

# Экспериментальное исследование туннельного эффекта через пленку диэлектрика

Ивченков Геннадий,

[kashey@kwic.com](mailto:kashey@kwic.com)

Проведен ряд экспериментов по изучению туннельного эффекта через пленку диэлектрика. Показано, что он работает также для достаточно толстых диэлектрических пленок. Было зарегистрировано влияние дополнительных токов на туннельный эффект и зарегистрировано электрическое сопротивление пленок диэлектрика, оказавшееся на уровне сотых ома. Данная статья знакомит с предварительными результатами экспериментов.

## 1. Введение

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 размываются 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 (?).

## 2. Потенциальный барьер при туннельном эффекте через диэлектрическую пленку

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).

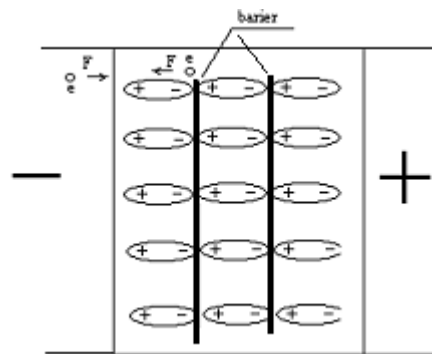


Рис. 1

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.

### 3. Измерение проводимости диэлектрических пленок

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.

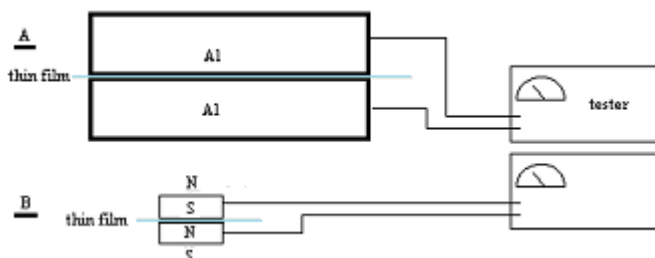


Рис. 2

- В эксперименте с двумя пластинами и пленкой толщиной 6 мкм между ними тестер показал отсутствие сопротивления между пластинами (в пределах точности тестера). 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 тестера в кОм), до 3 А (см. параграф 6 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 (в пределах точности тестера). В этом случае вопроса о воздушном зазоре не стояло - магниты плотно притянулись друг к другу.
- Далее между пластинами поместили полиэтиленовую пленку толщиной

примерно 15 мкм. Была опять зарегистрирована практически 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.

#### 4. Влияние промежуточного слоя фольги на проводимость

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.

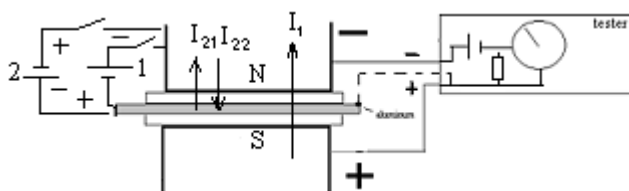


Рис. 3

Была зарегистрирована практически 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

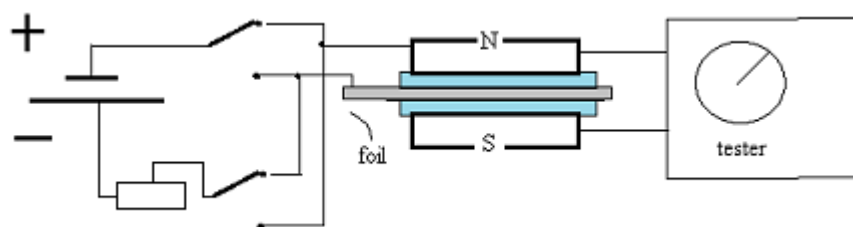


Рис. 4

Источником тока здесь были две батарейки АА по 1.5 В каждая. Кратковременно подавался ток примерно 3 А, как максимально возможный (при длительном токе в 3 А быстро "садились" батарейки). В дальнейших экспериментах использовался лабораторный блок питания.

