

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ЗАХВАТЕ НАНОЧАСТИЦ

Ю.П. МАЧЕХИН, Е.Г. МЕРКУЛОВ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований распределения плотности мощности в лазерном пучке. Проведен анализ условий манипулирования диэлектрическими микрочастицами с помощью лазерного излучения. В работе было показано, что благодаря использованию серийно выпускаемых твердотельных лазерных источников можно добиться необходимой плотности мощности и градиента излучения в поперечном сечении для захвата диэлектрических частиц.

Ключевые слова: оптический пинцет, твердотельный лазер, плотность мощности излучения, фокусировка, ПЗС-линейка.

ВВЕДЕНИЕ

В классической оптике основные законы взаимодействия света с веществом описывают такие явления как отражение, преломление или поглощение света на границе двух оптически прозрачных сред. Основываясь на электромагнитную теорию света, Максвелл провел расчеты величины механического воздействия света на материальные объекты. Полагая, что свет передает часть своего импульса материальному телу, он оказывает давление на материальный объект. В 1899 году, с помощью крутильных весов, помещенных в вакуумную камеру, российскому физики П.Н. Лебедеву удалось на фоне конвекционных потоков остаточного газа выделить и измерить величину давления света на механическое устройство. Многие десятилетия эксперименты Лебедева оставались единственными, в которых была продемонстрирована реальность условий, при которых возможна фиксация механического воздействия оптического излучения на вещество. Поскольку в экспериментах использовался естественный свет, с малым уровнем плотности мощности, то эти результаты не нашли применения на практике и рассматривались как реализация фундаментальных физических законов, которые не имели практического значения.

Почти через семьдесят лет в 1968 году В.С. Летохов [1] теоретически показал, при каких условиях и при каких параметрах лазерного излучения можно перемещать атомы в пространстве. Первоначально, Летохов анализировал ситуацию, каким образом с помощью лазерного излучения можно было бы охлаждать температуру атомов или ионов. Это была фундаментальная задача, решение которой позволило бы создавать естественные частотные реперы, свойства которых не зависят от тепловых скоростей атомов (ионов).

В 1987 году А. Эшкин [2] теоретически и экспериментально продемонстрировал возможность удержания диэлектрической частицы в заданной области пространства при помощи сфокусированного пучка лазерного излучения. Свои

опыты он проводил с маленькими пластмассовыми частицами (шариками из латекса), находящимися в воде.

Помещенная в лазерный пучок микрочастица приобретает индуцированный дипольный момент (аналогично тому, как это делает атом или молекула, попав в неоднородное электромагнитное поле). В связи с тем, что распределение интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка неоднородно, интенсивность оптического излучения на оси пучка выше, чем на периферии, то под действием градиента интенсивности излучения частица затягивается в центральную область лазерного пучка. Можно теоретически показать, выписав уравнение для силы Лоренца, что сила, действующая на частицу, зависит от поляризуемости частицы и направлена в сторону увеличения напряженности поля.

Исследование явления взаимодействия лазерного излучения с микро- и нанообъектами сопряжено с необходимостью учитывать соотношение между длиной волны излучения и характерным размером объекта.

Из электродинамики известно, что при изучении процессов рассеяния электромагнитных волн на локальных материальных объектах, выделяется два предельных случая. Первый — режим Ми-рассеяния, когда длина волны излучения много меньше размеров частицы и можно использовать приближение геометрической оптики. Второй — соответствует условию, когда длина волны много больше размеров объекта. Если размер частицы меньше длины волны электромагнитного излучения (Релеевское рассеяние), то ее можно рассматривать как точечный диполь в электромагнитном поле.

Условия захвата оптическим излучением микрочастиц, размеры которых могут быть несколько десятков микрон, описываются режимом Ми-рассеяния. Поскольку показатель преломления частицы обычно выше, чем у окружающей среды, поэтому преломленные лучи отклоняются ближе к ее оси, изменяя направление своего распространения. По закону сохранения

импульса должна возникнуть сила, компенсирующая это отклонение луча (оно эквивалентно передаче импульса частице или давлению света). Если показатель преломления частицы будет меньше показателя преломления среды, градиентная сила будет направлена от оси пучка, и частица будет выталкиваться из него. Как только частица оказалась в фокусе лазерного пучка, ее можно двигать вместе с лазерным лучом. С помощью оптического пинцета можно передвигать частицы размером от 10 нм до 10 мкм и собирать из них различные структуры.

