

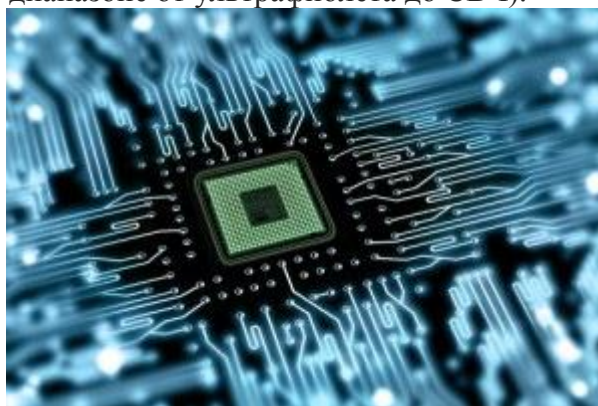
УДК 621.31

## КУЛОНОВСКОЕ УВЛЕЧЕНИЕ – ЭЛЕКТРОНИКА БУДУЩЕГО

Миронович Н.С.

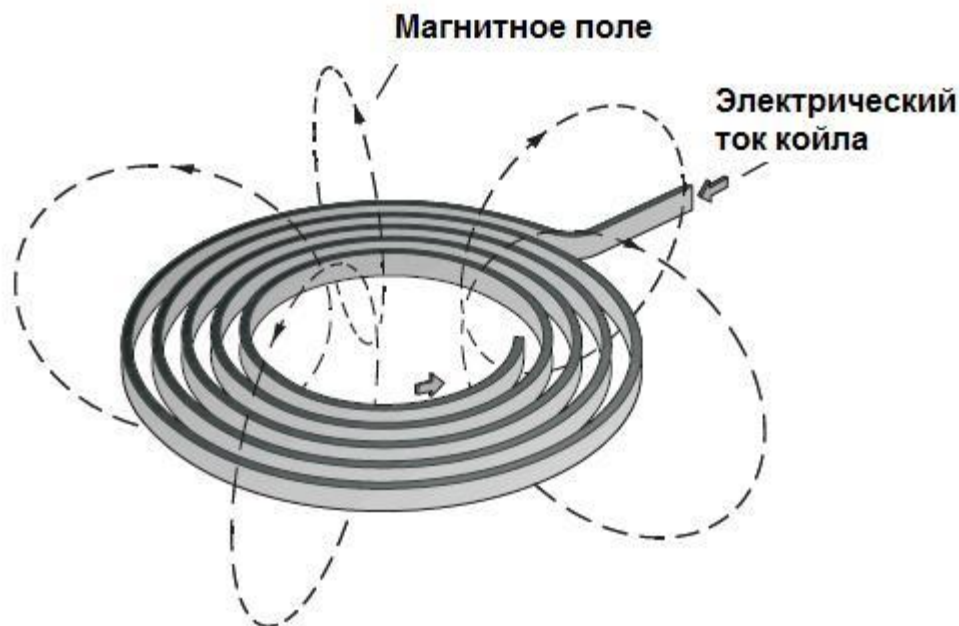
Научный руководитель – к.т.н., доцент Ежов В.Д.

Беспроводная передача электричества — способ передачи электрической энергии без использования токопроводящих элементов в электрической цепи. К 2011 году имели место успешные опыты с передачей энергии мощностью порядка десятков киловатт в микроволновом диапазоне с КПД около 40 % — в 1975 в Goldstone, Калифорния и в 1997 в GrandBassin на острове Реюньон (дальность порядка километра, исследования в области энергоснабжения посёлка без прокладки кабельной электросети). Технологические принципы такой передачи включают в себя индукционный (на малых расстояниях и относительно малых мощностях), резонансный (используется в бесконтактных смарт-картах и чипах RFID) и направленный электромагнитный для относительно больших расстояний и мощностей (в диапазоне от ультрафиолета до СВЧ).



Ультразвуковой способ. Изобретение студентов университета Пенсильвании. Впервые широкой публике установка была представлена на выставке The All Things Digital (D9) в 2011 году. Как и в других способах беспроводной передачи чего-либо, используется приёмник и передатчик. Передатчик излучает ультразвук, приёмник, в свою очередь, преобразует слышимое в электричество. На момент презентации расстояние передачи достигает 7-10 метров, необходима прямая видимость приёмника и передатчика. Из известных характеристик — передаваемое напряжение достигает 8 вольт, однако не сообщается получаемая сила тока. Используемые ультразвуковые частоты никак не действуют на человека. Также нет сведений и об отрицательном воздействии на животных.