- 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 (см. рис. 4).
- 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 отсутствовало)
- 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 А) - 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. При уменьшении тока между пластиной (покрытием магнита) и фольгой до 0.3 А (гасящее сопротивление 10 Ом на рис. 4) 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 пленок ( $R_1$  и  $R_2$ , см. рис. 5).

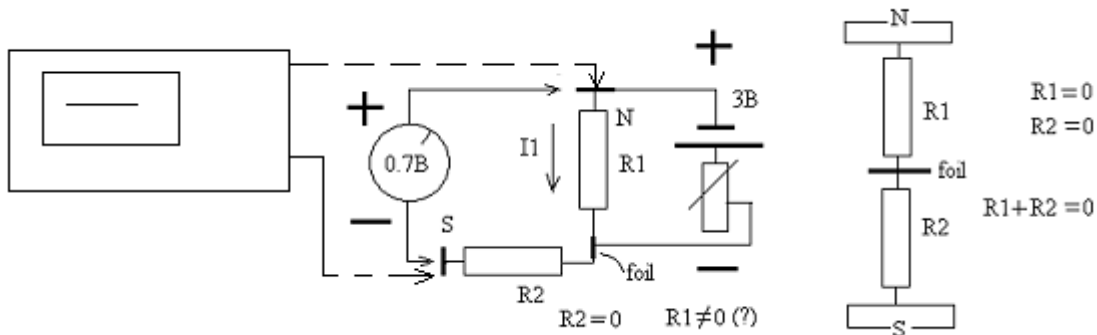


Рис. 5

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 пластинами и фольгой отсутствует (с точностью тестера). 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 R1, 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 R1. Тогда, если R2 = 0, то  $E = I_1 R_1$  и, чем больше ток, тем больше и ЭДС (вообще-то, сопротивление R2 может быть любым). Тогда, при токе в 0.3 А сопротивление R1 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.

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 существуют некие сопротивления (R1 и R2), так же, как представлено на рис. 5.

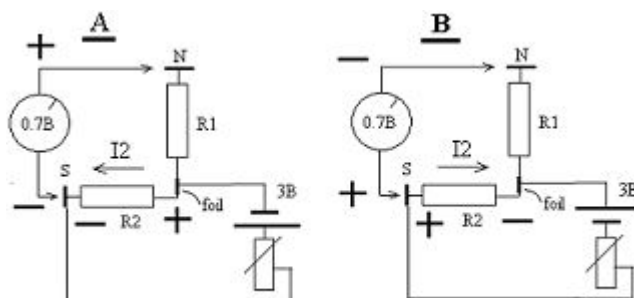


Рис. 6

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 практически 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 практически 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.. 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, а сопротивление пленки отсутствует.** Но в экспериментах было зарегистрировано появление "дополнительной ЭДС" между покрытиями магнитов (пластинами), что влияло на проводимость пакета. При этом, как показывает эксперимент (см. рис. 2), величина самого тока, текущего между пластинами, никак не влияет на проводимость.

## 5. Проводимость многослойных пакетов

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

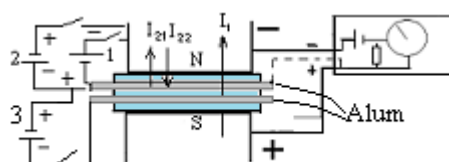


Рис. 7

Опять была зарегистрирована практически 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 ЭДС между пластинами, что сказалось на проводимости пакета.

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.

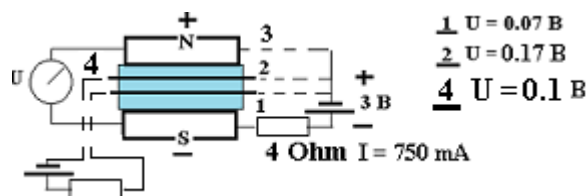


Рис.8

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.

Далее в схему было внесено гасящее сопротивление 4 Ом, ограничивающее ток до

750 мА, что позволило увеличить время подачи тока без разряда батареек. 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 практическом отсутствии сопротивления между пластинами и в этом случае. 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.

