

Еще раз о туннельном эффекте через диэлектрическую пленку

Ивченков Геннадий,

kashey@kwic.com

Проведен ряд экспериментов по изучению туннельного эффекта между пленкой 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 должен также 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 в этом случае 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. 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 преодолевать). 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).

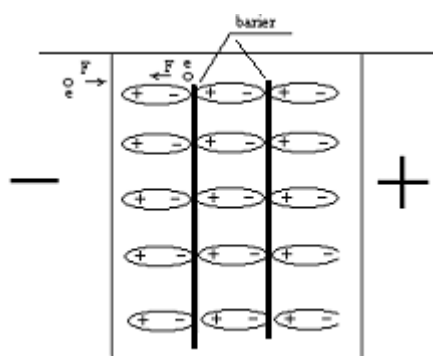


Рис. 1

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. 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 заметки 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.

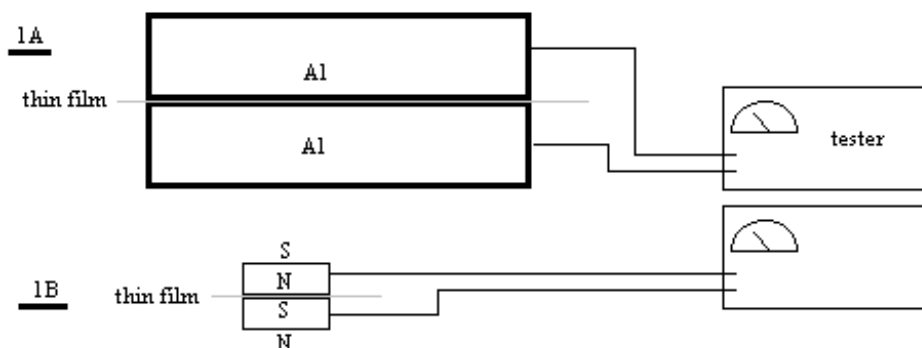


Рис. 2

- 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 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) при напряжении порядка 4 В.
- 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. Было 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 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.

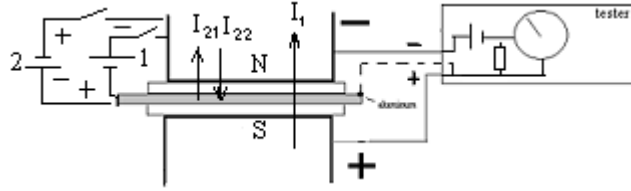


Рис. 3

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

- 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 падение проводимости между покрытиями магнитов - появляется сопротивление цепи порядка 1 кОм, регистрируемое тестером.
- При перемене полярности внешнего источника (токи I_1 и I_{22} противоположны, рис. 3, вариант 2) проводимость между покрытиями магнитов как бы увеличивается и даже появляется ЭДС порядка 0.7 В, полярность которой совпадает с приложенной к покрытиям магнитов на рис. 3. В данном случае ЭДС от тестера была отключена, а эта "дополнительная" ЭДС измерялась тестером в режиме вольтметра.
- 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.

Поведение, однако, весьма странное. Ожидалось, что при подаче напряжения с внешнего источника ничего не изменится, так как токи I_1 , I_{21} и I_{22} - от отдельных источников и, вроде бы, независимые. Кроме того, "по идее" должно быть наоборот - при противоположных токах могло бы быть падение проводимости (токи встречные), а не появление ЭДС. И откуда там взялась ЭДС?

Но, так или иначе, появление дополнительного тока (I_{21} и I_{22}) влияет на проводимость между пластинами. Тут, правда, нужно отметить, что в эксперименте токи I_{21} и I_{22} , текущие между фольгой и пластиной, были намного больше (две батарейки ААА, ток 2.5 А ограничен только их внутренним сопротивлением), чем ток I_1 (порядка 3 мА от тестера). Причина такого поведения непонятна, но, так или иначе, все эти токи - это токи туннельного эффекта через диэлектрическую пленку.

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 и при определенной полярности 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 с двумя алюминиевыми пластинами без магнитов.