

## ПРИНЦИП РАБОТЫ ОПТИЧЕСКОГО ПИНЦЕТА

Артюшкевич Г.Д., Бердова Э.А.<sup>1</sup>, группа 443201

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>,  
г. Минск, Республика Беларусь

Горячун Н.В. – старший преподаватель кафедры физики

**Аннотация.** Оптический пинцет — оптический прибор для манипулирования микро- и наноразмерными объектами (микрочастицами, биологическими клетками, макромолекулами и др.) путём воздействия на них лазерным излучением. В основе принципа работы оптического пинцета лежит передача импульса и момента импульса от световой волны к среде. Для создания необходимой интенсивности света используют сфокусированные лазерные пучки.

**Ключевые слова:** оптический пинцет, лазер, частица, световой пучок, нанотехнологии.

**Введение.** Механическое устройство для управления микроскопическими объектами создать невозможно, так как приходится иметь дело с частицами микронных размеров или хромосомами в живой клетке, к которым нельзя прикасаться, иначе они разрушатся. Использовать обычный, даже сверхминиатюрный пинцет в таком случае невозможно. А захватить и переместить микрообъект – насущная задача современной микро- и нанотехнологии. Но достаточные для этого усилия способны создавать лазерные лучи

Принцип действия оптического пинцета основан на том, что световой поток обладает импульсом и при изменении его направления возникает сила, связанная с этим изменением (рисунок 1):

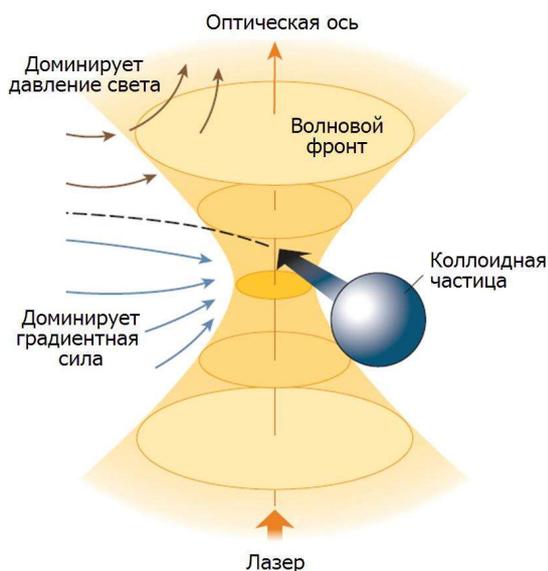


Рисунок 1 – Схема оптического пинцета

**Основная часть.** Силы, приводящие микроскопические частицы в движение, зависят от различных параметров – светового пучка, частицы и её окружения. Эти силы делят на: градиентные и рассеивающие. Градиентные силы возникают за счёт неоднородности распределения интенсивности светового пучка в поперечном сечении. Именно благодаря этим силам осуществляется захват частиц в световом пучке. Силы второго типа обусловлены отражением и рассеиванием света, они приводят к движению частицы вдоль направления распространения светового пучка вследствие давления света.

При описании действия светового пучка на частицу с характерным размером, во много раз превышающим длину волны света, используют приближение геометрической оптики. В этом приближении световой пучок рассматривается как бесконечный набор лучей, каждый из которых преломляется на границе прозрачного объекта.

Фотон характеризуется энергией  $E$  и импульсом  $p$ , который равен:  $p = mc$  ( $m$  – масса движущегося фотона,  $c$  – скорость света). Если фотон падает на непрозрачную (поглощающую или отражающую) поверхность, то сообщаемый ей импульс есть давление света на эту поверхность. Но если осветить лазером прозрачную частицу, то световой пучок испытает на ней преломление - направление вектора скорости света и, следовательно, направление импульса фотонов изменится. Пользуясь механической

аналогией, можно сказать, что при этом возникает изменение силы, которое подействует на частицу так, что она двинется в сторону наибольшей интенсивности лазерного пучка.

Интенсивность лазерного пучка максимальна на его оси и плавно спадает к краям. Закон изменения интенсивности соответствует гауссовскому распределению. Поэтому частица удерживается на оси пучка, а при фокусировке пучка линзой она "втягивается" в точку фокуса и оказывается "пойманной" в трех измерениях. Чтобы создать силы, способные осуществить такую "трехмерную ловушку", требуется излучение мощностью порядка нескольких милливатт.

Перемещением фокуса можно передвигать частицы, выстраивая из них самые разнообразные конструкции. Луч лазера при движении воздействует на пространство и материализует требуемый объект.

