наблюдению паразитной лазерной моды видимого диапазона. Она хорошо видна на рис. 3. Положение этой моды в плоскости фокусировки лишь незначительно отличается от положения основной моды.

Как видно из рис. 3, в результате микровзрыва небольшая область дна кюветы была очищена от микрочастиц. При этом средняя скорость движения микрочастиц в результате взрыва составила более 500 мкм/с, что является очень большим значением для частиц такого размера в воде. К сожалению, используемые в экспериментах ССД камеры имеют относительно невысокую частоту кадров. Камера VS-CTT-252 имеет частоту 4 кадра в секунду и соответственно интервал времени между последовательными кадрами 0,25 с. Камера MDCE-5A имеет частоту 15 кадров в секунду, и интервал времени между соседними кадрами составляет примерно 0,06 с. Для детального представления процессов этого, к сожалению, недостаточно. Камеры со стандартной телевизионной частотой 25 кадров в секунду будет также недостаточно. Использование высокоскоростных камер затруднено из-за проблем синхронизации с наблюдаемыми процессами. Поэтому все данные о скорости перемещения частиц, приведённые в этой работе, можно рассматривать только как оценку снизу. Для более точного изучения механизма этого процесса был проведён ряд экспериментов, в которых менялась энергия отдельного импульса, частота импульсов, размеры микрочастиц полистирола и материал подложки.

Лазер DTL-375QT позволяет менять частоту импульсов от 100 Гц до 10 кГц. При этом энергия импульса меняется от 20 мкДж до 1,5 мкДж. Изменяя частоту, можно изменить энергию импульса и среднюю мощность. Как показали результаты экспериментов, процесс взрыва микрочастицы зависит в первую очередь от энергии импульса. При уменьшении энергии импульса менее 3 мкДж микровзрывы не фиксировались, а при изменении диаметра полистироловых микрочастиц до 2 мкм с сохранением максимальной энергии в импульсе (14 мкДж) взрывы фиксировались. На рис. 4 представлены стадии движения микрообъектов при таком взрыве.

Как видно из рис. 4, процесс взрыва микрочастицы видоизменился. Он идет значительно медленнее, в процессе разрушения микрочастицы образуется четко видимый газовый микрошар диаметром около 11 мкм. При изменении фокусировки микрообъектива точно на поверхность подложки образование подобных пузырей наблюдалось даже при отсутствии микрочастиц в жидкости (рис. 5).



Рис. 4. Стадии процесса микровзрыва полистироловой микрочастицы диаметром 2 мкм, снятые с интервалом 0,4 с



Рис. 5. Образование микропузырей в дистиллированной воде, изображения сняты с интервалом 0,12 с

Образовавшиеся при этом пузыри были довольно устойчивыми образованиями. Некоторые из них сохраняли форму и размер в течение десятков секунд. Скорость же образования таких пузырей до 5-6 штук за секунду.

При этом, как хорошо видно из рис. 5, повреждается поверхность стекла. На нём образуется хорошо видимая линия, которая представляет собой борозду шириной около 2,5 мкм и глубиной от 300 нм до 4 мкм (рис. 6).



Рис. 6. Поперечное сечение борозды, оставленной на стекле сфокусированным пучком ультрафиолетового лазера. Получено на Zygo New View 5000

На основании проведённых измерений можно утверждать, что образовавшиеся пузыри газа – это результат кипения стекла в фокусе ультрафиолетового пучка. Для проверки этого предположения были проведены ещё несколько экспериментов, в которых стеклянная подложка была заменена на кварцевую. Кварц хорошо пропускает ультрафиолетовое излучение с длиной волны 355 нм, поэтому никаких тепловых эффектов на его поверхности быть не может и любое образование газового пузыря будет объясняться только взрывом полистироловой микрочастицы. Действительно, при фокусировке ультрафиолетового пучка на кварцевую пластину, покрытую слоем дистиллированной воды, образования газовых пузырей не наблюдалось. При добавлении в воду взвеси полистироловых микрочастиц диаметром 5 мкм наблюдались точно такие же микровзрывы, как и на стеклянной подложке (рис. 7). Некоторое различие в энергетике микровзрывов, очевидно, объясняется неточностью фокусировки.

Как видно из рис. 8, наблюдается четко видимый микропузырь, при этом полностью исключено влияние подложки, а это значит, что в образовании пузыря участвует полистироловая микрочастица.

Т.к. в результате микровзрывов частиц полистирола наблюдается довольно существенный сдвиг остальных микрообъектов, был проведён эксперимент по проверке возможности перемещения относительно крупных микрообъектов (размером более 10 мкм) с помощью этого эффекта. В качестве объекта перемещения был выбран короткий обрезок полимерного волокна толщиной 30 мкм и длиной около 200 мкм. Перемещать такой микрообъект прямым действием света невозможно. Для перемещения микрообъекта возле него был осуществлён микровзрыв полистироловой частицы (рис. 9).



Рис. 7. Стадии процесса микровзрыва полистироловой микрочастицы диаметром 5 мкм на кварцевой подложке, снятые с интервалом 0,12 с



Рис. 8. Стадии процесса микровзрыва полистироловой микрочастицы диаметром 5 мкм над кварцевой подложкой на высоте 20-30 мкм, снятые с интервалом 0,12 с



Рис. 9. Стадии движения микрообъекта длиной 200 мкм при взрыве рядом с ним полистироловой микрочастицы. Снимки сделаны с интервалом 0,06 с

Для удобства визуализации край частицы помечен белым прямоугольником. Как видно из рис. 9, микрообъект перемещается относительно своего первоначального положения на 20 мкм.