Далее напряжение от внешнего источника (ток 750 мА) было подано на пластины, "верхнюю" и "нижнюю", между которыми был помещен пакет из трех пленок и двух слоев фольги (вариант 3 на рис. 8). В этом случае напряжение между пластинами (если сопротивление между пластинами отсутствует) то и напряжение должно было бы отсутствовать. Но между пластинами было зарегистрировано напряжение в 0.5 В при токе в 750 мА. Также была зарегистрирована ЭДС в 0.16 В, возникшая между слоями фольги (вариант 4, рис.8, но с вольтметром вместо источника). Получается, что **сопротивление присутствует** и между пластинами пакета составляет примерно 0.7 Ом. Далее можно было бы предположить, что как бы существуют равные по величине сопротивления (их три) между слоями диэлектрика. В этом случае напряжения между слоями пластинами и фольгой и между слоями фольги должны быть равными и составлять примерно 0.17 В, что и наблюдается. Тогда сопротивление пленок диэлектрика будут примерно равны 0.21 Ом, что соответствует величине сопротивления полученного ранее в эксперименте (см. текст под рис. 5). Результаты получены при работе с покрытыми никелем неодимовыми магнитами 10x10x3 мм (в тексте упомянуты как "пластины"). Эти результаты были получены с пластинами, пленкой и фольгой, которые не были предварительно обработаны (обезжирены). Как показали дальнейшие эксперименты, даже малейшее загрязнение и наличие воздуха между пластинами и пленкой вносит контактное сопротивление, искажающее измерения. Тем не менее, несмотря на вызванную этим неточность измерений, они достоверно установили наличие упомянутых выше феноменов (проводимость пленки, влияние дополнительных токов на проводимость). При этом было зарегистрировано электрическое сопротивление пленок, правда, очень малое.

## 6. Сопротивление диэлектрических пленок при туннельном эффекте

В предыдущих разделах статьи было высказано предположение о существовании некоего электрического сопротивления, создаваемого пленкой диэлектрика (см. рис.5 и 6). Это можно было бы проверить прямыми измерениями, но точность тестера не позволяет это сделать. В таком случае стало необходимым определить сопротивление одного слоя пленки косвенным способом. Для этого на пластины - магниты с никелевым покрытием 10x10 мм, между которыми был помещен один слой пленки 6 мкм, был подан ток 720 мА от источнике на рис. 8. Вольтметр показал напряжение в 0.03 В между пластинами, что соответствует сопротивлению в 0.04 Ом. Далее между пластинами (магнитами) было помещено два слоя пленки 6 мкм и был подан ток 720 мА от источнике на рис. 8. Вольтметр показал напряжение в 0.07 В между пластинами, что соответствует сопротивлению в 0.09 Ом. То есть в этих измерениях было зарегистрировано



сопротивление одного слоя пленки, которое было равно примерно 0.045 Ом. Опять же, этот результат был получен для необработанных (не обезжиренных) поверхностей магнитов и пленки.

То есть **было зарегистрировано сопротивление**, правда, очень малое. Откуда берется это сопротивление, непонятно. Можно было бы предположить, что это сопротивление никелевого покрытия магнитов, но измерение показало, что оно отсутствует.

Далее, для получения достоверных данных при больших токах, вместо двух батареек АА был применен лабораторный источник тока PS 3030, в цепь которого были подключены две лампы накаливания (12 В) в качестве индикатора проводимости, гасящего сопротивления и стабилизатора тока. Схема представлена на рис. 9. Сопротивление измерялось косвенным способом посредством измерения напряжения  $U$  на пластинах (покрытиях магнитов) и пересчитывалось по формуле  $R = U/I$  при разных токах  $I$ . Токи при измерениях варьировались от 0.5 до 3 А.

