

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВПО «КубГУ»)

Физико-технический факультет

Кафедра оптоэлектроники

КУРСОВАЯ РАБОТА

ОПТИЧЕСКИЕ ПИНЦЕТЫ

Работу выполнила _____ Юрова Наталия Алексеевна

Курс 3

Специальность 210401 – Физика и техника оптической связи

Научный руководитель

канд. физ.-мат. наук, доцент _____ А.П. Бойченко

Нормоконтролёр инженер _____ И. А. Прохорова

Краснодар 2013

РЕФЕРАТ

Курсовая работа 34 с., 7 рис., 27 использованных источников.

ОПТИЧЕСКИЙ ЗАХВАТ, МАНИПУЛИРОВАНИЕ МИКРООБЪЕКТАМИ, ЛАЗЕРНЫЕ ЛОВУШКИ, ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Объектом разработки данной курсовой работы являются устройства механического манипулирования микрообъектами с помощью оптического излучения, получившие название «оптический пинцет».

Целью работы является проведение библиографического анализ работ, посвященных механическому действию света на конденсированные среды и основанных на этом принципе функционирование оптических ловушек.

В результате выполнения курсовой работы были определены наиболее приоритетные направления в использовании указанного инструмента, одним из которых является изотопное разделение атомов. Реализация данного опыта является задачей в последующей работе.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Исследование принципов работы оптических пинцетов.....	5
1.1 Физические принципы.....	5
1.2 Силы оптического захват.....	6
1.3 Теории оптического захвата.....	7
1.4 Взаимодействие света с атомами.....	9
1.5 Основные типы оптических ловушек.....	10
2 Применение и перспективы развития оптических пинцетов.....	15
2.1 Области применения.....	15
2.2 Перспективы развития.....	19
2.3 Разделение изотопов.....	28
Заключение.....	30
Список использованных источников.....	32

ВВЕДЕНИЕ

Работа с микрообъектами является неотъемлемой частью многих отраслей науки и техники. И бесконтактные методы манипуляции являются одними из наиболее перспективных в данной области.

Представленный проект посвящен устройствам механического манипулирования микрообъектами с помощью оптического излучения, получивших название «оптические пинцеты». Актуальность темы определяется возможностью исследования объектов на микро и наноуровнях, а также изменения их физического состояния и структурной организации в результате механического действия когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона на отдельные атомы и их комплексы.

В настоящей работе поставлена цель: провести библиографический анализ работ, посвященных механическому действию света на конденсированные среды и основанных на этом принципе функционирование оптических ловушек («оптических пинцетов»)

И для ее достижения поставлены задачи:

- Проанализировать публикации, посвященные механическому действию света на атомы и молекулы конденсированных сред;
- На основе проведенного анализа определить наиболее приоритетные направления данной области естествознания и сделать соответствующие выводы.

В процессе исследования применялись методы теоретического исследования:

- теоретический анализ литературы для обоснования теоретических и практических направлений исследования;
- систематизация, обобщение.

1 Исследование принципов работы оптических пинцетов

1.1 Физические принципы

В настоящее время все большую популярность в био - и нанотехнологиях стал приобретать инструмент, известный как «оптический пинцет» (лазерный пинцет, оптическая ловушка) [1]. Данное приспособление позволяет манипулировать объектами, размеры которых составляют порядка 10нм-10мкм.

О возможности удержания микрочастиц с помощью остросфокусированного пучка света впервые стало известно в 1978г., когда Артур Ашкин и его коллеги проводили опыты с давлением лазерного излучения [2]. Реализован данный инструмент был в 1986 году. После этого началось его бурное развитие.

С самого начала лазерная ловушка предстала как отличное приспособление для работы с биоматериалом. Стало реально заглянуть в мир, недоступный ранее биофизикам. Оптический пинцет позволял прикладывать силы к микрообъектам там, где механическое воздействие невозможно или губительно. При небольшой мощности излучения разрушительное действие лазерного излучения сводится к минимуму. Впервые в качестве объекта исследования выступили бактериальные жгутики, изучить которые представлялось возможным с помощью удержания бактерии. Позже биофизикам удалось с помощью манипуляции клетками либо их органеллами изучить силы межклеточного и даже межмолекулярного взаимодействия. Таким образом, появилась возможность проанализировать характер изменения формы клетки, передвижение клетки, транспорт в пределах клетки и т.д.

Однако не только биология получила инструмент для новых исследований. С помощью оптического пинцета физикам удалось применить метод разделения частиц по их форме, размерам, диэлектрическим и другим свойствам. А в 1997 году Стивен Чу получил Нобелевскую премию по физике «за создание методов охлаждения и улавливания атомов лазерным лучом» [3].

Очень негативным является тот факт, что после экспериментов В.С. Летохова по торможению пучка атомов натрия лазерным излучением в 1979 году, рост числа исследований по методам оптического манипулирования в нашей стране значительно уменьшился, в то время как во всем мире это направление приобрело широкое развитие.

1.2 Силы оптического захвата

Оптическая манипуляция и удержание частиц с помощью лазеров основывается на явлении давления света, когда излучение представляется потоком частиц. Как известно фотон несет в себе импульс $p=h/\lambda$, а при взаимодействии с веществом может происходить обмен импульсами, т.е. свет изменяет направление распространения. Это означает, что существует сила, связанная с этим изменением. Так при определенных условиях частица, изменившая направление светового потока, испытывает силы, направленные в область повышенной интенсивности.

Объекты захвата. При рассмотрении оптического захвата важно учитывать размеры исследуемых частиц [4], поскольку в зависимости от данной характеристики выбирается модель, описывающая взаимодействие света и изучаемого объекта. Так при радиусе частицы больше $\lambda/20$ рассмотрение целесообразно проводить с точки зрения геометрической оптики. А при захвате наночастиц, размер которых меньше $\lambda/20$, их можно рассматривать как диполи, находящиеся во внешнем неоднородном электрическом поле. Причем при уменьшении размеров частиц, вследствие броуновского движения, их кинетическая энергия возрастает, что влечет за собой необходимость увеличения мощности лазерного излучения.

Суммарную силу, действующую на объект, принято разделять на две составляющие:

- 1) Сила рассеяния – это сила, которая возникает при изменении импульса света при его прохождении через вещество.

2) Градиентная сила – равна силе Лоренца, действующей на индуцированный диполь, совпадает с направлением градиента интенсивности поля.

Градиентная сила становится больше сил рассеяния только при рассмотрении частиц, размер которых много меньше длины волны излучения. Объекты, диэлектрическая проницаемость которых больше, чем окружающая их среда притягиваются в область высокой интенсивности. Если же их диэлектрическая проницаемость меньше, то они, напротив, выталкиваются из этой области. Металлические частицы отражают свет и поэтому не рассматриваются в качестве объектов захвата. Биологические объекты чаще имеют показатель преломления выше, чем у воды, что делает их пригодными для лазерного манипулирования [5].

1.3 Теории оптического захвата.

Лучевая теория оптического захвата. Рассмотрим диэлектрическую сферу, находящуюся в области фокуса лазерного луча. Известно, что при попадании света на маленькую непрозрачную частицу она испытает толчок. Однако при преломлении света прозрачными объектами может происходить их притягивание в область высокой интенсивности. Т.о. происходит изменение импульса, и, согласно третьему закону Ньютона, сфера испытает равное и противоположное по направлению действие, связанное с этим изменением.

На рис.1. [1] показано движение в области фокуса гауссова пучка. Когда шар смещается от центра пучка, как на рисунке (а), наибольшее изменение импульса лучей с большей интенсивностью вызывает появление силы, направленной к центру ловушки. Когда шар расположен в центре пучка, как показано на рисунке (b), сила направлена в сторону фокуса. Также приведена формула для расчета суммарной силы, действующей на частицу [6].

