

УДК 621.3.049.77

МЕТОДЫ МАНИПУЛЯЦИИ АТОМАМИ И НАНОРАЗМЕРНЫМИ СТРУКТУРАМИ

Бойко Е.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
филиал Минский радиотехнический колледж,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Кусенок Е.Н. – преподаватель высшей категории дисциплин общепрофессионального и специального циклов, представитель цикловой комиссии «Микро- и наноэлектронных технологий и систем».

Аннотация. Материалы исследования направлены на изучение вопроса атомной инженерии, изучающей методы манипуляции атомами и наноразмерными структурами.

Ключевые слова: атомы, наноразмерные структуры, микроскопы.

Помимо исследовательских функций микроскопы могут использоваться для атомных манипуляций. В зависимости от специфики используемых закономерностей выделяют параллельные и перпендикулярные процессы переноса атомов. В параллельных процессах атомы или молекулы заставляют двигаться вдоль поверхности. В перпендикулярных же их переносят с поверхности на острие зонда и обратно. В обоих случаях конечной целью является перестройка поверхности на атомном уровне. Такую перестройку можно рассматривать как серию последовательных действий, приводящих к селективному разрыву химических связей между атомами и к последующему образованию новых связей. С другой точки зрения – это идентично движению атома по некоторой потенциальной поверхности от начального к конечному состоянию.

Оптический пинцет – оптический инструмент, который позволяет манипулировать микроскопическими объектами с помощью лазерного света (обычно испускаемого лазерным диодом). Он позволяет прикладывать к диэлектрическим объектам силы от фемтоньютон до наноньютонов и измерять расстояния от нескольких нанометров до микронов. В последние годы оптические пинцеты начали использовать в биофизике для изучения структуры и принципа работы белков [1].

Объекты, представленные в виде маленьких диэлектрических сфер, взаимодействуют с электрическим полем, созданным световой волной, за счёт индуцированного на сфере дипольного момента. В результате взаимодействия этого диполя с электрическим полем электромагнитной волны объект перемещается вдоль градиента электрического поля. Кроме градиентной силы, на объект также действует сила, вызванная давлением (отражением) света от его поверхности. Эта сила толкает сферу по направлению пучка света. Однако, если луч света сильно сфокусирован, величина градиента интенсивности может быть больше величины давления света.

Более детальный анализ основан на двух механизмах, предложенных Ашкином, в зависимости от размера частицы. Из теории рассеяния света известно, что механизм рассеяния света частицей зависит от соотношения размеров частицы и длины световой волны. Если размер рассеивающих частиц намного меньше, чем длина волны света, то имеет место рэлеевское рассеяние. Когда свет рассеивается на частицах (пыль, дым, водные капельки), которые имеют размер больше, чем длина волны, это рассеяние Ми (по имени немецкого физика Густава Ми). Рассеяние Ми отвечает за белый и серый цвет облаков.

Придерживаясь той же идеи, Ашкин предложил, что для математического анализа оптического микроманипулирования можно использовать два разных метода, а именно: подходом физической оптики для миевских частиц (когда диаметр частицы больше длины волны света $d > \lambda$) и в приближении электрического диполя для рэлеевских частиц ($d < \lambda$).

Лазерный пинцет, основанный на альтернативных режимах работы лазера.

Со времени изобретения первого лазерного пинцета, основанного на одном гауссовом пучке (фундаментальная лазерная мода TEM₀₀) А. Ашкином в 1986 году концепция одномодовых лазерных пучков развилась за счёт использования лазерных мод высокого порядка, то есть эрмит-гауссовых пучков (TEM_{nm}), лаггер-гауссовых пучков (LG, TEM_{lp}) и бесселевых пучков (J_n).

Лаггер-гауссовы пучки обладают уникальным свойством втягивать в оптическую ловушку оптически отражающие и поглощающие частицы. Пучки с круговой поляризацией имеют спиновый орбитальный момент и могут вращать частицы. У лаггер-гауссовых пучков также есть собственный угловой момент, который может вращать частицы вокруг центра пучка. Этот эффект наблюдается без внешней механической или электрической регуляции луча.