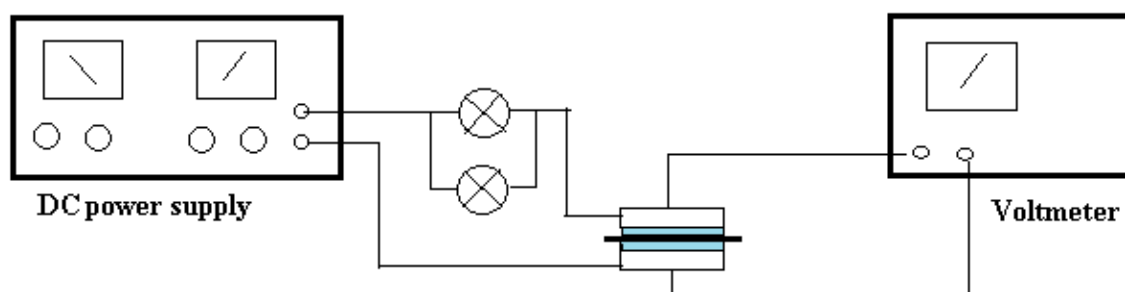


Рис. 9

1. Через пакет из двух пленок 6 мкм и одного слоя фольги (рис. 3, 9, магниты 20x20 мм) был пропущен ток 3 А. Измеренное напряжение на пакете составило 0.24 В, что соответствовало сопротивлению пакета в 0.075 Ом. Была получена зависимость напряжения между пластинами и током. Ток варьировался от 1 А до 3 А. Были измерены напряжения на пакете, который составили 0.06, 0.13, 0.21 В соответственно. Зависимость напряжения от тока получилась линейная. При этом сопротивление пакета составило 0.065 Ом и не зависило от тока. Соответственно, сопротивление одной пленки (при площади контакти 4 см<sup>2</sup>) составило порядка 0.032 Ом
2. Через одну пленку 6 мкм между магнитами (магниты 10x10 мм) был пропущен ток 3 А. Измеренное напряжение на пакете (две пластины и пленка) составило 0.07 В, что соответствовало сопротивлению пакета в 0.021 Ом. Была получена зависимость напряжения между пластинами и током. Ток варьировался от 1 А до 3 А. Были измерены напряжения на пакете, который составили 0.02, 0.04, 0.07 В соответственно. Зависимость напряжения от тока получилась линейная. При этом сопротивление пакета (пленки 6 мкм толщиной при площади контакта 1 см<sup>2</sup>) составило примерно 0.02 Ом и не зависило от тока
3. Через одну пленку толщиной примерно 15 - 20 мкм (прозрачная полиэтиленовая пленка для тонких пакетов), помещенной между магнитами (магниты 10x10 мм) был пропущен ток 3 А. Измеренное напряжение на пакете составило 0.13 В, что

соответствует сопротивлению пакета в 0.04 Ом и мощности, выделенной на сопротивлении 0.39 Вт.

4. Через одну пленку толщиной примерно 15 - 20 мкм (прозрачная полиэтиленовая пленка для тонких пакетов), помещенной между магнитами (магниты 20x20 мм) был пропущены токи 450 мА, 720 мА и 3 А.. Измеренные напряжения на пакете составили 0.02, 0.04 и 0.08 В, что соответствует сопротивлению пакета в 0.04, 0.05 и 0.03 Ом соответственно.
5. Было высказано предположение, что микронное загрязнение (жировая пленка) и наличие остатков воздуха между пластинами влияет на результаты измерений.
6. **Пленка и пластины были предварительно обезжирены.** Через одну пленку 6 мкм между магнитами (магниты 10x10 мм) были пропущены токи 0.5, 1 и 2 А. Измеренные напряжения на пакете (две пластины и пленка) составили 0.003, 0.006 и 0.011 В соответственно. Это соответствовало сопротивлению пленки 0.006 Ом. Сопротивление не зависило от тока. Вроде бы получилось, что вклад в сопротивление пакета вносит упомянутая жировая прослойка.
7. П.6 был повторен для **необезжиренных поверхностей.** Результат примерно такой же - 0.004 Ом. То есть упомянутая жировая пленка никак не влияет.
8. Через две пленку толщиной 6 мкм каждая, помещенной между магнитами (магниты 10x10 мм) в течении нескольких минут был пропущен ток 3 А (см. пункт 3, параграф 6). Мощность, выделенная на сопротивлении составила 0.38 Вт. При этом был зарегистрирован нагрев пакета. Нагрев мог быть частично вызван контактным сопротивлением пластина - пленка.
9. **То есть, мощность, падающая на сопротивлении пакета выделяется в виде тепла, как у обычного сопротивления.**