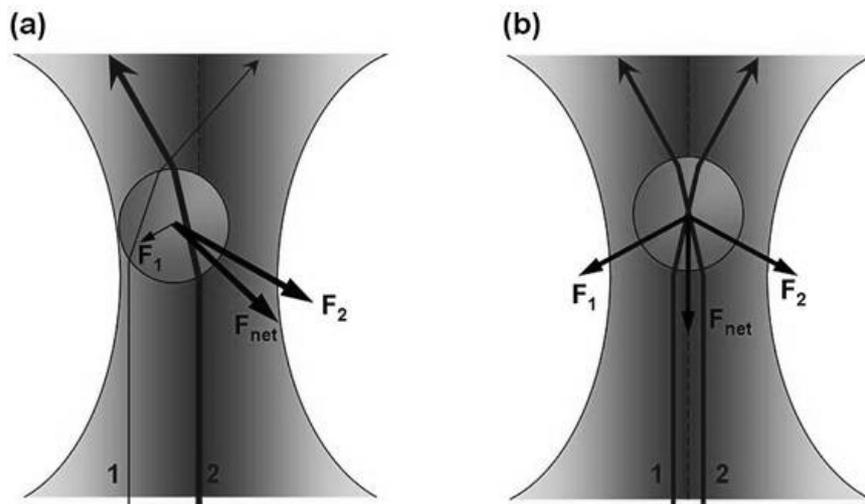


Рисунок 1 - Иллюстрация к лучевой теории оптического захвата частиц

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^4 \vec{F}_i = \frac{a^2}{c} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta \int_0^{2\pi} \vec{f} I_0 d\psi. \quad \text{- полная сила давления света на шар}$$

$$\vec{f} = \sum_{i=1}^4 \vec{f}_i \quad \text{- величина, характеризующая изменение потока импульса падающей волны}$$

где a – радиус шара; c – скорость света; θ, ψ - сферические координаты точки падения луча, $I_0(\theta, \psi)$ – распределение интенсивности света в падающем световом пучке.

Произведя расчет проекций этой силы вдоль оси распространения и поперек луча, можно говорить о характере движения частицы в пространстве. Расчет поперечной и продольной составляющих этой силы показывает, что пучок, имеющий неоднородное распределение интенсивности, «затягивает» частицу, имеющей показатель преломления больше, чем окружающее пространство, в фокус этого пучка.

Комбинация продольного и поперечного захвата позволяет создать 3-D ловушку. Однако для захвата в продольном сечении требуется преодоление сил, толкающих частицу из фокуса (давление света, сила тяжести), что достигается увеличением фокусировки.

Релеевская теория оптического захвата. В [7] были получены аналитические выражения для сил давления, действующих на частицу

размером $a = \lambda/20$ (т.н. Релеевское приближение) при рассеянии на ней гауссова пучка. Общая сила рассматривалась в виде суммы двух составляющих.

$F = F_{\nabla} + F_S$ где F_{∇} - сила, возникающая при наличии градиента интенсивности светового поля, F_S - сила, возникающая при рассеянии света на

$F_{\nabla} = 2\pi a^3 \frac{\sqrt{\varepsilon_0}}{c} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} \right) \nabla |\mathbf{S}|$, - сила, возникающая при наличии градиента интенсивности светового поля

$F_S = \frac{8}{3} \pi \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^4 a^2 \frac{\sqrt{\varepsilon_0}}{c} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} \right)^2 \mathbf{S}$, - сила, возникающая при рассеянии света на частице

где \mathbf{S} – вектор Пойтинга, a – радиус частицы, ε - диэлектрическая проницаемость частицы, ε_0 – диэлектрическая проницаемость среды.

Обобщенная теория Лоренца-Ми оптического захвата. Точный расчет сил, действующих в оптической ловушке достаточно сложен, поэтому пользуются приближениями, когда размер частицы много больше или много меньше длины волны. Однако практический интерес представляет и захват частиц размерами порядка длины волны и необязательно сферической формы.

В [8] были исследованы силы, действующие в лазерном пинцете на частицу размерами порядка 0,5-7,5 мкм, что соответствует промежуточному состоянию между рассмотренными приближениями. Оценка процессов была осуществлена в рамках электромагнитного подхода на основе обобщенной теории Лоренца-Ми, которая применима для частиц любых размеров.

1.4 Взаимодействие света с атомами.

Вопросы взаимодействия света с атомами имеют очень большое фундаментальное и прикладное значение. Первые эксперименты были связаны с торможением атомов. Поглощение фотона приводит к передаче импульса против его движения. Излучение же происходит по всем направлениям, поэтому в среднем передачи импульса не происходит. Т.о. атом тормозится.

Резонансные ловушки. Сила, возникающая при воздействии на нейтральные атомы, может быть существенна при частоте излучения близкой к линии резонанса атома. Идея применения сил резонансного давления была применена для создания ловушек для движущихся атомов, теоретически позволяющих охладить атом до тысячных кельвина.

Действие излучения на атомы может позволить проводить селекцию по скорости, разделить изотопы, генерацию поперечно охлажденных или продольно замедленных и ограниченных атомных пучков, также ускорение нейтральных атомов до высоких скоростей [9].

Возможность создать поток медленных атомов со скоростью порядка 1 см/с открывает широкий спектр приложений для т.н. атомной оптики [10]. Это новое направление в науке начало бурно развиваться, и уже реализованы на основе давления света: зеркала, разделители пучков, линзы для атомов, атомные интерферометры, демонстрирующие высокую чувствительность, перспективные приложения включают «атомный пинцет», атомную литографию, атомные лазеры [11].

1.5 Основные типы оптических ловушек.

Однопучковая 2-D ловушка. Теоретические расчеты показывают [2], что сфокусированный пучок мощностью 1 Вт действует на частицу радиуса λ , при условии, что она идеально отражает весь импульс падающего на нее света, с силой, равной 10^{-3} дин. В абсолютном значении это малая величина, но если учесть малую массу частицы, она дает ускорение $F/m \sim 10^5 g$, где g — ускорение силы тяжести. Первые эксперименты по наблюдению ускорения микронных частиц, находящихся в жидкости и газе, описаны в [2] (рис. 2). В эксперименте использовались латексные ($n = 1,58$) сферические частицы 0,59, 1,31 и 2,68 мкм в диаметре, растворенные в воде ($n = 1,33$). Пучок излучения аргонового лазера горизонтально фокусировался на отдельную частицу через стеклянную кювету толщиной 120 мкм.

