МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

Квантовый эффект в наноконтактах

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4031 группы

направления 03.03.03 – «Радиофизика»

института физики

Зюзина Владимира Андреевича

Научный руководитель

доцент кафедры электроники, колебаний и волн — 06.06.22 подпись, дата — Перченко М.И.

Зав. кафедрой электроники, колебаний и волн

к. ф.-м. н., доцент — 06.06.22 подпись, дата — Гришин С.В.

Саратов 2022 г.

Введение

Цель моей работы была посвящена изучению квантового явления, наблюдаемого при разрыве контакта двух проводников, находящихся под разными электрическими потенциалами. Работа состояла из экспериментальной части и теоретического расчета. Суть этого квантового явления лучше всего проявляется на осциллограмме из статьи[1] (рис.1).

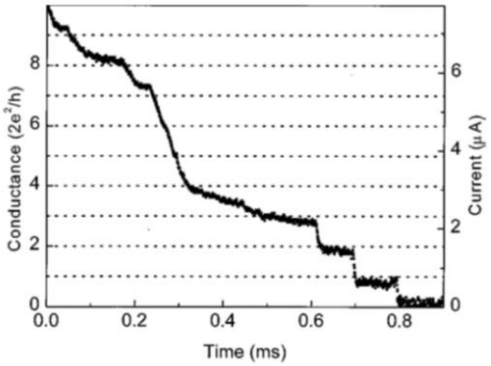

Рис.1 Изменение во времени тока при разрыве контакта

На этой осциллограмме показано изменение во времени тока, протекающего через контакт двух металлических проводников, находящихся под постоянным напряжением, при разрыве этого контакта. Ожидалось, что будет наблюдаться плавная непрерывная кривая, однако как видим это не так. Основная особенность этой осциллограммы состоит в том, что в нижней части зависимости изменение тока происходит равными скачками. Из чего следует, что, равным скачкам тока ΔI отвечают равные скачки проводимости ΔG. Численное значение ΔG в эксперименте оказалось близким к теоретическому значению $\frac{2e^2}{h}$. Именно эта величина соответствует расстоянию между соседними пунктирными горизонтальными линиями на осциллограмме по

[1] J.L. Costa-Kramer, N. Garcia, P. Garcia-Mochales, P.A. Serena. “Nanowire formation in macroscopic metallic contacts: quantum mechanical conductance tapping a table top”. Surf. Sci. 342, L1144–L1149 (1995)

левой вертикальной оси. В данной работе будут рассмотрены различные способы разрыва контакта и выбор наилучшего. Вторая же часть состоит в написании программы и численном обсчёте упрощенной квантовомеханической модели разрыва контакта.

Схема экспериментальной установки, описание ее работы и некоторые особенности

Была собрана электрическая схема установки для наблюдения этого явления(рис.2).

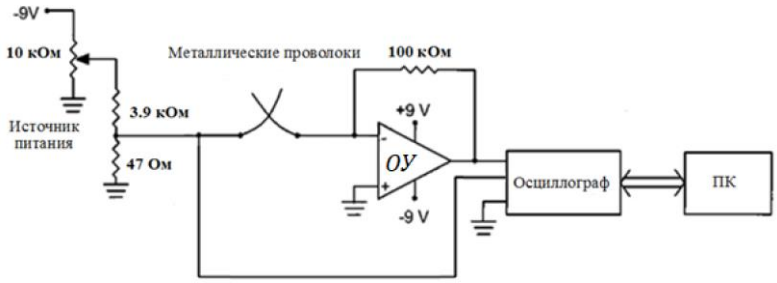

Рис. 2. Схема экспериментальной установки

На этой электрической схеме проводники изображены в виде изогнутых линий и контактируют друг с другом. В левой части установки расположен источник напряжения, которое подводится к контактирующим проводникам. Величина этого напряжения может быть установлена в диапазоне 0-100мВ. Под действием этого напряжения через контакт протекает ток, который поступает на вход операционного усилителя (ОУ). Пропорционально величине тока на выходе ОУ образуется напряжение, которое подается на вход осциллографа. При разрыве контакта на экране осциллографа фиксируется зависимость этого напряжения от времени. Далее эта осциллограмма передается на персональный компьютер (ПК). Мне было предложено работать на аналогичной установке. В ходе многочисленных экспериментов наблюдались разные осциллограммы. Возникла необходимость для дифференциации осциллограмм. Был предложен следующий критерий:

осциллограммы относились к «условно хорошим», если на осциллограмме наблюдается не менее двух вертикальных и горизонтальных участков, а остальные осциллограммы – к «условно плохим осциллограммам. При близости величины скачков к значению, отвечающему квантовому скачку проводимости $\frac{2e^2}{h}$, будем считать, что наблюдаем это квантовое явление с достоверностью. Оказалось, что доля хороших осциллограмм зависит от метода разрыва контакта. Поэтому передо мной была поставлена задача предложить и исследовать различные методы разрыва контакта проводников и выбрать среди них наилучший. Мною было предложено и исследовано 4 метода разрыва контакта.

Экспериментальная часть. Методы разрыва контакта

Были протестированы различные способы разрыва контакта. Первым методом был обычный удар по столу. Две проволочки лежали одна на другой и путем механического возмущения (например, удар по столу) происходил разрыв контакта. В этом методе абсолютно большинстве случаев получаются плохие осциллограммы.

Следующий метод разрыва контакта был назван условно “Звоночек”. Модель разрыва контакта приведена на рис.3. Один конец подвижной проволочки укреплялся на мембране электрического звоночка, а второй конец был жёстко зафиксирован. Вторая проволочка располагалась горизонтально между двумя опорами и под действием грузика, прикрепленного к концу проволочки, поддерживалась в напряженно растянутом состоянии.

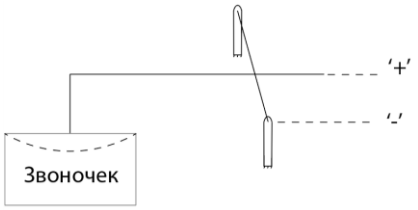

Рис. 3. