

Еще раз о туннельном эффекте через диэлектрическую пленку

Ивченков Геннадий,

kashey@kwic.com

Проведен ряд экспериментов по изучению туннельного эффекта через пленку диэлектрика. Показано, что он работает также для достаточно толстых диэлектрических пленок. Кроме того, было зарегистрировано влияние дополнительных токов на туннельный эффект. Данная статья знакомит с предварительными результатами экспериментов.

Практически все случаи туннельного эффекта связаны с преодолением потенциального барьера. Этот барьер очевиден в случае ядерных и химических реакций, в которых элементарные частицы и даже целые молекулы (криогенная химия) преодолевают кулонов барьер. Например, для слияния двух протонов в реакции термоядерного синтеза протону нужно преодолеть кулонов барьер, созданный другим протоном (они отталкиваются), чтобы попасть в зону действия ядерных сил. Согласно формуле, кулонов барьер непрерывен от $r \rightarrow \infty$ до $r = 0$ и усиливается по мере приближения к заряженной частице (другому протону). В таком случае первому протону нужно преодолеть почти весь барьер до зоны действия ядерных сил (10^{-13} см.). В случае холодной эмиссии электрон также должен преодолеть барьер - энергию выхода порядка 10^{10} В/м. В этих случаях только процент от всех всех частиц преодолевает барьер за счет туннельного эффекта. Современная физика пытается объяснить и даже рассчитать вероятность туннельного перехода на основе квантовой механики (с переменным успехом).

Как и за счет чего появляется туннельный эффект, неизвестно. Предположение о том, что он является следствием " принципа неопределенности", несерьезно. Он может влиять только на элементарные частицы, такие как электрон и протон. Они, согласно этому принципу, как бы размазываются в пространстве и частица случайно может "залететь" на ту сторону барьера и там снова "собраться". Теоретически это может работать для легких элементарных частиц, но туннельный эффект способен переносить и намного более тяжелые частицы, такие как ядра гелия (альфа частицы) и целые молекулы в "криогенной химии". Кроме того получается, что потенциальный барьер каким-то образом "запускает" туннельный эффект, так как все проявления туннельного эффекта связаны с преодолением этого барьера. То есть, для появления туннельного эффекта необходим потенциальный барьер в том или ином виде (чтобы было что преодолеть). Присутствует ли туннельный эффект, преодолевающий гравитационный барьер (формула "Закона всемирного тяготения" аналогична формуле закона Кулона), неизвестно, хотя он может также существовать и участвовать в "испарении" черных дыр, "выбрасывая" из нее частицы (?).

В случае же прохождения электронов проводимости через диэлектрические пленки

за счет туннельного эффекта, квантовая механика с ее уравнением Шредингера и "принципом неопределенности" не работает. В этом случае все электроны проводимости пересекают пленку ("прозрачность окна" равна единице). Что же в данном случае образует потенциальный барьер?

В диэлектрике при наложении электрического поля происходит направленная поляризация - у дипольных диэлектриков поворачиваются диполи (например, у воды при низких частотах), а у поляризующихся диэлектриков диполи образуются за счет "растягивания" совмещенных зарядов, как показано на рис. 1. В самом первом приближении это выглядит так: При наложении электрического поля диполи в диэлектрике (дипольном и поляризующимся) выстраиваются как бы слоями - плюс к минусу, минус к плюсу (рис. 1).

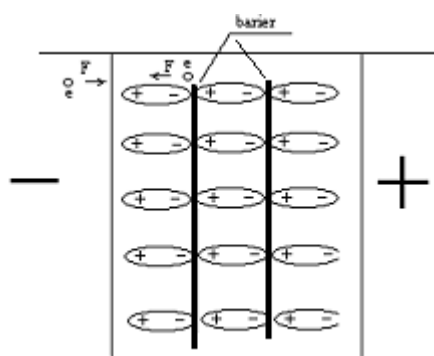


Рис. 1

То есть, электроны проводимости вначале притягиваются противоположным зарядом диполя и затем отталкиваются другим зарядом диполя. Таким образом на границе слоев диполей образуются потенциальные барьеры (рис. 1), препятствующий прохождению электронов проводимости. При перемене знака приложенного напряжения диполи разворачиваются (для дипольного диэлектрика), или совмещенные заряды поляризующегося диэлектрика растягиваются в противоположную сторону. Это создает в диэлектрике движение зарядов и, соответственно, ток смещения.