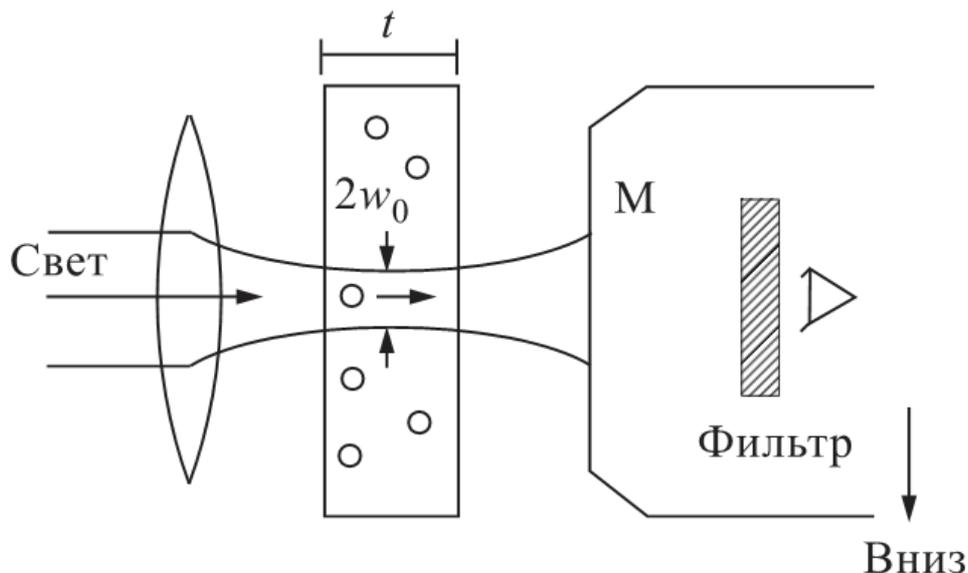


Рисунок 2 - Схема эксперимента по ускорению движения частицы

Наблюдение велось с помощью микроскопа. Частица размером 2,68 мкм попадала в пучок мощностью 19 мВ не по центру, притягивалась к оси пучка и ускорялась в направлении движения света (скорость ~ 26 мкм/с) пока не упиралась в стену кюветы, оставаясь захваченной в пучке. После отключения лазера частиц начинала броуновское движение.

Экспериментально показано, что частицы с более высоким, чем окружающая среда, показателем преломления притягиваются в области высокой интенсивности. Менее плотные, чем окружающая среда, частицы (например, пузырьки воздух размером 8 мкм, созданные взбалтыванием) выталкивались из пучка.

Левитация. Первая ловушка была создана в 1970 г. [2]. В разработанной тогда «левитационной» ловушке использовалось давление потока фотонов, направленного вверх и действующего против силы гравитационного притяжения (рис. 3).

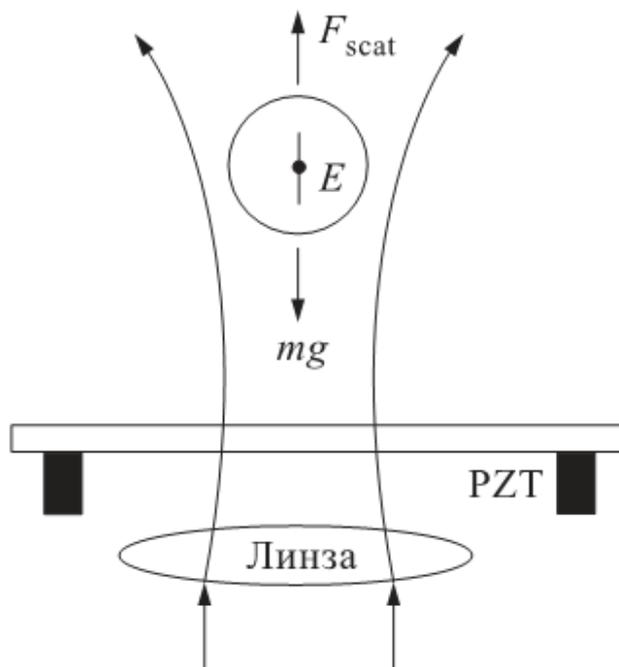


Рисунок 3 - Схема эксперимента по левитации

Сила давления света мала по сравнению с другими силами и, как правило, должна действовать против силы тяжести. Величина силы, создаваемой лазером мощностью в несколько милливатт, обычно находится в диапазоне нескольких пиконьютонов. Однако частицы с размерами порядка мкм могут быть подняты и удержаны против силы тяжести. С использованием оптической левитации наблюдалось изменение силы давления излучения на прозрачные диэлектрические сферические объекты в зависимости от длины волны и размера.

Двухпучковая 3-D ловушка. Для стабильного захвата вдоль оптической оси была предложена [2] двухпучковая ловушка, использующая два встречных гауссовских пучка. Экспериментально наблюдалось, как частица, находящаяся вблизи одного из пучков, притягивалась в точку равновесия. При отключении одного из лазеров частица начинала быстро ускоряться в направлении действующего пучка и медленно возвращалась в точку равновесия, когда лазер снова включался.

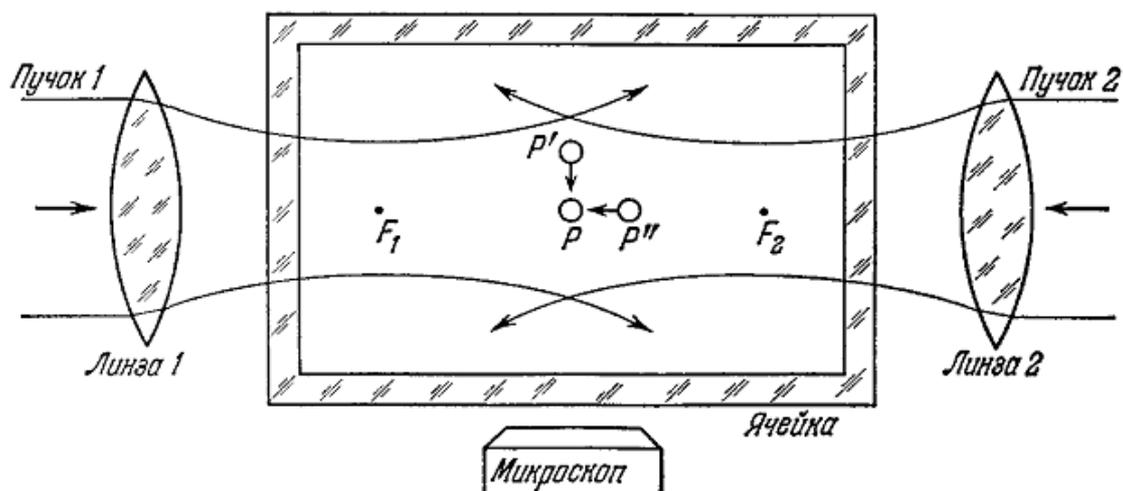


Рисунок 4 - Схема двухпучковой ловушки

На рис. 4. приведена общая схема данной ловушки [9]. Точки F_1 и F_2 являются фокусами пучков 1 и 2 – места наименьшего диаметра пучков. Точка P является местом устойчивого равновесия, поскольку любое смещение приводит к появлению возвращающей оптической силы. В P' поперечная сила толкает частицу назад в P . В точке P'' сила, оказываемая пучком 1, уменьшается из-за расхождения пучка, однако интенсивность пучка 2 возрастает, увеличивая силу его воздействия, что приводит к возврату частицы в положение P .

Однопучковая 3-D ловушка. В первых «левитационных» ловушках стабильность осевого захвата зависела от баланса рассеивающей силы и силы гравитации, так как осевая градиентная сила мала. В [2] описана однопучковая ловушка, в которой создан продольный градиент интенсивности за счет сильной фокусировки пучка. С помощью этой ловушки стабильно захвачены диэлектрические частицы размером от 0,025 до 10 мкм в водном растворе. Экспериментально продемонстрировано существование отрицательного давления излучения, или силовой компоненты (которая связана с осевым градиентом интенсивности), притягивающей частицу обратно в фокус.

Физическая природа обратной градиентной силы особенно наглядна при рассмотрении частиц, диаметр которых существенно превышает длину волны. Тогда для описания можно использовать лучевую оптику.

Альтернативой однопучковой ловушке с сильной фокусировкой является двухпучковая ловушка, описанная ранее и способная производить более мощную захватывающую силу при меньшей числовой апертуре NA. Основным недостатком такого устройства — техническая сложность.