Метод электромагнитной индукции. Техника беспроводной передачи методом электромагнитной индукции использует ближнее электромагнитное поле на расстояниях около одной шестой длины волны. Энергия ближнего поля сама по себе не является излучающей, однако некоторые радиационные потери всё же происходят. Кроме того, как правило, имеют место и резистивные потери. Благодаря электродинамической индукции, переменный электрический ток, протекающий через первичную обмотку, создает переменное магнитное поле, которое действует на вторичную обмотку, индуцируя в ней электрический ток. Для достижения высокой эффективности взаимодействие должно быть достаточно тесным. По мере удаления вторичной обмотки от первичной, всё большая часть магнитного поля не достигает вторичной обмотки. Даже на относительно небольших расстояниях индуктивная связь становится крайне неэффективной, расходуя большую часть передаваемой энергии впустую.



Электрический трансформатор является простейшим устройством для беспроводной передачи энергии. Первичная и вторичная обмотки трансформатора прямо не связаны. Передача энергии осуществляется посредством процесса, известного как взаимная индукция. Основной функцией трансформатора является увеличение или уменьшение первичного напряжения. Бесконтактные зарядные устройства мобильных телефонов и электрических зубных щеток являются примерами использования принципа электродинамической индукции. Индукционные плиты также используют этот метод. Основным недостатком метода беспроводной передачи является крайне небольшое расстояние его действия. Приёмник должен находиться в непосредственной близости к передатчику для того, чтобы эффективно с ним взаимодействовать.

Использование резонанса несколько увеличивает дальность передачи. При резонансной индукции передатчик и приёмник настроены на одну частоту. Производительность может быть улучшена ещё больше путём изменения формы волны управляющего тока от синусоидальных до несинусоидальных переходных формы волны. Импульсная передача энергии происходит в течение нескольких циклов. Таким образом, значительная мощность может быть передана между двумя взаимно настроенными LC-цепями с относительно невысоким коэффициентом связи. Передающая и приёмная катушки, как правило, представляют собой однослойные соленоиды или плоскую спираль с набором конденсаторов, которые позволяют настроить принимающий элемент на частоту передатчика.

Обычным применением резонансной электродинамической индукции является зарядка аккумуляторных батарей портативных устройств, таких, как портативные компьютеры и сотовые телефоны, медицинские имплантаты и электромобили. Техника локализованной зарядки использует выбор соответствующей передающей катушки в структуре массива многослойных обмоток. Резонанс используется как в панели беспроводной зарядки (передающем контуре), так и в модуле приёмника (встроенного в нагрузку) для обеспечения максимальной эффективности передачи энергии. Такая техника передачи подходит универсальным беспроводным зарядным панелям для подзарядки портативной электроники, такой, например, как мобильные телефоны. Техника принята в качестве части стандарта беспроводной зарядки Qi.

Резонансная электродинамическая индукция также используется для питания устройств, не имеющих аккумуляторных батарей, таких, как RFID-метки и бесконтактные смарт-карты, а также для передачи электрической энергии от первичного индуктора винтовому резонатору трансформатора Теслы, также являющемуся беспроводным передатчиком электрической энергии.

**Электростатическая индукция.** Электростатическая или ёмкостная связь представляет собой прохождение электроэнергии через диэлектрик. На практике это градиент электрического поля или дифференциальная ёмкость между двумя или более изолированными клеммами, пластинами, электродами, или узлами, возвышающимися над проводящей поверхностью. Электрическое поле создается за счет заряда пластин переменным током высокой частоты и высокого потенциала. Ёмкость между двумя электродами и питаемым устройством образует разницу потенциалов.

Электрическая энергия, передаваемая с помощью электростатической индукции, может быть использована в приёмном устройстве, например, таком, как беспроводные лампы. Тесла продемонстрировал беспроводное питание ламп освещения энергией, передаваемой переменным электрическим полем.