## 7. Влияние контактного сопротивления на проводимость

Для выяснения причин контактного сопротивления были проведены его измерения для предварительно обезжиренных двух алюминиевых пластин и двух покрытых никелем магнитов, которые применялись в многих экспериментах (10x10x3 мм). Измеренное контактное сопротивление алюминиевых пластин составило 0.0024 Ом, а для магнитов - 0.001 Ом. В то же время сопротивление пакета алюминиевые пластины - пленка составило 0.024 Ом, а сопротивления пакета магниты - пленка составило 0.006 Ом. При этом сопротивление необезжиренных поверхностей магнитов (поверхности специально касались пальцами) составило те же 0.001 Ом. Получается, что возможная пленка жира никак на контактное сопротивление не влияет. Откуда берется это сопротивление, неизвестно. Возможно, что это сопротивление окиси алюминия  $Al_2O_3$  (для двух Al пластин) и окиси никеля NiO. Но эти пленки являются диэлектриками и для их проводимости также нужен туннельный эффект.

Результаты измерения сопротивления, приведенные выше, являются усредненными и приблизительными, так как оказалось, что напряжение на пластинах нестабильно и различается при разных измерениях того же пакета (две пластины и пленка) иногда в несколько раз. Также, напряжение на пластинах (и сопротивление) иногда уменьшается в

течении времени при прохождении тока. Например в одном из экспериментов (с плохим контактом) напряжение (и, соответственно, сопротивление) на пластинах при включении тока 1 А составило 0.3 В, затем в течении двух секунд упало до 0.22 В и далее без видимых причин менялось от 0.18 В до 0.24 В.

**Так как эти эксперименты связаны с измерениями сопротивления очень тонких микронных пленок и очень малых напряжений (единицы милливольт), то даже, вроде бы незначительные факторы могут сильно влиять на результаты.**

- На точность и воспроизводимость измерение сильно влияет контакт между пленкой и пластинами (результаты могут отличаться в разы).
- На проводимость пакета влияет даже небольшое наличие воздуха между пленкой (пленками в многослойном пакете) и пластинами, ухудшающее контакт - сопротивление иногда возрастает на порядок. Впрочем, и такой пакет продолжает проводить. Например, напряжение на пластинах (ток 1 А, два магнита и 6 мкм пленка) составило в одном из измерений 0.3 В (сопротивление 0.3 Ом) вместо 0.006 В (сопротивление 0.006 Ом). Это был, по-видимому, результат плохого контакта из за воздушной прослойки. Но пакет продолжал проводить и слегка нагревался.
- Пакеты, имеющие относительно большое сопротивление из за плохого контакта (порядка 0.3 - 0.5 Ом) нагреваются при прохождении тока. Скорее всего, нагревается не пленка, а контактное сопротивление, так как реальное сопротивление пакета магниты - 6 мкм пленка составляет порядка 0.006 Ом. Оно, естественно, не нагревается.
- Измеренное контактное сопротивление двух соединенных магнитов (никелевого покрытия) составило порядка 0.001 Ом и для обезжиренных поверхностей и для необезжиренных. Какое контактное сопротивление пластин (никелевого покрытия) с пленкой, неизвестно.
- Одним из факторов, дающих разброс результатов при измерениях на разных участках пленки и для разных партий пленки, может являться разная толщины пленки (толщина бытовой пленки 6 мкм не нормирована и может меняться от 6 до 15 мкм) .
- Иногда напряжение между пластинами меняется в процессе измерений. Причины этого неизвестны. Возможно это связано с постепенным вытеснением воздуха из области контакта. Так же, иногда измерения, проведенные в разное время с тем же пакетом, дают разные результаты.
- На проводимость могут влиять так называемые "плазмоны", возникающие на границе металл-диэлектрик при прохождении тока (электронное возбуждение) и вызывающие потерю энергии. В принципе, это относится к СВЧ диапазону, но может влиять и при постоянном токе.
- Кроме того, полученные результаты являются, опять же, приблизительными, в частности, из за значительного разброса данных и плохой воспроизводимости результатов (автор статьи с этим пока не может справиться). На точность измерений напряжения также влияет точность вольтметра в диапазоне тысячных

долей вольта.