Интерференционная ловушка. Несмотря на большой успех, однопучковые ловушки имеют определенные недостатки, если используются в схеме классического микроскопа (т. е. свет направлен сверху вниз). В таком случае помимо сил тяготения, действующих на ловушку, необходимо преодолевать возникающие поверхностные силы [12].

Чтобы преодолеть эти недостатки, в [13] предлагается модифицировать ловушку — дно кюветы покрыть сильно отражающим слоем. Тогда в результате интерференции падающей и отраженной волн образуется стоячая гауссовская волна, и нанообъекты будут локализованы в пучностях (разделенных $\lambda/2$ вдоль оптической оси) такой ловушки. Даже очень малое зеркальное отражение может производить градиентную силу того же порядка, что и сила рассеяния. Даже без специального сильно отражающего покрытия дна кюветы, градиентная сила дает значительный вклад в общую силу излучения, и возможен захват частиц большего размера, чем с помощью однопучковой ловушки.

Другой тип интерференционных ловушек был рассмотрен в [14], где исследуются силы, возникающие при взаимодействии распространяющихся навстречу друг другу коротких импульсов лазерного излучения, которые могут направлять атомы в небольшие области перекрытия импульсов.

2 Применение и перспективы развития оптических пинцетов

2.1 Области применения.

Оптические пинцеты — бесконтактный инструмент, использующий один или несколько лазерных пучков для генерации сил порядка пН, достаточных для манипулирования объектами микромира. Эта возможность представляет особый интерес в ряде областей: атомная физика, биология, микрохирургия, нанотехнологии и микромеханика, также при изучении свойств коллоидов, микропотоков и световых пучков.

Оптическое манипулирование с помощью лазеров применимо к объектам от атомов до больших молекул и небольших диэлектрических частиц, варьирующихся в размере от десятков нанометров до десятков и сотен микрометров, также к таким биологическим объектам, как вирусы, отдельные живые клетки и внутриклеточные включения [15, 16, 17].

Манипулирование биообъектами. В биологии оптические ловушки открывают возможности бесконтактного воздействия (без оптического разрушения) на живые клетки. Оптический пинцет позволяет управлять отдельными молекулами с точностью до нанометров и измерять силы, действующие на эти молекулы, с точностью 1-100 пН. Появление оптических ловушек открыло несколько важных областей исследования в биофизике: манипуляции с живыми вирусами и бактериями, отдельными молекулами ДНК [18] и человеческими гаметами; клеточная микрохирургия, исследование двигательных протеинов, митотических хромосом и др.

Среди уникальных приложений — изучение двигательных молекул и механоэнзимов. Благодаря оптической ловушке было детально отслежено их пошаговое движение с точностью ~ 10 нм/шаг, когда они двигаются вдоль субмикронной трубки. В последних, поражающих воображение экспериментах — прямые измерения сил, создаваемых РНК-полимеразой при движении вдоль молекулы ДНК. Новые эксперименты по манипулированию отдельными молекулами позволили проверить физические модели, описывающие свойства

ДНК, способом, который был ранее невозможен. Появилась возможность наблюдать активность отдельного фермента, действующего на молекулу ДНК, и проследить силы, которыми молекулы двигательных тканей (органов) воздействуют на биологические молекулы. Стало возможным напрямую контролировать влияние связывания белков ДНК на свойства ДНК и использовать эти измерения, чтобы определить энергию взаимодействия. Детальные знания индивидуальных взаимодействий между молекулами важны для понимания сложных механизмов, действующих в реальных биологических процессах.

Другая большая область — измерение механических (упругих) свойств частей клеток цитоплазмы, жгутиков бактерий, светочувствительных оболочек клеток эритроцитов, отдельных микротрубок эндоплазматической сети, отдельных светочувствительных волокон, мембран нервных клеток, длинных спиралей отдельных молекул ДНК.

Возможность разделения живых клеток был применен для поиска и клонирования новых высокотемпературных анаэробных бактерий «archaea», что имеет важное значение в открытии новых высокотемпературных ферментов. Ведутся исследования по распознаванию клеток, свариванию клеток, изучению движения хромосом во время деления клеток.

Комбинирование оптических ловушек с другими лазерными пучками позволяет использовать их в микрохирургии. Например, захватывается хромосома инфракрасным (1064 нм) лазером-ловушкой и разрезается на небольшие части зеленым (532 нм) лазером. Такое устройство называется «оптическим скальпелем». Это возможно, так как большинство биологических структур практически не поглощают в инфракрасной области, но сильно поглощают свет в зеленой части оптического диапазона длин волн.

Физика коллоидов. Оптические ловушки позволяют исследовать силы, возникающие при взаимодействии коллоидов, полимеров, также выстраивать несколько коллоидных частиц в различные структуры [19].

Использование оптической ловушки позволило провести точные измерения с очень высоким разрешением динамики поведения коллоидных частиц в растворе за очень короткое время.

Энтропийные силы взаимодействия между двумя большими (размером порядка мкм) сферическими частицами, помещенными в раствор коллоидных частиц гораздо меньшего размера, были измерены с помощью линейно сканирующей оптической ловушки. При этом частицы «нанизаны» на протяженный (линейный) фокус: свободно перемещаются в одном направлении — вдоль фокальной линии и ограничены в любом перпендикулярном направлении. Такая методика позволила провести измерения функциональной формы потенциальной ямы с высоким разрешением (15 нм). Измерения показали, что при низкой концентрации коллоидного раствора сила притяжения больших частиц является монотонной, при высокой концентрации большие частицы очень редко притягивались друг к другу, что можно рассматривать как новый способ стабилизации суспензии только на основе энтропии.

Микромеханика. В последнее время тенденция к микроминиатюризации в исследованиях и разработках делает актуальным производство микромашин и молекулярных двигателей, разработку микромеханизмов и микрокомпонент.

Лазерные пинцеты дают возможность бесконтактного манипулирования хрупкими объектами, уменьшая риск их разлома, загрязнения и порчи. Недавно была показана возможность захвата, манипулирования, ориентирования и вращения несферических частиц. Микромеханизмы могут быть различной формы, в зависимости от задачи, которую они выполняют. Сложность механизма определяется количеством деталей и этапов сборки.

Рассматривался оптический захват в области перетяжки сильно сфокусированного гауссовского пучка частиц, имеющих различные формы: сферическую, цилиндрическую, кольцевую, звездообразную, кубическую и др., размером 1-10 мкм. Бесконтактное манипулирование и ориентирование таких объектов обеспечивает возможность упрощения сборки (монтажа), активации и, возможно, ремонта микромеханизмов.

В исследованиях используется оптический вращательный момент (порядка 10^{-15} Н·м) для управления вращением микромашиного элемента, захваченного в оптической ловушке. В эксперименте микромашиный двулучепреломляющий элемент (квадратная пластинка) из углекислого кальция (CaCO_3) размером 1 мкм захвачена и вращается (с частотой до 350 Гц) сфокусированным лазерным пучком (1064 нм, мощность 300 мВт) с круговой поляризацией. При этом оптический вращательный момент передается второму микромашиному элементу (шестеренка с 6 зубцами) диаметром 10 мкм (зубцы размером около 1 мкм) из аморфного диоксида кремния (SiO_2 , $n = 1,46$) через движение окружающей жидкости (вода). Второй элемент был изготовлен методом фотолитографии. Материал был выбран так, чтобы элемент был достаточно прозрачным, чтобы не подвергаться оптическому разрушению, и показатель преломления был выше, чем у окружающей среды.