Заключение

В работе экспериментально исследовано поведение микрочастиц полистирола в пучке ультрафиолетового лазера. Представлены результаты экспериментов, доказывающие процесс взрыва полистироловых микрочастиц в сфокусированном ультрафиолетовом пучке. Представлены результаты эксперимента по перемещению микрообъекта длиной 200 мкм с помощью взрыва полистироловой микрочастицы.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF RUX0-014-Sa-06), грантов РФФИ №№ 08-07-99007, 10-07-00109, гранта прези-

дента Российской Федерации МД-8026.2010.2 и Государственного контракта № 02.740.11.0805.

Литература

- Zemranek, P. Optical trapping of nanoparticles and microparticles by a Gaussian standing wave / P. Zemranek, A. Jonras, L. Srramek, M. Liska // OPTICS LETTERS. – 1999. – Vol. 24, N. 21. – P. 1448-1450.
- De, A.K. Stable optical trapping of latex nanoparticles with ultrashort pulsed illumination / A.K. De, D. Roy, A. Dutta, D. Goswami// APPLIED OPTICS. – 2009. – Vol. 48, N. 31. – P. 33-37.
- Bosanac, L. Efficient Optical Trapping and Visualization of Silver Nanoparticles / L. Bosanac, T. Aabo, P.M. Bendix, L.B. Oddershede // NANO LETTERS. – 2008. – Vol. 8, N. 5. – P. 1486-1491.
- Steubing, R.W. Laser Induced Cell Fusion in Combination With Optical Tweesers: The Laser Cell Fusion trap / R.W. Steubing [et al] // Cytometry. – 1991. – Vol. 12. – P. 505-510.
- Fasasi A. Y. Nanosecond UV laser processed microgrooves on Ti6Al4V for biomedical applications / A. Y. Fasasi [et al] // Mat. Sci. Eng. C. – 2009. – Vol. 29. – P. 5-13.

 McLeod, E. Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres / E. McLeod, C.B. Arnold // Nature Nanotech. – 2008. – Vol. 3. – P. 413-417.

References

- Zemranek, P. Optical trapping of nanoparticles and microparticles by a Gaussian standing wave / P. Zemranek, A. Jonras, L. Srramek, M. Liska // OPTICS LETTERS. – 1999. – Vol. 24, N. 21. – P. 1448-1450.
- De, A.K. Stable optical trapping of latex nanoparticles with ultrashort pulsed illumination / A.K. De, D. Roy, A. Dutta, D. Goswami// APPLIED OPTICS. – 2009. – Vol. 48, N. 31. – P. 33-37.
- Bosanac, L. Efficient Optical Trapping and Visualization of Silver Nanoparticles / L. Bosanac, T. Aabo, P.M. Bendix, L.B. Oddershede // NANO LETTERS. – 2008. – Vol. 8, N. 5. – P. 1486-1491.
- Steubing, R.W. Laser Induced Cell Fusion in Combination With Optical Tweesers: The Laser Cell Fusion trap / R.W. Steubing [et al] // Cytometry. – 1991. – Vol. 12. – P. 505-510.
- Fasasi A. Y. Nanosecond UV laser processed microgrooves on Ti6Al4V for biomedical applications / A. Y. Fasasi [et al] // Mat. Sci. Eng. C. – 2009. – Vol. 29. – P. 5-13.
- McLeod, E. Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres / E. McLeod, C.B. Arnold // Nature Nanotech. – 2008. – Vol. 3. – P. 413-417.

OPTICAL ICROMANIPULATION WICH EMPLOYMENT OF MICROBLASTS OF MICROPARTICLES OF POLYSTYROLE

R.V. Skidanov, A.A. Morozov Image Processing Systems Institute of the RAS, S. P. Korolyov Samara State Aerospace University

Abstract

Describeded behaviour an microparticles of polystyrene in focused beam ultraviolet pulsed-periodic lazer with wavelength 355nm. Presented method of moving the microobjects by size from 10 before 200 µm to account of microblasts of particles of polystyrene. Presented result an experiment on displacement an microobject by size around 200 µm.

Key words: optical trapping, microparticles of polystyrene, microblasts, ultraviolet pulsed-periodic lazer.

Сведения об авторах



Скиданов Роман Васильевич, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физикоматематических наук (2007 год), работает старшим научным сотрудником лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Скиданов Р.В. – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 60 статей, 3 монографии.

<u>E-mail:</u> romans@smr.ru.

Roman Vasilevich Skidanov (b. 1973) graduated with honours (1990) from the Samara State University (SSU)), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths

(2007) degrees from Samara State Aerospace University. He is the senior researcher laboratory of laser measurement at the Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 60 scientific papers, 3 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.



Морозов Андрей Андреевич, 1987 года рождения, в 2008 получил степень бакалавра в СГАУ по специальности «прикладная математика». В списке научных работ А.А. Морозова 5 статей. Область научных интересов: дифракционная оптика.

E-mail: ragefalcon@mail.ru

Morozov Andrey Andreevich (b. 1987) He received his bachelor in Applied mathematics (2008) in SSAU. He is co-author of 5 scientific papers. His research interests are currently diffractive optics.

Поступила в редакцию 18 июня 2010 г.