Очевидно, что для диэлектрических частиц, ввиду малости величины диэлектрической проницаемости, эта сила меньше, чем для частиц металлических. Что касается размеров частицы, то, чем меньше частица, тем меньше атомов вносят свой вклад в индуцированный дипольный момент и тем меньше ее поляризуемость, а значит, и меньше сила, которая действует на частицу. То есть для меньших частиц с большой диэлектрической проницаемостью необходимы сильные поля, чтобы удержать эти частицы в ловушке лазерного пинцета. Поэтому подбираемая мощность лазера, для пленения диэлектрических частиц, возрастает с уменьшением их размера [3]. При взаимодействии электромагнитного излучения с металлическими наночастицами, электроны проводимости согласованно смещаются относительно положительно заряженных ионов решетки. Флуктуации плотности заряда создают электрическое поле, стремящееся восстановить электронейтральность. Величина возвращающей силы пропорциональна величине смещения, так же как и для типичного осциллятора, поэтому можно говорить о наличии собственной частоты коллективных колебаний электронов в частице. Если частота колебаний падающего света совпадает с собственной частотой колебаний свободных электронов вблизи поверхности металлической частицы, наблюдается резкое увеличение амплитуды колебания «электронной плазмы», квантовым аналогом которой является плазмон.

Условием возникновения плазмонного резонанса является обращение в нуль действительной части знаменателя поляризуемости металлической наночастицы. Если частота лазера точно настроена на частоту ППР, произойдет резкое увеличение частоты поверхностной моды частицы, таким образом резонансно увеличивая силу воздействия внешнего поля на частицу. На частоте плазмонного резонанса металлическая частица выталкивается из области фокуса. Это объясняется преобладанием одной из двух сил — отрицательной градиентной силы или силы рассеяния. Мода может испытывать изменение фазы колебаний на 180° , таким образом, мгновенно меняя направление действия силы. Уменьшая частоту лазера, можно добиться затягивания металлической наночастицы в область фокуса или ее выталкивания.

Первоначально считалось, что управлять металлическими наночастицами с помощью лазерного пинцета невозможно из-за высокого коэффициента отражения. В 1992 году К.Свобода и С.Блок провели эксперимент [4], показывающий, что 40 нм золотые наночастицы можно захватить оптическим пинцетом с длиной волны излучения, не совпадающей с длиной волны поверхностного плазмонного резонанса. По сравнению с диэлектрическими частицами такого же размера, золотые поляризуются сильнее (обусловлено высокой величиной диэлектрической проницаемости), а значит, для их удержания оптическим пинцетом требуются более сильные поля. Для того чтобы снизить мощность лазерных источников для удержания металлических наночастиц, можно попробовать изменить иммерсионную жидкость, в которой находятся частицы. С увеличением показателя преломления иммерсионной жидкости жесткость ловушки возрастет, это значит, что можно будет использовать менее мощные лазеры, но при этом удерживать частицу пинцетом с той же силой. Следует отметить, что в поле непрерывного лазерного излучения использование сильно поглощающих металлических частиц приводит к значительным тепловым эффектам.

Целью настоящей работы было изучение условий взаимодействия лазерного излучения с микрообъектами в двумерном пространстве. В этом случае, возможно создание пространственной двумерной оптической сетки, которая удерживает нано- или микрочастицы, необходимые, например, для запоминания и хранения информации в оптическом компьютере.

ЗАХВАТ И УДЕРЖАНИЕ ОДИНОЧНЫХ МИКРООБЪЕКТОВ

Рассмотрим основные условия захвата микрочастиц излучением серийно выпускаемого твердотельного лазера. Отдельный узел оптической сетки, как одиночная оптическая ловушка, формируется с помощью лазерного пучка с гауссовым распределением интенсивности в поперечном сечении. Такие «пинцеты», как было описано выше, применяются при работе с одиночными частицами, например, в биологии и медицине. Чтобы удержать большое количество частиц в определенной геометрии, необходимо использовать другую конфигурацию захвата частиц. Ниже представлены исследования пучков излучения двух серийно выпускаемых твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой, которые могут обеспечить захват одиночных частиц.

Следуя основному условию взаимодействия сфокусированного лазерного излучения с микро- и нанообъектами, сила воздействия этого излучения на частицу прямо пропорциональна градиенту мощности излучения в поперечном сечении лазерного пучка [5]:

$$F = \frac{1}{2} \alpha \cdot \nabla E^2. \quad (1)$$

Из (1) следует, что для захвата и удержания микрообъекта в оптической ловушке необходим большой градиент мощности излучения в поперечном сечении пучка, поскольку коэффициент α имеет довольно малое значение. Чтобы оценить возможность использования твердотельных лазеров для формирования пучков, которые необходимы для захвата частиц, был разработан и создан экспериментальный стенд, схема которого показана на рис. 1.