Максимальный вращательный момент, который может быть получен при падении света с круговой поляризацией на двулучепреломляющий кристалл, достигается при толщине $\lambda/2$. Например, частицы CaCO_3 толщиной 1,4 мкм будут $\lambda/2$ -пластинами для света с длиной волны $\lambda = 488$ нм. При этом оптический вращательный момент не очень велик (для лазера с $\lambda = 488$ нм и мощностью 1 Вт вращательный момент равен $6,1 \cdot 10^{-16}$ нм), однако позволяет вращать частицы размером порядка мкм с очень высокой скоростью. При вращении исландского шпат с частотой 100-200 Гц кремниевая шестеренка вращается с частотой $\sim 0,2$ Гц в обратную сторону (рис. 5). Эффективность передачи импульса между микроэлементами $\sim 50\%$.

Однако проще и эффективнее вращать непосредственно диэлектрические элементы микромеханизмов, например, за счет передачи им орбитального углового момента вихревого лазерного пучка. Формирование таких пучков возможно с помощью дифракционных оптических элементов.

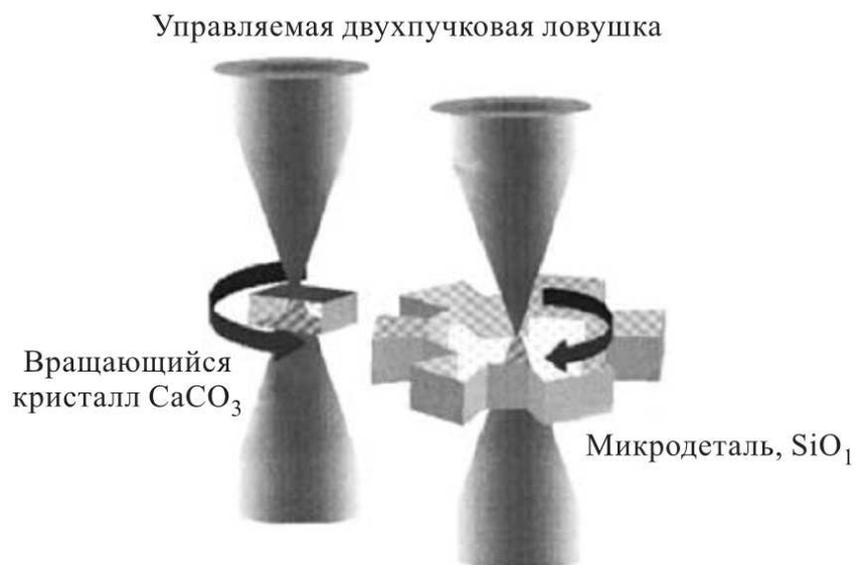


Рисунок 5 - Передача вращательного момента от
двулучепреломляющего кристалла кремниевой шестеренке

2.2 Перспективы развития.

Исторически основная проблема в экспериментах по изучению давления света состояла в разрушительных эффектах от нагрева объектов. Чаще всего эта проблема обходится с помощью помещения слабопоглощающих диэлектрических частиц в относительно прозрачную среду, как правило, жидкость. Однако из-за нагрева в области высокой интенсивности частицы все равно могут повреждаться. Так, эксперимент с коллоидными полистироловыми латексными частицами, растворенными в воде, показал, что они повреждаются при высоких оптических интенсивностях: сферы размером порядка микрометров при использовании мощности в доли милливатт выдерживали около десятка минут, затем уменьшались в размере и испарялись.

Кроме того, при использовании классической ловушки невозможно захватить менее плотные, также непрозрачные частицы, которые выталкиваются из областей высокой интенсивности. Захват менее плотных частиц возможен, однако при этом они должны иметь специальную форму, например, в виде кольца [20].

В однопучковых ловушках перемещение ловушки обычно производится движением платформы микроскопа. Для независимого управления многопучковой ловушкой обычно требуются сложные установки, оснащенные системой зеркал или акустооптическими дефлекторами.

Для преодоления описанных выше недостатков происходит поиск различных усовершенствований — это наиболее бурно развивающееся в последнее время направление. И наиболее перспективным здесь является использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ).

Полые (кольцевые) пучки. Темные или отражающие частицы могут быть оптически захвачены в жидкости с помощью кольцевых (полых, вихревых) пучков в темной осевой части пучка [21]. Такие пучки несут угловой момент, связанный с вихревой структурой волнового фронта даже при линейной поляризации света. Захваченные поглощающие частицы вращаются благодаря передаче этого момента от вихревого пучка. Направление вращения частицы зависит от направления закручивания пучка.

Доказывается, что вращение происходит именно благодаря орбитальному угловому моменту, не влиянию температурных или рассеивающих сил. При этом измерения показали, что параксиальное приближение для углового момента верно даже для сильно сфокусированного пучка. Также замечено, что диаметр вращаемых частиц зависит от диаметра кольца в пучке.

В [22] экспериментально демонстрируется 3D-захват менее плотных, чем окружающая среда, частиц (полые стеклянные шарики диаметром 20 мкм в воде) с помощью одного сильно сфокусированного кольцевого (полого) пучка. Захват происходит в осевой темной части пучка. При этом частицы с высоким показателем преломления были захвачены тем же пучком в кольце с высокой интенсивностью.

В области лазерного охлаждения и захвата нейтральных атомов полые пучки также представляют все больший интерес для реализации возможностей атомной оптики. Отталкивающее (от областей высокой интенсивности) действие оптической дипольной силы в поле лазера, настроенного выше резонанса, позволяет ограничить движение атомов в темной внутренней части

полого пучка и формировать пучки медленных атомов. Такие ловушки имеют преимущество по сравнению с захватом в области высокой интенсивности лазерного поля, настроенного ниже резонанса, так как в этом случае минимизируются нежелательные эффекты, такие как нагрев при рассеянии фотонов, возмущения энергетических уровней световыми сдвигами.

В некоторых исследованиях описываются результаты по формированию полого пучка с помощью аксикона, дополненного сферической линзой (в фокальной плоскости которой получается узкое кольцо) для экспериментального исследования холодных атомов. Однако в этом случае резкое кольцо формируется только на узком продольном отрезке, так что захват будет слабым за пределами этого участка.

В [23] теоретически исследуется использование пучков Гаусса-Лагерра с различными азимутальными индексами, настроенных ниже резонанса для формирования тороидных оптических дипольных ловушек в 2D-атомном конденсате Бозе-Эйнштейна. Показано, что моды Гаусса-Лагерра более высокого порядка обеспечивают более глубокую потенциальную яму и более компактную концентрацию атомов при фиксированном радиусе тороида и мощности лазера.

Для формирования полых пучков применялись: геометрооптический метод, метод селекции поперечных мод, метод оптической голографии, синтезированные на компьютере голограммы, оптические нелинейные эффекты.

Также используются полые оптические волокна. Например, в [24] рассматривается полое цилиндрическое оптическое волокно в качестве «атомного волновода». Показано, что затухающие волны, уходящие из полой сердцевины волокна, создают достаточный потенциальный барьер для транспортировки атомов с низкими потерями мощности при оптимальной настройке выше резонанса. Однако световые пучки имеют преимущество перед оптическими волокнами, так как при использовании последних необходимо преодолевать притяжение, связанное с силами Ван-дер-Ваальса.

Также рассматривается возможность использования в качестве полого светового пучка LP_{01} - моды на выходе полого оптического волокна. Однако было показано, что этот пучок не сохраняет минимум интенсивности в центре при распространении в свободном пространстве и, следовательно, не может служить для протяженной транспортировки томов.

С другой стороны, пучки Гаусса-Лагерра и Бесселя высокого порядка распространяются в свободном пространстве, не меняя своей формы и сохраняя минимум интенсивности в центре.