Из рис. 1 видно, что электрон дальше первого слоя диполей не полетит - барьер не пустит. Но тут вмешивается туннельный эффект, пропуская электроны через слой диэлектрика. За счет чего это происходит, неизвестно, хотя есть предположения, что это связано с эффектом "дальнодействия" - мгновенного переноса (телепортации) материальных объектов в пространстве. В данном случае электрон переносится через барьер, причем, без потери энергии. Попытки привлечения квантовой механики к объяснению туннельного эффекта закончились неудачно - его "прозрачность окна" оказалась равна единице (полная проводимость), что никак не соответствовало статистике квантовой механики.

В принципе, простота задачи (измерение проводимости через диэлектрические пленки, помещенные между двумя электродами) и отсутствие необходимости в специальной аппаратуре и в высоком напряжении между электродами позволяют провести крайне простые эксперименты.

В частности, известно, что сопротивление контакта между двумя алюминиевыми пластинами отсутствует, несмотря на то, что они разделены двумя диэлектрическими пленками окиси алюминия (толщиной 0.4 мкм). Автор данной статьи решил проверить, работает ли эффект и для более толстых пленок. Для этого был проведен ряд простейших экспериментов в которых измерялась проводимость через тонкие полиэтиленовые пленки, толщина которых намного больше упомянутых 0.4 мкм. Схема эксперимента представлена на рис 2.

Вначале была взята тонкая полиэтиленовая пленка (пищевая оберточная пленка толщиной 6 мкм) и помещена между двумя алюминиевыми пластинами 70x70x20 мм. Далее тестером (стрелочным с напряжением порядка 4 В) было измерено сопротивление между пластинами как показано на рис. А.

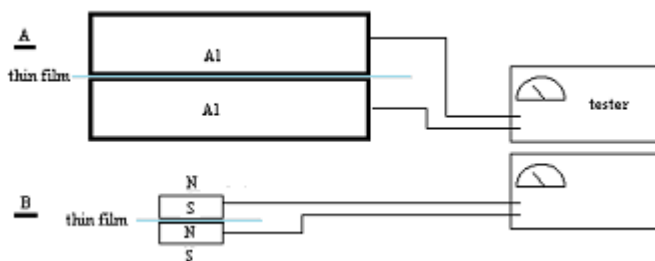


Рис. 2

- В эксперименте с двумя пластинами и пленкой толщиной 6 мкм между ними тестер показал отсутствие сопротивления между пластинами (полная проводимость). Единственно, необходимо было верхнюю пластину слегка прижимать, чтобы между пластинами не было воздушного зазора (даже микронного). Ток через пленку при измерениях (стрелочный тестер) составил от микроампер (шкала в кОм), до миллиампер (шкала в Ом) и до 2 А при непосредственной подаче напряжения между пластинами (см. ниже по тексту).
- Далее пленку поместили между двумя поляризованными по толщине неодимовыми магнитами 10x10x3 мм, покрытых никелем (рис. В). Было измерено сопротивление между никелевым покрытием магнитов, которое оказалось также равным нулю (полная проводимость). В этом случае вопроса о воздушном зазоре не стояло - магниты плотно притянулись друг к другу.
- Далее между пластинами поместили полиэтиленовую пленку толщиной 20 мкм. Была опять зарегистрирована полная проводимость.
- Затем эта пленка была помещена между магнитами (рис. В). И тоже была зарегистрирована полная проводимость.
- Проводимость регистрировалась при любой полярности приложенного напряжения.
- При толщине пленки в 40 мкм и больше эффект отсутствовал.

Затем эксперимент был изменен. Между двумя магнитами с никелевым покрытием (см. вариант В на рис. 2) были помещены две диэлектрические пленки (6 мкм каждая), между которыми была помещена тонкая алюминиевая фольга.

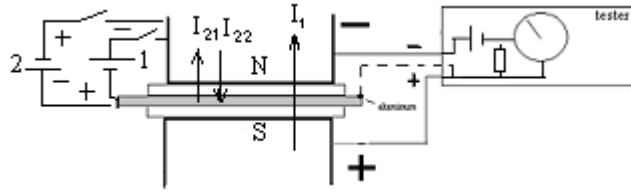


Рис. 3

Была зарегистрирована полная проводимость между покрытием магнитов и, также, между фольгой и покрытием каждого из магнитов. В этом случае можно предположить, что фольга является как бы пересадочным пунктом - электрон сначала проходит промежуток верхняя пластина - фольга, а затем промежуток фольга - нижняя пластина.

Можно определить влияние напряжения на фольге на протекание тока между пластинами. Для этого использовался независимый источник тока, который подключался к фольге и одной из пластин (см. рис.3.).