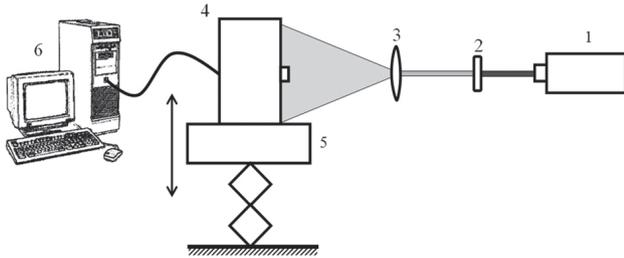


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения распределения мощности лазерного излучения в поперечном сечении луча:
1 – твердотельный лазер; 2 – светофильтр; 3 – оптика расфокусирования пучка; 4 – ПЗС – линейка;
5 – координатный столик; 6 – компьютер

Экспериментальный стенд, представляет собой конструкцию, в которой излучение лазера 1, проходит через светофильтр 2 и преобразуется элементом 3 (при этом внутреннее распределение плотности мощности в поперечном сечении пучка не изменяется, а только увеличивается расходимость). Для регистрации распределения плотности мощности в поперечном сечении пучка, последний регистрируется ПЗС-линейкой. ПЗС-линейка 4 крепится на координатном столике 6, который позволяет перемещать ПЗС-линейку в трех направлениях. Управление ПЗС-линейкой и регистрации информационных сигналов осуществляются в режиме реального времени, с помощью персонального компьютера.

На рис. 2 показано как перемещение по вертикальной оси ПЗС линейки позволяет регистрировать распределение плотности мощности в горизонтальном направлении в разных сечениях в вертикальном направлении.

Используемая ПЗС-линейка имеет 3000 пикселей, расположенных на участке длиной 30 мм, что позволяет проводить измерения с точностью ≈ 10 мкм при шаге перемещения ≈ 5 мкм.

На стенде были исследованы два твердотельных лазера с диодной накачкой с длинами волн 440 и 532 нм.

В результате проведения эксперимента, а именно снятия зависимости показаний ПЗС-линейки по высоте ее расположения был получен ряд графиков, представляющих собой

зависимость интенсивности от номера пикселя в линейке. На рис. 3 представлен один из графиков.

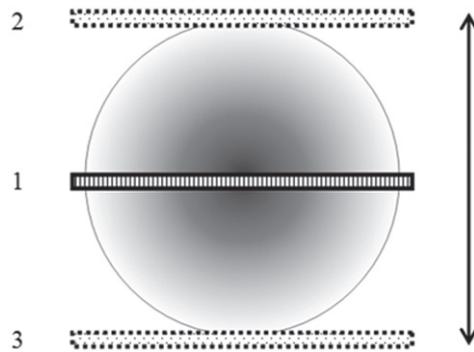


Рис. 2. Излучение лазера, попадающее на ПЗС – линейку в зависимости от ее положения:
1 – ПЗС-линейка на оси пучка;
2, 3 – крайние положения ПЗС-линейки