Анализируется оптический дипольный потенциал для формирования пучка медленных атомов при использовании различных полых световых пучков - как пучков Гаусса-Лагерра, так и пучков Бесселя. Показано, что пучки Гаусса-Лагерра предпочтительны для фокусировки томов, пучки Бесселя высокого порядка — для транспортировки атомов на большие, по сравнению с пучками Гаусса-Лагерра, расстояния.

«Оптические бутылки». В [25] предлагается использовать синтезированную на компьютере голограмму для формирования светового пучка, имеющего продольно локализованную нулевую интенсивность в фокусе. Пучок представляет собой суперпозицию двух мод Гаусса-Лагерра, фазовый сдвиг между которыми подобран так, чтобы при интерференции они взаимоуничтожились в общем фокусе, окруженном по всем направлениям областями высокой интенсивности. Предлагается называть такие пучки *оптическими бутылками*. Возможно их использование для стабильного 3D-захвата поглощающих и менее плотных, чем окружающая среда, частиц.

Анализируется резонаторное усиление пучков, формирующих «оптические бутылки» для дипольного захвата объектов, притягиваемых в область минимальной интенсивности света. Базовая модель «оптической бутылки» улучшена в смысле усиления потенциального барьера добавлением новых компонент Гаусса-Лагерра. Каждая из рассматриваемых компонент соответствует суперпозиции поперечных мод резонатора. Фазовый сдвиг между компонентами достигается смещением зеркала резонатора.

Оптическое вращение. Если в первых экспериментах было показано, что частицу можно захватывать и перемещать, то теперь имеется возможность вращать и поворачивать (ориентировать) частицы, используя несколько таких ловушек — состыковывать. Оптическое вращение предлагает бесконтактный механизм для приведения в действие оптических микромашин и микрокомпонент типа шестеренок [26]. В биологии это дает возможность легко ориентировать биологические препараты.

Вращения добиваются различными способами. Например, есть эксперименты, в которых при рассеянии света на микрообъектах, имеющих специальную спиральную форму, они поворачиваются. Частицу можно вращать, если вращать световой пучок, в который он захвачен.

Однако наиболее распространены три способа вращения пойманных частиц:

- за счет спинового углового момента, который существует у полей с круговой поляризацией (при этом вращаются только двулучепреломляющие частицы, например, частицы из исландского шпата);

- за счет орбитального углового момента, возникающего из-за спиральной особенности фазы, например, пучки Гаусса-Лагерра и Бесселя высших порядков (передача орбитального углового момента происходит за счет частичного поглощения света в частице);

- за счет изменения фазового набег в интерференционной картине (при захвате частицы в интерференционную картину между пучком, имеющим винтовой волновой фронт (например, пучок Гаусса-Лагерра), и гауссовским пучком и вращении этой картины с помощью изменения длины пути одного из пучков).

Бесселевские пучки. Бесселевские пучки имеют ряд применений, например, для транспортировки атомов, и в качестве нового типа оптических ловушек, когда возможен одновременный захват и манипулирование цепочкой частиц.

Механизм построения цепочек частиц зависит от конструкции ловушки — направлен пучок вниз (стандартная ловушка) или вверх против силы гравитации (инверсная ловушка). В стандартной конфигурации необходимо использовать сильно сфокусированный пучок, чтобы последовательно поднимать частицы со дна и состыковывать их в цепочку. В инверсной ловушке частицы толкаются световым пучком вверх в область фокусировки и выстраиваются в вертикальную цепочку. В обоих случаях высота цепочки определяется расходимостью пучка.

Классические ловушки используют гауссовские световые пучки, которые не способны захватывать частицы в нескольких положениях вдоль оптической оси, разделенных расстоянием более чем несколько мкм, так как пучок искажается захваченной частицей и сильно расходится. Как правило, захват ограничивается только одной частицей и только в области фокуса.

В то же время бесселевский пучок является не расходящимся и, кроме того, имеет способность восстанавливаться через некоторое расстояние после того, как часть пучка была искажена препятствием. В работах это свойство используется для одновременного захвата одним бесселевским пучком нулевого порядка (такой пучок имеет протяженную осевую фокальную линию и выглядит, как спица, сохраняя свою интенсивность и размер) нескольких частиц, разделенных большим расстоянием (несколько миллиметров) вдоль оптической оси.

Демонстрируется оптическое манипулирование силиконовыми частицами (1-5 мкм), также биологическими клетками с помощью светового бесселевского пучка нулевого порядка. Теоретически исследуется возможность использования световых пучков Бесселя, формируемых аксиконом, для дипольных ловушек холодных атомов. Пучки Бесселя нулевого порядка позволяют формировать протяженные (вытянутые) оптические ловушки, удобные для изучения захваченных газов. Пучки Бесселя первого порядка можно использовать для формирования очень узких атомных волноводов протяженностью более сантиметра.

Матрицы ловушек. Расширение возможностей ловушек также достигается за счет формирования 2D- и 3D- матриц ловушек. Матрицы оптических ловушек, созданных с помощью ДОЭ, имеют огромный потенциал в манипулировании и организации микрочастиц в сложные структуры, избирательной сортировки их и изучения совместного поведения в многокомпонентных структурах.

Массивы 2D-ловушек (частицы прижаты к препаратному столику микроскопа) могут применяться для выстраивания элементов микрооптомеханических систем, формирования различных микроконфигураций, сортировки биологических клеток, а также в других приложениях, где не требуется продольное манипулирование объектами.

Система из двух ловушек была реализована с помощью разделителя пучка и преломляющей оптики. Однако такой подход очень усложняется, если нужно большее число ловушек.

Альтернативным и наиболее перспективным подходом является разделение и направление лазерного пучка с помощью ДОЭ, в связи с чем появился термин *holographic optical tweezers* (HOT).

Так были рассчитаны фазовые ДОЭ, предназначенные для создания 3D-массивов оптических ловушек. Экспериментально сформирована матрица из 8 гауссовских пучков, половина из которых фокусируется в плоскости на расстоянии 100 мм от ДОЭ, а другая — на расстоянии 110 мм от ДОЭ.

Дифракционные оптические массивы могут использоваться для исследования механизмов фазовых переходов адсорбированных атомных и молекулярных слоев, при формировании упорядоченных коллоидных кристаллов, что перспективно в области оптических и фотонных цепей. С помощью голографических элементов можно создавать матрицу потенциальных ям (рис. 6) аналогичных тем, которые встречают атомы при попадании на кристаллическую поверхность. Возможность оптического захвата и манипулирования большим количеством объектов может быть также полезна в биоинженерии, например, для контроля организации клеток при выращивании органов и тканей.

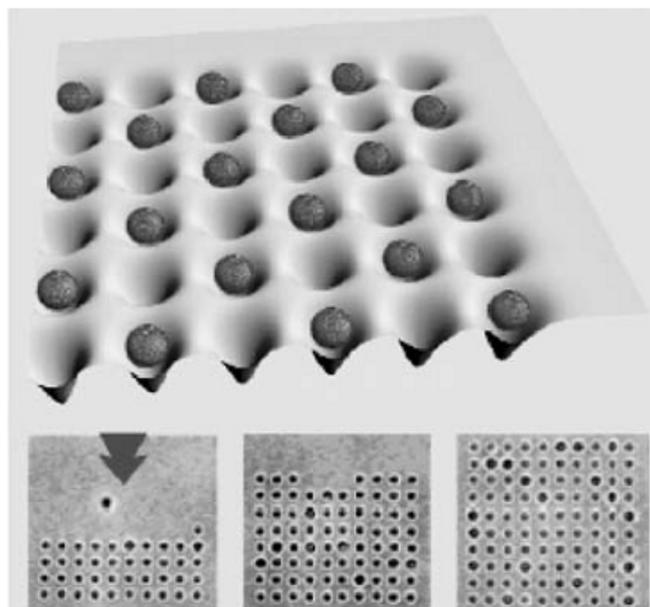


Рисунок 6 - Матрица потенциальных ям, созданная голографическими элементами

Динамическое управление. Обычно захваченную частицу двигают механическим перемещением пучка или с помощью перемещения платформы микроскопа. Существует также оптический способ для направления захватывающего пучка с использованием адаптивных зеркал или акустооптических модуляторов. Однако такие системы становятся довольно сложными, если необходимо реализовать 3D-захват или несколько ловушек.