Кроме лаггер-гауссовых пучков, бесселевы пучки как нулевого, так и высших порядков имеют орбитальный момент, а также уникальное свойство одновременно удерживать много частиц на некотором расстоянии.

Типичная установка имеет только один или два лазерных луча. Более сложные эксперименты требуют много ловушек, работающих одновременно. Этого можно достичь, используя единственный лазер, свет которого проходит через акусто-оптический модулятор или через управляемые электроникой зеркала. С помощью этих устройств лазерное излучение можно разделить во времени на несколько лучей, а с помощью дифракционных оптических элементов – разбить на несколько лучей в пространстве [2].

Лазерные пинцеты, основанные на оптических волокнах

В этом типе устройств лазерное излучение подаётся через оптическое волокно. Если один конец оптического волокна формирует поверхность, похожую по свойствам на линзу, это позволит сфокусировать свет в оптической ловушке с большой числовой апертурой.

Если же концы волокна не выпуклы, лазерный свет будет отклоняться, и потому стабильная оптическая ловушка может быть создана только с помощью двух концов волокон по обе стороны от оптической ловушки, и балансирующих градиентных сил и давлений света. Градиентные силы удерживают частицы в поперечном направлении, тогда как осевая оптическая сила возникает от давления двух встречных пучков света, которые выходят и распространяются из двух оптических волокон. Равновесное положение сферы вдоль оси z в такой ловушке – положение, где давления света равняются друг другу. Такие лазерные пинцеты были впервые созданы А. Констеблем и Дж. Гюком, которые использовали эту методику для растяжения микрочастиц. Манипулируя входной мощностью из обоих концов оптоволокон, возможно регулировать растягивающую силу. Такую систему можно использовать, чтобы измерять вязкость и эластичность клеток с чувствительностью, достаточной, чтобы различить разные цитоскелеты, например, эритроцитов человека и фибробластов мышей.

Недавние исследования достигли большого успеха в дифференциации раковых клеток от нормальных. Для данной сортировки клеток применяются оптические пинцеты, схема которого с основными элементами представлена на рисунке 1.

Одна из наиболее распространённых систем сортировки клеток использует метод флуоресцентной проточной цитометрии. В этом методе суспензия биологических клеток сортируется в несколько контейнеров согласно флуоресцентным характеристикам каждой клетки в потоке. Процесс сортировки контролируется электростатической системой отклонения, которая направляет клетку к определённому контейнеру изменением напряжения приложенного электрического поля.

В оптически управляемой системе сортировки клетки пропускают через двух- или трёхмерные оптические решётки. Без индуцируемого электрического напряжения клетки сортируются по их свойствам преломления света. Группа исследователей под руководством Кишана Долакиа разработала методику использования дифракционной оптики и других оптических элементов для создания таких оптических решёток. С другой стороны, группа учёных из университета города Торонто построила автоматическую сортировальную систему, используя пространственный модулятор света.