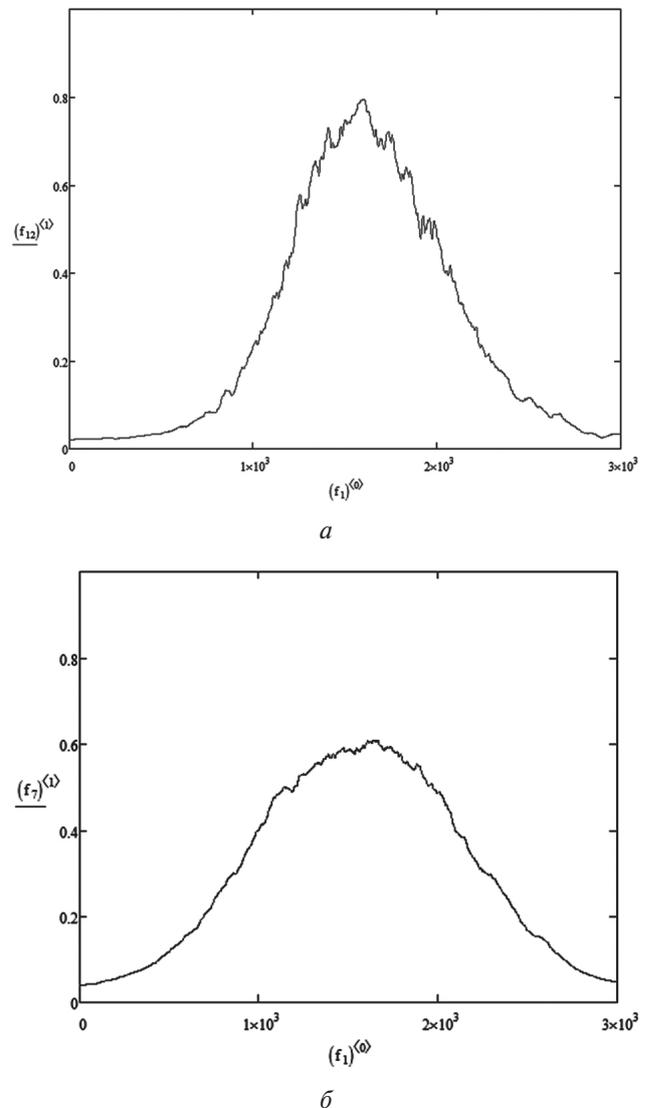
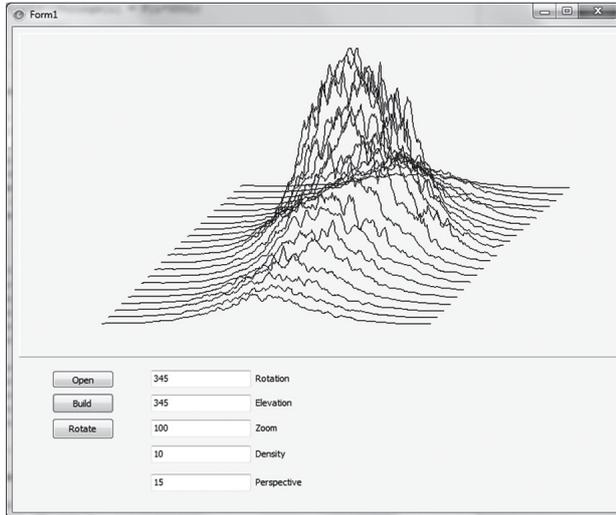
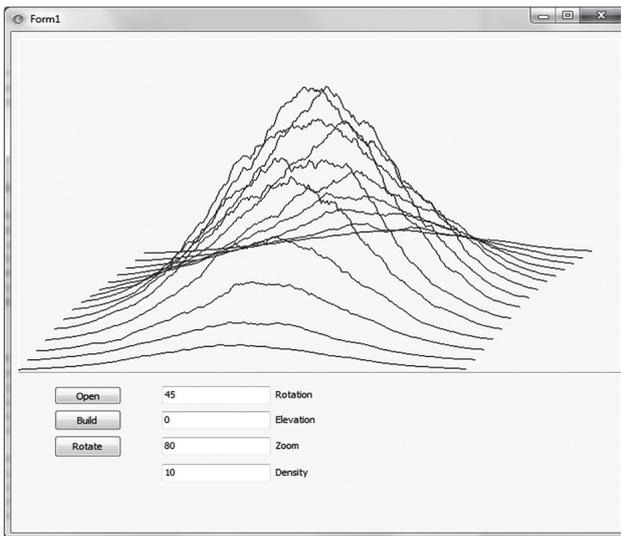


Рис. 3. Графики зависимости плотности мощности лазерного излучения от номера пикселя ПЗС-линейки:
а – для лазера с длиной волны $\lambda = 473$ нм;
б – для лазера с длиной волны $\lambda = 532$ нм

Для экспериментов с различными параметрами было получено большое количество двумерных графиков (как на рис. 3). С целью повышения качества анализа полученных результатов было разработано программное обеспечение, которое позволяет отображать изменение плотности мощности лазерного луча в поперечном сечении в виде трехмерного графика, в зависимости от положения линейки. Результаты таких построений представлены на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Распределения плотности мощности лазерного излучения в поперечном сечении луча при различных положениях линейки:
а – для лазера с длиной волны $\lambda = 473$ нм;
б – для лазера с длиной волны $\lambda = 532$ нм

Второй по важности задачей в изучении лазерного пучка системы захвата и удержания микрочастиц с помощью сфокусированного лазерного излучения является исследование физических размеров формируемой перетяжки.

Для проведения этого эксперимента была также разработана и создана экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 5.