С помощью синтезированных на компьютере голограмм, записанных на жидкокристаллический дисплей (LCD), можно достаточно просто динамически управлять количеством, позициями и формой оптических ловушек как в 2D-, так и в 3D-пространстве.

Использование множества динамических пучков является перспективным средством для конструирования и усовершенствования микромашин, микровихревых механизмов, насосов, клапанов, выращивания коллоидных кристаллов, формирования полимерных фотонных проводов.

Интерактивное оптическое манипулирование также может быть использовано в микросистемах, использующих микропотоки и создания т.н.

«лабораторий на чипе», обеспечивая точную сортировку и анализ определенных частиц или биологических клеток.

В некоторых работах демонстрируется оптический захват и перемещение коллоидных частиц в режиме реального времени с использованием программируемых модуляторов света.

В других рассматриваются методы по формированию больших массивов оптических ловушек и их динамическому перестраиванию под управлением компьютера. При этом ловушки могут быть различных типов — гауссовские, вихревые, бесселевские и др.

Основными недостатками пространственных модуляторов света на жидких кристаллах пока остаются низкая дифракционная эффективность (сильный дифракционный шум из-за крупной дискретности модуляторов) и недостаточное для реализации сложных фазовых распределений разрешение матрицы пикселей. Измерения показали, что после жидкокристаллического модулятора остается 15% энергии падающего пучка.

Таким образом, при использовании пространственных модуляторов света на жидких кристаллах возникает необходимость решать две основные проблемы: разработка быстрых алгоритмов расчета фазовых функций по малому количеству пикселей, также повышение дифракционной эффективности.

«Тяговые лучи». В [27] говорится о том, что в NASA ведется разработка проекта, посвященного внедрению технологии оптического пинцета в области астрофизики. Планируется с помощью летательных аппаратов, на которых установлено соответствующее оборудование, проводить сбор материалов с недоступных для прямого контакта космических объектов. Для этой цели предлагается использование кольцевых пучков Бесселя, направленных в заданную область. Однако пока данная задача является довольно амбициозной, поскольку на сегодняшний день манипулирование микрообъектами возможно лишь на малые расстояния, а стабильность захвата требует высоких мощностей лазерных систем.

2.3 Разделение изотопов

В [9] А. Ашкин показывает возможность разделения различных газов с помощью оптической манипуляции, основанной в данном случае на силах радиационного давления (рис. 7). В предлагаемой схеме лазерный свет действует как насос, толкая резонансные атомы (кружки) в камеру 1, не действуя на нерезонансные атомы (точки).

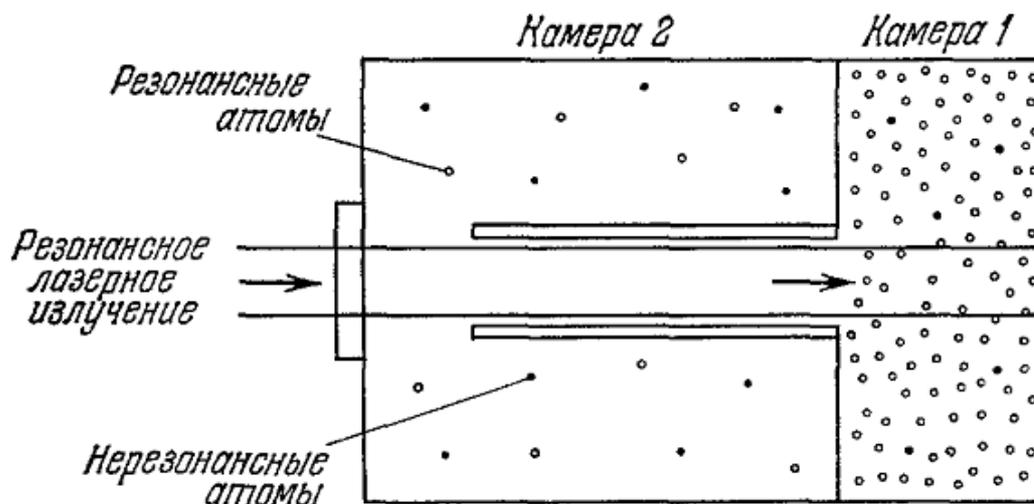


Рисунок 7 - Разделение газов при помощи резонансного светового давления лазерного излучения.

При поглощении атому сообщается как энергия, так и импульс фотона. Пусть атом, первоначально находящийся в основном состоянии, т. е. в состоянии с наименьшей энергией, поглощает фотон резонансного излучения. Атом не только переходит в возбужденное состояние, но и получает приращение скорости в направлении падающего света. Прежде чем вернуться в основное состояние, атом остается в возбужденном состоянии в течение некоторого времени, называемого временем жизни. Этот возврат происходит спонтанно с испусканием фотона той же частоты в произвольном направлении. При этом атому сообщается еще один импульс с произвольным направлением, соответствующий некоторой скорости. При последующих поглощениях и спонтанных испусканиях фотонов произвольно направленные импульсы световой отдачи взаимно гасятся, и, в конечном итоге, резонансный атом

получает импульс, направленный вдоль светового луча.

Эта оптическая сила, названная резонансным световым давлением, обладает рядом уникальных свойств. Во-первых, она не возрастает до бесконечности с увеличением оптической мощности, а насыщается при определенной максимальной величине, которая связана с конечным временем жизни возбужденного состояния. Вторым уникальным свойством этого эффекта является требование точного резонанса. Рассмотрим лазерный пучок, настроенный в резонанс с покоящимся атомом. Если атом начинает перемещаться в направлении света под действием светового давления, то в результате доплеровского смещения он больше не будет находиться в точном резонансе и сила уменьшится.

Предположим, что двухкамерный сосуд наполнен двумя различными газами и что свет находится в резонансе только с одним из газов. Постоянная сила при насыщении, действующая на резонансные атомы, вызывает экспоненциальное распределение давления вдоль трубки, соединяющей камеры, наибольшее значение которого находится в дальней камере, и падающей до наименьшего значения в ближней камере, когда система приходит в равновесие с силой светового давления. На второй газ свет не действует.

В этой же работе автор предполагает возможность разделения изотопов на основе сил радиационного давления за счет изотопического сдвига резонансной частоты. Очевидно, что данное направление представляет широкий практический и научный интерес. Поэтому последующая наша работа в области развития методов и способов применения оптического манипулирования будет проводиться именно в этом направлении.