Схема измерения представлена на рис. 4

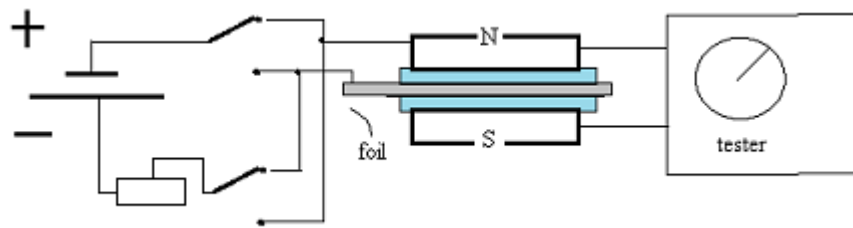


Рис. 4

Источником тока здесь были две батарейки ААА по 1.5 В каждая.

- При подаче напряжения (3 В) от отдельного источника на фольгу и одну из пластин (токи I_1 и I_{21} совпадают, вариант 1 на рис. 3) наблюдалось как бы падение проводимости между покрытиями магнитов - тестер регистрировал сопротивление порядка 1 кОм.
- При подаче напряжения (3 В) от отдельного источника на фольгу (-) и "верхнюю" пластину N (+) и при переключении тестера в режим измерения напряжения регистрировалось появление между покрытиями магнитов ЭДС 0.7 В той же полярности. (ЭДС от тестера было отключено)
- При перемене полярности внешнего источника (токи I_1 и I_{22} противоположны, рис. 3, вариант 2) проводимость между покрытиями магнитов как бы увеличивается (тестер зашкаливает). При переключении тестера в режим измерения напряжения и между покрытиями магнитов также была зарегистрирована ЭДС порядка 0.7 В, полярность которой совпадает с приложенной к фольге (рис. 3) .
- То же наблюдается между алюминиевыми пластинами (без магнитов, см. рис. 2) - в случаях 1 и 2 (см. рис. 3) соответственно появляется сопротивление порядка 0.5

кОм и ЭДС порядка 0.5 В.

- Это "дополнительное" напряжение (и сопротивление) зависит от тока между пластиной и фольгой. Вышеприведенные значения напряжения были зарегистрированы при токе в 3 А (две батарейки ААА, ток примерно 3 А, который был ограничен только их внутренним сопротивлением). При уменьшении тока между пластиной (покрытием магнита) и фольгой до 0.3 А сопротивление и ЭДС между пластинами уменьшались соответственно до 100 Ом и 0.07 В

Для определения источника этой ЭДС, была предложена эквивалентная схема соединений (показана на рис. 5). В ней было предположено, что между пластинами и фольгой существует некие сопротивления (R_1 и R_2 , см. рис. 5).