Объединяя метод оптического пинцета с использованием других лазерных пучков, исследователи могут, например, захватить отдельную хромосому и разрезать на кусочки для дальнейшего анализа. Для захвата можно применить инфракрасное излучение с длиной волны  $\lambda=1,064$  мкм и его гармонику - зеленый свет ( $\lambda=0,532$  мкм) - для разрезания: биологические объекты почти прозрачны в инфракрасной области, но сильно поглощают зеленый свет.

Оптический пинцет представляет собой удобный инструмент, имеющий ряд недостатков.

Во-первых, чем сильнее стянут пучок в фокус, тем быстрее он расходится после него. Это означает, что сила, удерживающая частицу, очень быстро падает по мере удаления от зоны захвата, и уже на расстоянии несколько десятков микрон от фокуса оказывается недостаточной, чтобы снова захватить частицу. Однопучковая ловушка полезна лишь для захвата одиночной частицы и только в области фокуса.

Во-вторых, лазерный пучок после встречи с объектом будет отличаться от исходного из-за дифракции, преломления, отражения и поглощения. Это также ограничивает расстояние, на котором он может действовать как оптический пинцет.

Существует и еще одно обстоятельство, связанное с расходимостью самого лазерного пучка. Чем сильнее он расходится, тем хуже его фокусирует оптическая система, но получить идеально параллельный пучок принципиально невозможно из-за дифракции. И долгое время не было даже мысли о том, что можно как-то обойти это ограничение. Но существует класс световых пучков, фактически свободных от дифракции. Их проекция на экран выглядит как яркое пятно, окруженное системой концентрических колец (такое распределение интенсивности описывает функция Бесселя, и поэтому сами пучки называют бесселевыми).

Обычный гауссов пучок превращают в бесселев при помощи так называемого аксикона - конической линзы, которая фокусирует параллельный пучок лучей не в точку, а в отрезок прямой линии на оптической оси. Этот центральный луч подобен нерасходящемуся "световому шнуру" постоянной интенсивности.

Бесселеву пучку присуще одно свойство: в отличие от гауссова пучка, который искажается после прохождения через частицу, он обладает способностью самостоятельно восстанавливаться. Часть волн, выходящих из конической поверхности аксикона, проходят мимо препятствия и сходятся позади него; их интерференция образует неискаженный пучок. Это позволяет преодолеть ограничение, присущее оптическому пинцету на гауссовом пучке, способному захватить лишь частицы, расположенные очень близко одна к другой. В недавних работах было показано, что оптический пинцет, использующий бесселев пучок, способен захватывать частицы, разнесенные на расстояние 3 миллиметра и лежащие в отдельных независимых ячейках. В этих экспериментах использовалось лазерное излучение с длиной волны 1,064 мкм, образующее бесселев пучок с ярким центральным пятном, окруженным 19-ю кольцами. Общая мощность излучения составляла 700 мВт, из которой на центральное пятно приходилось примерно 35 мВт. Захватывалась полая сфера диаметром около 5 микрон между центральным пятном и первым кольцом пучка. Сфера искажала пучок, который за ней восстанавливался и работал как оптический пинцет, сводящий вместе три кварцевые сферы диаметром 5 микрон. После этого пучок восстанавливался еще раз.

Другое отличие оптических пинцетов на бесселевом пучке заключается в их способности захватывать сразу несколько разных частиц. Например, в экспериментах производился одновременный захват сплошной кварцевой сферы в первой ячейке, полый сферы во второй и частицы из двупреломляющего материала в третьей. Полая сфера имеет меньший показатель преломления, чем вода, заполняющая ячейки, и поэтому выталкивается из областей высокой интенсивности света. Ее захват происходил в темных зонах бесселева пучка между кольцами.

С помощью оптических пинцетов измеряли механические свойства молекул ДНК, прицепляя к их концам полистирольные бусинки и растягивая их (рисунок 2):