Так на сегодняшний день уже существует лазерный способ разделения изотопов. Однако он основан на том, что различные изотопы поглощают свет с различной длиной волны. И при помощи точно настроенного лазера можно избирательно ионизировать атомы какого-то определённого изотопа. Получившиеся ионы можно легко отделить, допустим, магнитным полем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был проведен библиографический анализ работ, посвященных функционированию «оптических ловушек». А именно представлены основные принципы работы данного инструмента, показаны различные подходы при математическом описании физических процессов при взаимодействии когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона. Объектом манипуляции могут являться частицы различной природы (диэлектрические сферы, молекулы, атомы, бактерии, вирусы, детали микромеханизмов и т.д.) И при взаимодействии лазерного излучения с частицами, имеющими размер много больше длины волны, целесообразно описывать возникающие физические процессы в рамках лучевой оптики. А при размерах порядка и меньше длины волны использовать Релеевскую или обобщенную теорию Лоренца-Ми оптического захвата. Также были описаны и проанализированы основные типы оптических пинцетов, применяемых на практике в настоящее время. К ним относятся: однопучковая 2-D, левитационная, двухпучковая 3-D, интерференционная ловушки, а также их комплексы.

На основе указанного выше анализа определены основные области применения (манипулирование биообъектами, физика коллоидов, микромеханика) и приоритетные направления в использовании данного инструмента (полые пучки, «оптические бутылки», оптическое вращение, пучки Бесселя, матрицы ловушек, динамическое управление). Изложена суть экспериментов, в которых применяются оптические ловушки, а также различные недостатки и достоинства применяемых инструментов.

В ходе проведенного исследования удалось выявить тенденцию к развитию оптического пинцета как инструмента в рамках дифракционной оптики. Так большинство исследований сегодня направлены на расчет ДОЭ и формирование с их помощью пучков, имеющих заданное распределение интенсивности. Данное направления имеет преимущество по сравнению

методами непосредственного манипулирования гауссовыми пучками по отдельности, поскольку требует меньше затрат на дополнительное оборудование и позволяет добиваться более высокой точности.

Помимо отраслей, в которых оптическая ловушка уже широко используется, было выявлено направление, где данный инструмент пока не применяется, а именно: разделение изотопов различных химических элементов. В одной из своих работ А. Ашкин говорит о такой возможности, однако непосредственно опытов проведено не было. Выполнение этой задачи с помощью только когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона позволит реализовать инструмент, который ранее не был использован, и имеющий определенные преимущества перед своими аналогами, выполняющими те же функции. Поэтому в перспективе планируется более детальное изучение данного вопроса и, возможно, техническая реализация идеи автора по изотопному разделению атомов на основе резонансного давления лазерного излучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Оптический пинцет [Электронный ресурс] // Википедия - свободная энциклопедия. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Оптический_пинцет/ [22 января 2013].
- 2 Ashkin A. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers / A. Ashkin. – Singapore: World Scientific, 2006. – P. 439.
- 3 The Nobel Prize in Physics 1997 [Electronic resource] // Nobelprize.org. – The Official Web Site of the Nobel Prize. (Engl.). – URL: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1997/ [22 January 2013].
- 4 Сойфер В. А. Оптическое манипулирование микрообъектами: достижения и новые возможности, порожденные дифракционной оптикой / В. А. Сойфер, В. В. Котляр, С. Н. Хонина // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2004. – Т.35. – вып.6. – С. 1370–1372.
- 5 Применение лазерного пинцета для изучения механических свойств эритроцитов / А. В. Коробцов, С. П. Котова, Н. Н. Лосевский и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т.11. – №3. – С. 76–80.
- 6 Ахманов С. А. Оптическая левитация / С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин // Физическая оптика. – 2004. – С. 89 – 103.
- 7 Harada Y. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime / Y. Harada, T. Asakura // Optics Communications. – 1996. – Vol. 124. – P. 529–541.
- 8 Malagnino N. Measurements of trapping efficiency and stiffness in optical tweezers / N. Malagnino // Optics Communications. – 2002. – Vol.214. – P. 15–24.
- 9 Эшкин А. Давление лазерного излучения / А. Эшкин // УФН. – 1973. – Т.110. – Вып.1. – С. 101–116.
- 10 Atom optics with microfabricated optical elements / G. Birkl, F. V. J. Buchkremer, R. Dumke et al. // Optics Communications. – 2001. – Vol. 191. – P. 67–81.

- 11 Wiseman H. M. An atom laser based on dark-state cooling / H. M. Wiseman, M. J. Collett // *Physics Letters*. – 1995. – Vol. 202. – №4. – P. 246–252.
- 12 Ghislain L. P. Scanning-force microscope based on an optical trap / L. P. Ghislain, W. W. Webb // *Optics Letters*. – 1993. – Vol. 18. – P. 1678–1680.
- 13 Optical trapping of Rayleigh particles using a Gaussian standing wave / P. Zemanek, A. Jonas, L. Sramek et al. // *Optics Communications*. – 1998. – Vol. 151. – P. 273–285.
- 14 Freearde T. G. M. Confinement and manipulation of atoms using short laser pulses / T. G. M. Freearde, J. Walz, T. W. Hansch // *Optics Communications*. – 1995. – Vol. 117. – P. 262-267.
- 15 Optical tweezers for the micromanipulation of plant cytoplasm and organelles / C. Hawes, A. Osterrieder, I. A. Sparkes et al. // *Current Opinion in Plant Biology*. – 2010. – Vol.13. – I. 6. – P. 731–735.
- 16 Dynamic trapping and manipulation of biological cells with optical tweezers / X. Li, C. C. Cheaha, S. Hub, et al. // *Automatica*. – 2013. – Vol.49. – I. 4. – P. 1058–1067.
- 17 Ashok P. Optical trapping for analytical biotechnology / P. Ashok, K. Dholakia // *Current Opinion in Biotechnology*. – 2012. – Vol. 23. – I. 1. – P. 16–21.
- 18 An atom/molecule/DNA probing and transportation using dynamic optical tweezers via a wavelength router / C.Vongchumyen, M. Tasakorn, S. Mitatha et al. // *Optik*. – 2011. – Vol. 122. – I. 6. – P. 520–523.
- 19 Optical trapping studies of colloidal interactions in liquid films / R. D. Leonardo, F. Ianni, F. Saglimbeni et al. // *Colloids and Surfaces*. – 2009. – Vol. 343. – P. 133–136.
- 20 Порфирьев А. П. Оптический захват микрочастиц в специальных ловушках / А. П. Порфирьев, Р. В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36. – №2. – С. 211-218.
- 21 Качалов Д. Г. Экспериментальная реализация оптического захвата микрочастиц на основе применения бинарного радиального ДОО / Д. Г. Качалов, В. С. Павельев, С. Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36. – №1. – С. 91–95.

- 22 Скиданов Р. В. Оптическая микроманипуляция с использованием бинарных фокусаров / Р. В. Скиданов, А. П. Порфирьев // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34. – №2. – С. 214–218.
- 23 Wright E. M. Toroidal optical dipole traps for atomic Bose-Einstein condensates using Laguerre-Gaussian beams / E. M. Wright, J. Arlt, K. Dholakia // Physical Review. – 2000. – Vol. 63. – P. 136–148.
- 24 Ito H. Optical potential for atom guidance in a cylindrical-core hollow fiber / H. Ito, K. Sakaki, T. Nakata // Optics Communications. – 1995. – Vol. 115. – P. 57–64.
- 25 Порфирьев А. П. Формирование массива световых «бутылок», основанное на использовании суперпозиции пучков Бесселя / А. П. Порфирьев, Р. В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36. – №1. – С. 80–90.
- 26 An optical apparatus for rotation and trapping. / B. Gutierrez-Medina, J. O. L. Andreasson, W. J. Greenleaf et al. // Methods in Enzymology. – 2010. – Vol. 475. – P. 377–404.
- 27 Борисов М. А. NASA превратит в реальность тяговые лучи / М. А. Борисов // Наука в фокусе. – 2012. – №3. – С.44.