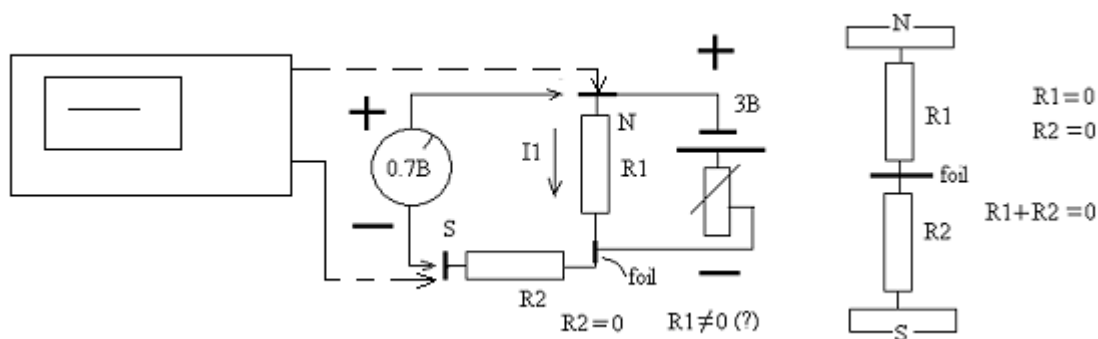


Рис. 5

В начале напряжение от внешнего источника подавалось на "верхнюю" (на рис. 5) пластину N (покрытие магнита) и фольгу. **Без подачи напряжения между фольгой и пластиной (покрытием магнита) сопротивление между пластинами и фольгой отсутствует. При подаче напряжения между фольгой и пластиной N между пластинами N и S появляется ЭДС, которая зависит от тока через промежуток между фольгой и пластиной (сопротивление R_1 , рис. 5).** При токе в 3 А эта ЭДС равна 0.7 В, а при токе в 0.3 А уменьшается до 0.07 В. Получается, что в промежутке между фольгой и пластиной как бы появляется сопротивление R_1 . Тогда, если $R_2 = 0$, то $E = I_1 R_1$ и, чем больше ток, тем больше и ЭДС. Тогда, при токе в 0.3 А сопротивление R_1 равно 0.2 Ом (?). Те же 0.2 Ом получаются при токе в 3 А. Все, вроде бы, сходится. Но прямое измерение сопротивления между пластинами, при подаче этого напряжения (между фольгой и пластиной), составило порядка 1 кОм. Можно предположить, что эта "дополнительная ЭДС" действует в противоположную сторону проводимости и как бы вносит сопротивление между пластинами, а перемена полярности вызывает ЭДС, совпадающую с ЭДС, приложенной к пластинам, которая как бы увеличивает проводимость. То есть, подача напряжения от отдельного источника между фольгой и пластиной влияет на проводимость между пластинами (и на туннельный эффект?).

Затем напряжение от внешнего источника было подано на "нижнюю" пластину S и фольгу. Эквивалентная схема соединений приведена на рис. 6. Здесь было также предположено, что между пластинами и фольгой существует некие сопротивления (R_1 и R_2), так же, как представлено на рис. 5.

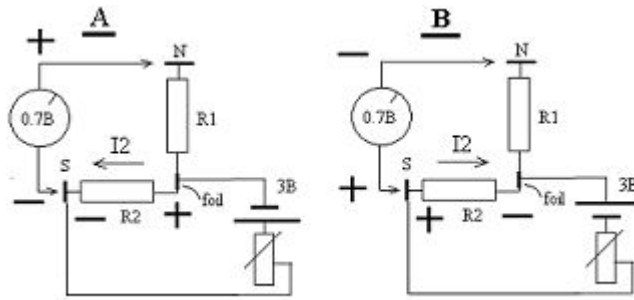


Рис. 6

Результат, как и ожидалось, получился такой же - полярности совпадают. При этом, перемена полюсов магнита никак не влияет на величину и полярность "дополнительной" ЭДС между пластинами.

Замена вольтметра (тестера) на осциллограф (рис. 5) также показала появление постоянного напряжения между пластинами при подаче напряжения на фольгу. При этом сопротивление между пластинами отсутствовало (клеммы осциллографа получились как бы закорочены и наводки на экране отсутствовали), а при подаче напряжения на фольгу осциллограф регистрировал появление постоянного напряжения между пластинами (без шумов и наводок).

Выводы: Без подачи напряжения между фольгой и пластиной (покрытием магнита) сопротивление между пластинами и пластинами и фольгой отсутствует. При подаче напряжения между фольгой и пластиной (любой, N или S), между пластинами N и S появляется ЭДС той же полярности, что и приложенная к фольге, величина которой зависит от тока через промежуток между фольгой и пластиной

Так или иначе, но поведение непонятное. Однозначный и достоверный анализ результатов экспериментов у автора данной статьи не получился вследствие незнания сущности самого туннельного эффекта. В частности, **ожидалось, что при подаче напряжения от внешнего источника ничего не изменится, так как токи I_1 , I_{21} и I_{22} - от отдельных источников и, вроде бы, независимые.** Но в экспериментах было зарегистрировано падение проводимости и появление "дополнительной ЭДС" между покрытиями магнитов (пластинами). Связано ли это с влиянием "дополнительных" токов I_{21} и I_{22} (рис. 5, 6) на туннельный эффект? Но, как показывает эксперимент (см. рис. 2) величина самого ток, текущего между пластинами, никак не влияет на проводимость (никакие сопротивления не появляются).

Далее эксперимент был усложнен. Между магнитами был помещен дополнительный слой пластиковой пленки и фольги. В этом случае между магнитами были помещены три слоя диэлектрика, между которыми находились два листа фольги (рис. 7, 8).

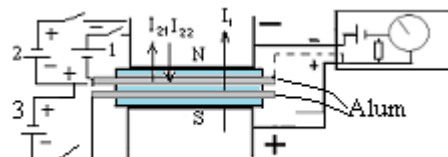


Рис. 7

Опять была зарегистрирована полная проводимость между никелевым покрытием магнитов, а также между слоями фольги и покрытиями магнитов. Подача внешней ЭДС между слоями фольги и покрытием магнитов (варианты 1 и 2 на рис. 7 и 8) вызвала те же изменения проводимости, как и в предыдущем случае - появление сопротивления между покрытием магнитов и появление ЭДС между ними.