«Вместо того чтобы полагаться на электродинамическую индукцию для питания лампы на расстоянии, идеальным способом освещения зала или комнаты будет создание таких условий, при которых осветительный прибор можно было бы переносить и размещать в любом месте, и он работал, независимо от того, где он находится, и без проводного подключения. Я сумел продемонстрировать это, создав в помещении мощное переменное электрическое поле высокой частоты. Для этой цели я прикрепил изолированную металлическую пластину к потолку и подключил её к одной клемме индукционной катушки, другая клемма была заземлена. В другом случае я подключал две пластины, каждую к разным концам индукционной катушки, тщательно подобрав их размеры. Газоразрядная лампа может перемещаться в любое место помещения между металлическими пластинами или даже на некоторое расстояние за ними, излучая при этом свет без перерыва».

Принцип электростатической индукции применим к методу беспроводной передачи. «В случаях, когда требуется передача небольшого количества энергии, необходимость в расположении электродов на возвышении снижается, особенно в случае токов высокой частоты, когда достаточное количество энергии может быть получено терминалом путём электростатической индукции из верхних слоев воздуха, создаваемой передающим терминалом».

**Микроволновое излучение.** Радиоволновую передачу энергии можно сделать более направленной, значительно увеличив расстояние эффективной передачи энергии путём уменьшения длины волны электромагнитного излучения, как правило, до микроволнового диапазона. Для обратного преобразования микроволновой энергии в электричество может быть использована ректенна, эффективность преобразования энергии, которой превышает 95 %. Данный способ был предложен для передачи энергии с орбитальных солнечных электростанций на Землю и питания космических кораблей, покидающих земную орбиту.

Сложностью в создании энергетического микроволнового луча является то, что для использования его в космических программах из-за дифракции, ограничивающей направленность антенны, необходима диафрагма большого размера. Например, согласно исследованию НАСА 1978 года, для микроволнового луча частотой 2,45 ГГц понадобится передающая антенна диаметром в 1 км, а приёмной ректоны диаметром в 10 км. Эти размеры могут быть снижены путём использования более коротких длин волн, однако короткие волны могут поглощаться атмосферой, а также блокироваться дождем или каплями воды. Из-за «проклятия узкого пучка» невозможно сузить луч, объединяя пучки от нескольких меньших спутников без пропорциональной потери в мощности. Для применения на земле антенна диаметром 10 км позволит достичь значительного уровня мощности при сохранении низкой плотности пучка, что важно по соображениям безопасности для человека и окружающей среды. Безопасный для человека уровень плотности мощности составляет 1 мВт/кв. см, что на площади круга диаметром 10 км соответствует мощности в 750 МВт. Этот уровень соответствует мощности современных электростанций.

Японский исследователь Хидэцугу Яги исследовал беспроводную передачу энергии с помощью созданной им направленной антенной решетки. В феврале 1926 года им была опубликована работа об устройстве, известном сейчас как антенна Яги. Хотя она оказалась

неэффективной для передачи энергии, сегодня её широко используют в радиовещании и беспроводных телекоммуникациях из-за её превосходных рабочих характеристик.

В 1945 году советский учёный Семён Тетельбаум публикует статью, в которой впервые рассматривает эффективность микроволновой линии для беспроводной передачи электроэнергии. После Второй мировой войны, когда началось развитие мощных СВЧ-излучателей, известных под названием магнетрон, идея использования микроволн для передачи энергии была развита.

В 1964 году был продемонстрирован миниатюрный вертолет, к которому энергия передавалась с помощью СВЧ-излучения.

Беспроводная передача энергии высокой мощности с использованием микроволн подтверждена экспериментально. Опыты по передаче десятков киловатт электроэнергии проводились в Голдстоуне, штат Калифорния, в 1975 году и в 1997 году в Гранд Бассине на острове Реюнион. В ходе экспериментов достигнута передача энергии на расстояние порядка одного километра.

Экспериментами по беспроводной передаче энергии с помощью СВЧ-излучения занимался также академик П. Л. Капица.

**Электропроводность.** Однопроводная электрическая система SWER (Single Wire with Earth Return) основывается на токе земли и одном изолированном проводе. В аварийных случаях высоковольтные линии постоянного тока могут работать в режиме SWER. Замена изолированного провода на атмосферную обратную связь для передачи мощного высокочастотного переменного тока стала одним из методов беспроводной передачи электроэнергии. Кроме того, исследовалась возможность беспроводной передачи электроэнергии только через землю.