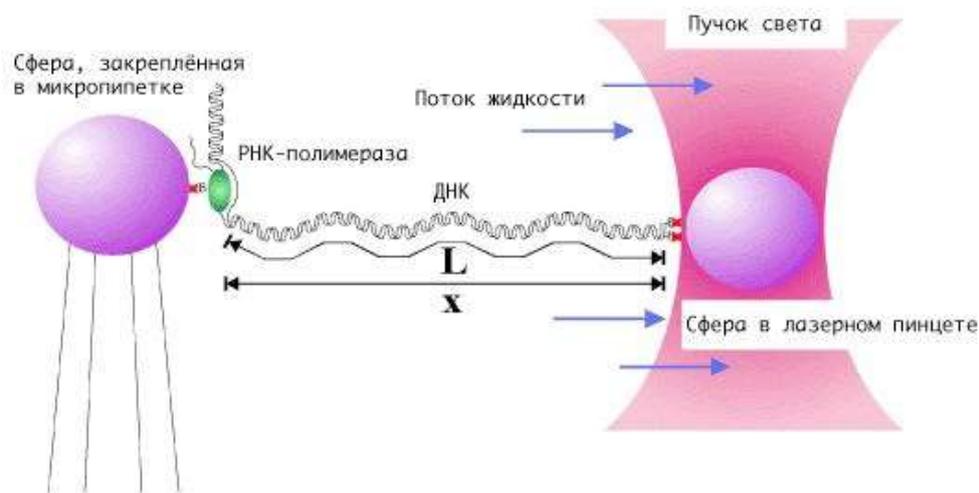


Рисунок 2 – Измерение механических свойств ДНК при помощи оптического пинцета

Исследователи из Гарвардского университета укладывали эритроциты на белковое основание в кольца, цепочки и тетраэдры, создавая модели клеточных "датчиков", настроенных на обнаружение определенных химических веществ. Оптический пинцет уже сейчас используют для пересадки генов в клетки, а также при искусственном оплодотворении в пробирке.

Весьма интересные эксперименты выполнены в венгерском Биологическом исследовательском центре. Там разработана методика получения микроскопических объектов произвольной формы в результате полимеризации клейкой массы под действием света. Оптический пинцет на основе инфракрасного ( $\lambda = 0,994$  мкм) полупроводникового лазера захватывал и удерживал в фокусе микрочастицы. Далее использовалась так называемая двухфотонная методика: клей освещали ультрафиолетовым лазером, генерирующим две слегка различающиеся длины волны вблизи 0,340 мкм, а необходимая для полимеризации интенсивность достигалась фокусировкой в нужной точке излучения аргонного лазера ( $\lambda = 0,514$  мкм). В результате воздействия света образовывался твердый полимер. Высокоточный трехкоординатный пьезоэлектрический манипулятор, управляемый компьютером, перемещал материал относительно фокуса, создавая микроскопические детали - роторы, шестеренки, пропеллеры.

Было обнаружено, что при сдвиге точки фокуса свет, отклоняясь от частицы, приводит ее во вращение. Величина и направление момента вращения зависят от ориентации ротора или шестеренки в фокусе. Если ротор оснащался центральной осью, устойчивость его захвата в пинцете повышалась, а при увеличении числа зубцов шестеренки вращение становилось более равномерным. При мощности излучения 20 мВт конструкция равномерно вращалась с частотой до нескольких оборотов в секунду. Отсюда - один шаг до создания действующих микромашин, управляемых светом. Авторы сконструировали две сцепленные шестеренки, сидящие на фиксированных осях, и свободно плавающий ротор. Ротор захватывали лазерным пинцетом, приводили во вращение и затем подводили к паре шестеренок, заставляя их крутиться.

**Заключение.** Изобретение оптического пинцета совершило подлинную революцию в микротехнике. С помощью таких приборов стало возможным измерить силу, развиваемую одиночными молекулами молекулярных моторов, таких, как миозин и кинезин, а также элементарные шаги, которые делают эти молекулы при двигательном акте. Благодаря способности манипулировать субмикроскопическими объектами вплоть до атомов и измерять пиконьютоновые силы и нанометровые перемещения, оптический пинцет рассматривается как один из важнейших инструментов для нанотехнологий.

Возможность измерять силы, действующие на частицы, с помощью оптических ловушек сделала эти инструменты по-настоящему multifunctional. Лазерные пинцеты используются для изучения компонентов клеток, например, белков и молекулярных моторов.

Список использованных источников:

1. Оптический пинцет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nkj.ru/archive/articles/2965/>. – Дата доступа: 11.06.2024.
2. Оптические пинцеты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://inscience.ru/library/article\\_post/opticheskiye-pintsety](https://inscience.ru/library/article_post/opticheskiye-pintsety). – Дата доступа: 09.09.2019.
3. Оптический пинцет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://thesaurus.rusnano.com/wiki/article1445>. – Дата доступа: 29.01.2023.
4. Как работает оптический пинцет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fiz.1sept.ru/article.php?ID=200801304>. – Дата доступа: 13.12.2024.

## OPERATING CONCEPT OF OPTICAL TWEEZERS

*Artsiushkevich H.D., Berdova E.A.<sup>1</sup>*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,<sup>1</sup>  
Minsk, Republic of Belarus*

*Goryachun N.V. – senior lecturer of the department of physics*

**Annotation.** Optical tweezers are optical devices for manipulating micro- and nano-sized objects (microparticles, biological cells, macromolecules, etc.) by exposing them to laser radiation. The operating concept of optical tweezers is based on the transfer of momentum and angular momentum from a light wave to a medium. Focused laser beams are used to create the required light intensity.

**Keywords:** Optical tweezers, laser, particle, light beam, nanotechnology.