На рис. 8 представлены результаты измерений напряжения между пластинами (никелевым покрытием магнитов) при подаче напряжения от внешнего источника между одной из пластин и фольгой и между слоями фольги.

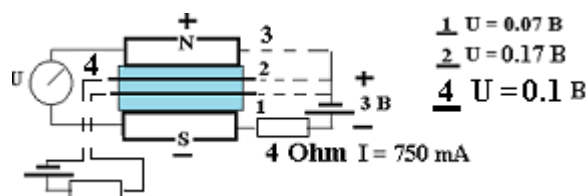


Рис.8

При подаче напряжения от внешнего источника на "нижнюю" (как показано на рис. 8) пластину (покрытие магнита S) и "нижний" слой фольги (вариант 1), появляется напряжение 0.07 В между верхней и нижней пластинами той же полярности, что и на фольге, при токе в 3 А между "нижней" фольгой и пластиной (ток ограничен только внутренним сопротивлением источника). При подаче напряжения между "нижней" пластиной S и верхним слоем фольги (вариант 2) между пластинами (покрытиями магнитов N и S) появляется напряжение 0,17 В при тока в 3 А между "верхней" фольгой и пластиной. При токе в 750 мА (ограничительное сопротивление 4 Ом) напряжения те же - 0.17 В при подаче напряжения на верхний слой фольги и 0.07 В при подаче на нижний слой фольги. Если подать напряжение между пластинами (рис. 8, вариант 3) без подачи напряжения на фольгу, то ток также равен 750 мА, что говорит об отсутствии сопротивления между пластинами и в этом случае (никакие сопротивления не появляются). Тогда выходит, что влияние напряжения между пластиной и верхним и нижним слоем фольги на ЭДС между пластинами разное - отличается где-то в два раза. И чем дальше слой фольги от верхней пластины, тем меньше ЭДС между пластинами. Подача напряжения от внешнего источника между слоями фольги (рис. 7, вариант 3, рис. 8, вариант 4) вызвало появление между пластинами ЭДС в 0.1 В той же полярности, что и на фольге.

Кстати, **спин электронов на проводимость никак не влияет**, так как в эксперименте с пластинами он не ориентирован внешним полем. При этом эксперимент с магнитами (неодимовые магниты с 1/4 Тл на поверхности), в котором спин может быть ориентирован, показывает те же результаты, что и с пластинами без магнитов. Причем **проводимость не зависит от полярности приложенного напряжения**.

Полученные результаты требуют дополнительного анализа, но получается, что **появление дополнительных токов (I_{21} и I_{22} на рис. 3 и 4) влияет на проводимость между пластинами и, следовательно, на туннельный эффект**.

Замечания к экспериментам: С магнитами работать проще, так как они притягиваются и сжимают пакет из диэлектрика и фольги. В случае двух алюминиевых пластин их нужно прижимать чтобы избежать прослойки воздуха между фольгой и диэлектриком. Кроме того, нужно отметить, что в эксперименте токи I_{21} и I_{22} , текущие между фольгой и пластиной, были намного больше (3 А, 0.75 А и 0.3 А), чем ток I_1 , текущий при измерении тестером сопротивления (порядка 3 мА). Батарейки лучше брать АА или А, у которых разрядный ток выше.

Опять же, причина такого "поведения" непонятна, но, так или иначе, все эти токи, текущие и между пластинами и между фольгой и пластинами - это токи через диэлектрическую пленку - результат туннельного эффекта.

Заключение

Потенциальные барьеры в пленке диэлектрика появляются в толще диэлектрика за счет взаимодействия зарядов диполей. Туннельный эффект через диэлектрическую пленку проявляется не только в случае пленок окиси алюминия (толщина двойного слоя 0.4 мкм), но даже для относительно толстых диэлектрических пленок толщиной до 20 мкм. При толщине 40 мкм и больше эффект отсутствует. Приложение напряжения от отдельного источника между алюминиевой фольгой, помещенной между диэлектрическими пленками и одной из пластин, влияет на проводимость, но вызывает появление ЭДС между пластинами (?). То есть, это как-то влияет на туннельный эффект. Влияет ли магнитное поле магнитов на эффект (неодимовые магниты с 1/4 Тл на поверхности), непонятно. Скорее всего нет, так как такие же результаты были получены и при перемене полюсов магнита и с двумя алюминиевыми пластинами без магнитов. Причина такого "поведения" туннельного эффекта непонятна, так же как остается непонятен механизм самого туннельного эффекта.