Низкочастотный переменный ток может быть передан с низкими потерями по земле, поскольку общее сопротивление земли значительно меньше, чем 1 О. Электрическая индукция возникает преимущественно из-за электропроводности океанов, металлических рудных тел и подобных подземных структур. Электрическая индукция также вызывается электростатической индукцией диэлектрических областей, таких, как залежи кварцевого песка и прочих непроводящих минералов.

Переменный ток может передаваться через слои атмосферы, имеющие атмосферное давление менее 135 мм рт. ст. Ток протекает посредством электростатической индукции через нижние слои атмосферы примерно в 2-3 милях над уровнем моря и благодаря потоку ионов, то есть электрической проводимости через ионизированную область, расположенную на высоте выше 5 км. Интенсивные вертикальные пучки ультрафиолетового излучения могут быть использованы для ионизации атмосферных газов непосредственно над двумя возвышенными терминалами, приводя к образованию плазменных высоковольтных линий электропередач, ведущих прямо к проводящим слоям атмосферы. В результате между двумя возвышенными терминалами образуется поток электрического тока, проходящий до тропосферы, через неё и обратно на другой терминал. Электропроводность через слои атмосферы становится возможной благодаря ёмкостному плазменному разряду в ионизированной атмосфере.



Никола Тесла обнаружил, что электроэнергия может передаваться и через землю, и через атмосферу. В ходе своих исследований он добился возгорания лампы на умеренных

расстояниях и зафиксировал передачу электроэнергии на больших дистанциях. Башня Ворденклиф задумывалась как коммерческий проект по трансатлантической беспроводной телефонии и стала реальной демонстрацией возможности беспроводной передачи электроэнергии в глобальном масштабе. Установка не была завершена из-за недостаточного финансирования.

Земля является естественным проводником и образует один проводящий контур. Обратный контур реализуется через верхние слои тропосферы и нижние слои стратосферы на высоте около 4.5 миль (7.2 км).

Глобальная система передачи электроэнергии без проводов, так называемая «Всемирная беспроводная система», основанная на высокой электропроводности плазмы и высокой электропроводности земли, была предложена Николой Тесла в начале 1904 года и вполне могла стать причиной Тунгусского метеорита, возникшего в результате «короткого замыкания» между заряженной атмосферой и землей.

Изучение графена поможет освоить бесконтактную передачу

Высокая электропроводность и оптическая прозрачность графена определили его репутацию преемника кремния в интегральных микросхемах. Но хотя разговоры о том, что графен - материал для нанoeлектроники будущего, идут уже давно, ученым еще многое неизвестно об этой удивительной модификации углерода и о том, как она будет вести себя в микроскопических устройствах.

Тем временем развитие современной технологии производства компьютерных процессоров, вероятно, приближается к своему пределу. Согласно эмпирическому закону Мура, количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается примерно каждые два года. Новейшая технология использует полупроводниковые элементы размером в одну 100-тысячную часть миллиметра.

"До недавнего времени почти все технологии в электронике были основаны на так называемой одноэлектронной физике, то есть на физических явлениях, которые можно моделировать системой независимых электронов, - рассказывает физик-теоретик из Национального исследовательского ядерного университета МИФИ Борис Нарожный. - Этот подход перестает работать, когда размер системы становится слишком маленьким. Тогда электроны начинают "толкаться в тесноте", то есть взаимодействовать. Наш интерес заключается в том, чтобы разобраться, как устроены материалы, в частности графен, и как они себя ведут в качестве составных частей разнообразных устройств, как правило, с размерами, измеряющимися в нанометрах, то есть в условиях той самой "тесноты" электронов".