- Но здесь возникает вопрос, а как с изоляцией у микросхем, толщина которой составляет доли микрона? Эксперименты, описанные в данной статье, проводились с полиэтиленовыми пленками. А как для других диэлектриков? К сожалению автору данной статьи не удалось найти пленки из других диэлектрических материалов толщиной в несколько микрон.

В принципе, все это очень похоже на обычное активное сопротивление (электронная проводимость) - как бы пленка является проводником со своим сопротивлением. Но в этом случае, так как это сопротивление очень мало (сотые и тысячные доли ома), должен проводить пакет из трех и более слоев пленки (0.006, 0.012, 0.018 Ом и т.д), чего не наблюдается. Три пленки общей толщиной 18 мкм ток не пропускают.

Пленка толщиной 20 мкм "находится на грани" - проводит при работе с магнитами 20x20 мм, но не проводит с магнитами 10x10 мм.

Пленка толщиной порядка 40 мкм (для прочных пакетов) ток также не пропускает.

Таким образом, свести проводимость пленки диэлектрика к обычному сопротивлению не удастся (хотя и похоже). Остается только констатировать, что проводимость диэлектрической пленки является результатом туннельного эффекта.

## 7.1 Выводы

Таким образом, эксперименты показывают, что существует некое сопротивление пакета, содержащего пластины и тонкую пленку между ними. Пленка, которое в первом приближении пропорционально толщине пленки и обратно пропорционально поверхности. Так как в данных экспериментах пришлось иметь дело со сверхтонкими пленками и напряжениями в тысячные доли вольта, то пришлось учитывать ряд факторов, казавшиеся вначале несущественными, но оказавшим сильное влияние на достоверность и точность измерений. Одним из них является контактное сопротивление, которое составляет часть (иногда большую) от измеренного и причина которого не ясна. В частности, для пакета из двух (обезжиренных и необезжиренных) поверхностей 10x10 мм магнитов и 6 мкм пленки сопротивление составило примерно 0.006 - 0.004 Ом для одного слоя. При этом контактное сопротивление поверхностей указанных магнитов составило примерно 0.001 Ом. Реальное контактное сопротивление поверхности - пластина (покрытие магнита) - диэлектрическая пленка, неизвестно. В частности, наличие не удаленной прослойки воздуха увеличивает контактное сопротивление на порядок. Такой пакет с большим контактным сопротивлением нагревается при прохождении тока. Здесь можно предположить, что нагревается не сама пленка, а упомянутое контактное сопротивление. То есть, мощность, падающая на сопротивление выделяется в виде тепла. Кроме того, согласно современным воззрениям существуют так называемые "плазмоны", возникающие на границе металл-диэлектрик, которые также могут влиять на проводимость (и туннельный эффект). Увеличение толщины пленки до 0.15 мкм приводит к увеличению сопротивления по сравнению с 6 мкм. Увеличение площади контакта приводит к уменьшению сопротивления (см. п. 4 и 5, параграф 6).

**Тогда выходит, что при туннельном переходе между слоями диэлектрика все же присутствует некоторое очень малое сопротивление, которое не зависит от тока, а**

**только от толщины пленки, конфигурации пакета и контактного сопротивления поверхностей.**

**Появление дополнительных токов в пакете** ( $I_{21}$  и  $I_{22}$  на рис. 3 и 4 в эксперименте с фольгой) **влияет на проводимость между пластинами.**

**Спин электронов на проводимость не влияет**, так как в эксперименте с алюминиевыми 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 и дополнительных экспериментов, так как изначально неясен механизм туннельного эффекта через диэлектрические пленки (он остался неясен и сейчас).