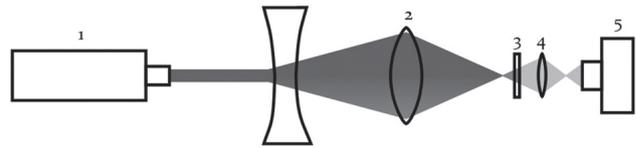


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для изучения физических размеров формируемой перетяжки: 1 – лазер; 2 – объектив; 3 – светофильтр; 4 – микрообъектив; 5 – ПЗС-матрица

Согласно схеме, излучение лазера 1 фокусируется с помощью объектива 2 и, проходя через светофильтр 3 и микрообъектив 4, попадает на ПЗС-матрицу 5.

Суть эксперимента заключается в подстановке в экспериментальную установку различных объективов и регистрации распределения мощности лазерного излучения в поперечном сечении пучка с помощью ПЗС-матрицы, на ПК.

Таким образом, в ходе проведения исследований были изучены свойства перетяжек, формируемых различными объективами совместно с различными лазерными источниками.

Физический размер перетяжки составил 3 пикселя, что при учете размера пикселя в 10 мкм дает размер перетяжки в 30 мкм.

Данный эксперимент позволил определить схему объектива, при использовании которой получается наименьшая перетяжка, а также установить предел минимальной частицы, которая может быть захвачена с помощью данного объектива. Исследованную систему можно использовать для захвата диэлектрических частиц размером от 2 до 10 мкм, что позволяет сделать вывод о возможности использования серийно выпускаемых лазеров для захвата микрочастиц при условии подбора соответствующей оптики.

ВЫВОДЫ

С целью создания компактного устройства для захвата диэлектрических микрочастиц в работе были изучены параметры излучения твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой. Были разработаны и созданы экспериментальные стенды с использованием ПЗС-линейки, которые обеспечили оценку поперечных размеров пучка, а также распределения плотности мощности излучения в поперечном сечении луча для использования в устройстве лазерного пинцета.

Литература

- [1] Letokhov, V. S. Cooling and trapping of atoms and molecules by a resonant laser field / V. S. Letokhov // Opt. Commun. – 1976. – № 19.
- [2] Ashkin, A. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. / A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. Bjorkholm, S. Chu // Opt. Lett. – 1986. – № 11. – P. 288–290.
- [3] Dienerowitz, M. Optical manipulation of nanoparticles: a review / M. Dienerowitz, M. Mazilu // J. Nanophoton. – 2008. – № 2.

- [4] Svoboda, K. Optical trapping of metallic Rayleigh particles / K. Svoboda, S. Block // Opt. Lett. – 1994. – № 19. – P. 930–932.
- [5] Gordon J. P, Radiation forces and Momenta in Dielectric Media / J. P. Gordon // Phys. Rev. – 1973. – № 8.

Поступила в редколлегию 19.08.2013



Мачехин Юрий Павлович, доктор технических наук, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженный метролог Украины, академик Академии наук прикладной радиоэлектроники, заведующий кафедрой физических основ электронной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: лазерная измерительная техника и оптоэлектронные приборы.



Меркулов Евгений Геннадиевич, аспирант кафедры физических основ электронной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: взаимодействие лазерного излучения с микро- и нанообъектами, компьютерное моделирование физических процессов, лазерная и оптоэлектронная техника и ее применение.

УДК 535.214:535.247.4

Дослідження лазерних джерел, які застосовуються при лазерному захопленні наночастинок / Ю.П. Мачехін, Є.Г. Меркулов // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2013. – Том 12. – № 3. – С. 466–470.

У статті наведено результати експериментальних досліджень розподілу щільності потужності в лазерному пучку. Проведено аналіз умов маніпулювання діелектричними мікрочастинками за допомогою лазерного випромінювання. У роботі показано, що завдяки використанню твердотільних лазерних джерел, які випускаються серійно, можна досягти необхідної щільності потужності і градієнта випромінювання в поперечному перерізі для захоплення діелектричних частинок.

Ключові слова: оптичний пінцет, твердотілий лазер, щільність потужності випромінювання, фокусування, ПЗС-лінійка.

Л.: 05. Бібліогр.: 05 найм.

UDC 535.214:535.247.4

Investigation of laser sources used in laser capture of nanoparticles / Yu.P. Machehin, E.G. Merkulov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2013. – Том 12. – № 3 – P. 466–470.

The paper presents the results of experimental studies of the distribution of power density in the laser beam. An analysis of the conditions of manipulating dielectric microparticles has been carried out using laser radiation. It is shown in the work that one can achieve the necessary power density and the gradient of radiation in the cross section for capturing dielectric particles thanks to using commercially produced solid-state laser sources.

Keywords: optical tweezer, solid-state laser, radiation power density, focusing, CCD-line.

Fig. 05. Ref.: 05 items.