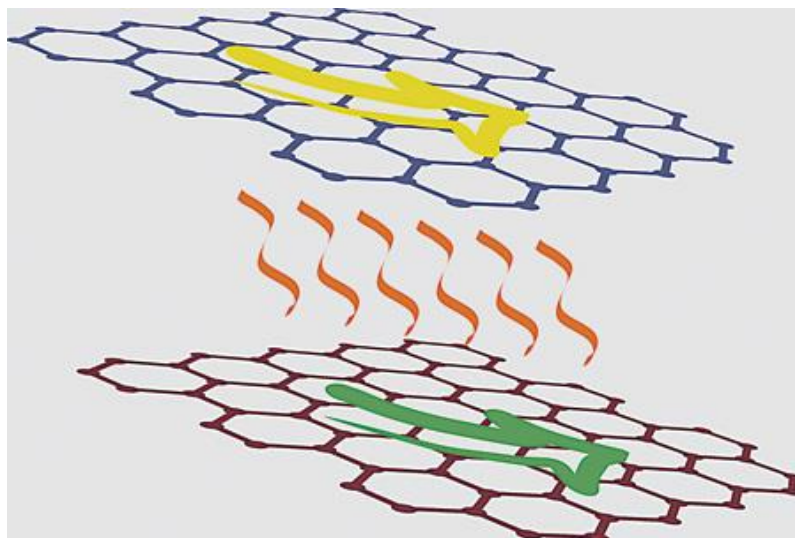


Рисунок 1 Если через один из слоев пропустить электрический ток, то есть привести носители заряда в движение, то заряды во втором слое автоматически начнут двигаться, следуя своим «партнерам».

Разобраться в микроскопической структуре материалов и их поведении в наноустройствах исследователям помогает эффект Кулоновского увлечения. Он был впервые предсказан советским ученым М.Б. Погребинским еще в 1977 году. Сегодня этот физический эффект используют ученые многих ведущих лабораторий мира.

Представьте себе образец, построенный из двух близко расположенных, но электроизолированных друг от друга проводников. Пропуская электрический ток через один из них, ученые измеряют электрический отклик - ток или напряжение, - возникающий во втором проводнике. Казалось бы, электроизоляция должна исключить этот электрический отклик. Но электромагнитные поля, возбужденные движущимися зарядами в одном проводнике, действуют на заряды внутри другого проводника, как бы увлекая их за собой, провоцируя начать двигаться или изменить свое движение. Этот эффект и называется Кулоновским увлечением.

Уникальные свойства графена позволили ученым предположить, что и Кулоновское увлечение в этом странном материале будет каким-то особенным. И, действительно, оказалось, что в графене по сравнению с другими полупроводниковыми системами проще добиться идеального Кулоновского увлечения. Для этого не нужны экстремально низкие температуры и, наоборот, очень высокие магнитные поля. Возникает идеальное увлечение из-за конденсации экситонов, имеющейся в образце (экситон - это связанная пара электрона и дырки, иначе говоря, двух свободных носителей заряда противоположного знака: электрон заряжен отрицательно, дырка - положительно).

В двухслойных системах один из двух носителей принадлежит одному слою, а другой - другому. Если через один из слоев пропустить электрический ток, то есть привести носители заряда в движение, то заряды во втором слое автоматически начнут двигаться, следуя своим "партнерам". Причем движение зарядов в одном слое не просто слегка изменит поведение зарядов во втором, они как бы начнут танцевать парный танец, полностью синхронизировавшись.

Впервые идеальное Кулоновское увлечение в системе, составленной из двух листов графена, наблюдала группа ученых из Гарварда. Борис Нарожный работает в этом же направлении, только не экспериментально, а теоретически.

Если еще раз вернуться к идеальному увлечению, описанному выше, можно заметить, что оно чем-то напоминает так называемую квантовую запутанность, которую ученые используют для квантовой телепортации. Возможно, это не случайно. По словам исследователя из НИЯУ МИФИ, явление Кулоновского увлечения чрезвычайно важно, как в качестве экспериментального инструмента для исследования взаимодействующих электронных систем в твердых телах, так и для потенциальных приложений, основанных на бесконтактной передаче энергии.

В макромире для бесконтактной передачи энергии сегодня используются радиоволны. Именно они осуществляют передачу информации в тот момент, когда вы подносите к считывающему устройству бесконтактный ключ или кредитную карту. Нарожный считает, что в микромире и, в частности, в электронике ближайшего будущего бесконтактная передача энергии (заряда, информации и т.д.) может осуществляться за счет физического механизма, ответственного за Кулоновское увлечение. И, возможно, именно изучение графена и его необычных свойств позволит такой электронике появиться быстрее.