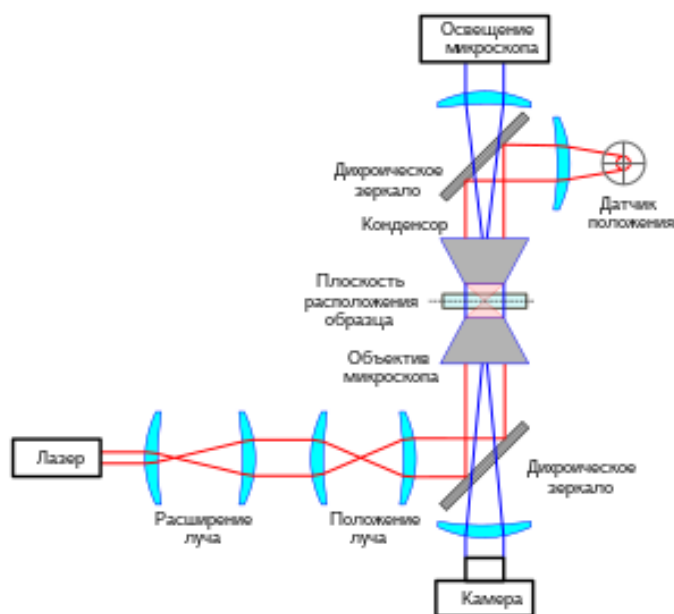


Рисунок 1 – Схема оптического пинцета с основными элементами

Главный механизм сортировки – расположение узлов оптической решётки. Когда поток клеток проходит через оптические решётки, силы трения частиц непосредственно конкурируют с оптической градиентной силой от соседнего узла оптической решётки. Изменяя расположение узлов, возможно создать оптическую дорожку, по которой будут двигаться клетки. Но такая дорожка будет эффективной только для клеток с определённым коэффициентом преломления, которые и будут эффективно отклоняться. Регулируя скорость потока клеток и мощность света, возможно получить хорошую оптическую сортировку клеток.

Соревнование сил в системе сортировки нуждается в точной юстировке, чтобы достичь высокой эффективности оптической сортировки. В настоящий момент в Сент-Эндрюсском университете создана большая исследовательская группа для работы над этой проблемой. В случае успеха эта технология сможет заменить традиционную флуоресцентную сортировку клеток.

В оптической микроскопии нанометровых объектов, оптическая микроманипуляция с использованием лазерных пинцетов, основанных на затухающих полях становится ещё одним его приложением. Затухающее поле – электромагнитное поле, которое проникает вглубь вещества, например при полном внутреннем отражении. Электрическое поле в световой волне затухает по экспоненте.

В лазерных пинцетах непрерывное затухающее поле может быть создано, когда свет распространяется через оптический волновод (многократное полное внутреннее отражение). Результирующее затухающее поле имеет направленный импульс и может двигать микрочастицы вдоль направления своего распространения. Этот эффект был открыт учёными С. Каватой и Т. Сугиурой в 1992 году. Они показали, что поле может связывать частицы, находящиеся на расстоянии около 100 нм. Это прямое связывание поля рассматривается как туннелирование фотонов через промежуток между призмой и микрочастицами. В результате возникает направленная оптическая сила.

Недавняя версия лазерных пинцетов основанных на затухающем поле использует большую поверхность с оптической решёткой, что позволяет одновременно связывать много частиц и направлять их в желаемом направлении без использования волновода. Эта методика названа «безлинзовая оптическая ловушка». Точно направленному движению частиц помогает решётка Рончи или создание чётких оптических потенциальных ям в стеклянной пластинке. В настоящий момент учёные также работают над фокусировкой затухающих полей.

Недавно начались работы по измерению оптических сил в голографических лазерных пинцетах, чтобы достичь высокой точности позиционирования ловушек для отдельных ато-

мов. В настоящее время сила притягивания может быть измерена как на одно-, так и на двухпучковых лазерных пинцетах (фотонный силовой микроскоп).

Основной принцип измерения оптической силы лазерных пинцетов – передача импульса света, связанная с преломлением света на частицах. Изменение направления распространения света как в поперечном, так и в продольном направлении обеспечивает силу, которая действует на объект. Поэтому наименьшая поперечная сила может быть измерена по отклонению пучка, который прошёл сквозь частицу. Такое отклонение может быть легко измерено с помощью детектора осевого положения, самый простой из которых – квадрантный фотодиод: пластинка, разделённая на четыре сектора, с пучком света, сфокусированным в её центре. При частице в центре на сектора падает свет равной мощности, но если на частицу действует сила, мощности уже не будут равны, и их разница пропорциональна этой силе.

Такой принцип может применяться с любыми лазерными пинцетами. Наибольшей проблемой при таких измерениях будет броуновское движение (шум). Тем не менее силы порядка пиконьютона и сдвиг порядка нанометров обычно можно измерить.

Изучение и реализация размерных методов манипуляции атомами и наноразмерными структурами представляют сегодня особый интерес в развитии нанотехнологий в области «Атомной инженерии».

Список литературы

1. <https://thesaurus.rusnano.com/wiki/article1445>
2. <https://www.dissercat.com/content/manipulirovanie-nanoobektami-i-modifikatsiya-materialov-s-pomoshchyu-sfokusirovannogo-elektr/>