**Замечания к экспериментам:** крайне важно удалить прослойку воздуха между пластинами и пленками. Наличие такой прослойки портит эксперимент. При этом измеренное сопротивление может отличаться на порядок. С магнитами работать несколько проще, так как они притягиваются и сжимают пакет из диэлектрика и фольги, удаляя прослойку воздуха (к сожалению, иногда не всю). В случае двух алюминиевых пластин их иногда нужно прижимать чтобы избежать прослойки воздуха между пленками (пленками и фольгой). Снимать напряжение нужно непосредственно с пластин (покрытий магнитов), но не с соединительных проводов, которые вносят свое сопротивление.

Опять же, причина такого "поведения" непонятна, но, так или иначе, все эти токи, текущие и между пластинами и между фольгой и пластинами - это, по всей видимости, токи, текущие через диэлектрическую пленку в результате туннельного эффекта. Другого объяснения нет. Диэлектрик постоянный ток не проводит.

## 8. Заключение

Потенциальные барьеры в пленке диэлектрика появляется 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. При туннельном переходе между слоями диэлектрика все же присутствует некоторое очень малое сопротивление, которое (см. выше по тексту, параграф 7) зависит от толщины пленки, конфигурации пакета и, особенно, от контактного сопротивления поверхностей. Причина появления этого сопротивления неясна. Также был зарегистрирован нагрев пакета мощностью, выделенной на этом сопротивлении. Изменения вида пленки при этом не было зарегистрировано.

Приложение напряжения от отдельного источника между алюминиевой фольгой, помещенной между диэлектрическими пленками и одной из пластин, влияет на проводимость и вызывает появление ЭДС между пластинами. Магнитное поле магнитов на эффект (неодимовые магниты с 1/4 Тл на поверхности) не влияет, 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.

## 9. Литература:

- Г. Ивченков, "Несколько замечаний о туннельном эффекте", <http://new-idea.kulichki.net/?mode=physics>
- Туннельный эффект, Википедия, [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%83%D0%BD%D0%BD%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9\\_%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%83%D0%BD%D0%BD%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82)
- В.И. Гольданский, «Явление квантового низкотемпературного предела скорости химических реакций», «Успехи химии», Декабрь 1975, том XLIV, выпуск 12, Москва
- Криохимия, Википедия, <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B8%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%8F>
- Элементы теории альфа распада, Википедия, [https://studopedia.ru/9\\_155050\\_elementi-teorii-alfa-raspada-potentsialniy-barer-tunnelniy-effekt.html](https://studopedia.ru/9_155050_elementi-teorii-alfa-raspada-potentsialniy-barer-tunnelniy-effekt.html)
- В.Н. Глазков, «Эффект Джозефсона, Заметки к лекциям по общей физике», МФТИ, Москва, 2017
- Структура металл-диэлектрик-металл, [https://studwood.ru/2058418/tehnika/struktura\\_metall\\_dielektrik\\_metall](https://studwood.ru/2058418/tehnika/struktura_metall_dielektrik_metall)
- Холодная эмиссия электронов из металла, [https://studwood.ru/1835662/matematika\\_himiya\\_fizika/holodnaya\\_emissiya\\_elektronov\\_metalla](https://studwood.ru/1835662/matematika_himiya_fizika/holodnaya_emissiya_elektronov_metalla)
- Эмиссия электронов из проводников, [http://ens.tpu.ru/posobie\\_fis\\_kusn/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0.%20%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%A2%D0%BE%D0%BA/06-1.htm](http://ens.tpu.ru/posobie_fis_kusn/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0.%20%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%A2%D0%BE%D0%BA/06-1.htm)
- "Наноэлектронный" этап развития накопителей информации на магнитных дисках, Туннельный магниторезистивный эффект», <https://www.intuit.ru/studies/courses/12180/1173/lecture/19636?page=3>
- «Физики измерили время квантового туннелирования», <https://ab-news.ru/2019/05/14/fiziki-izmerili-vremya-kvantovogo-tunnelirovaniya/>.
- Nature 583, 529 – 532 (2020), «Measurement of the time spent by a tunnelling atom within the barrier region», <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2490-7>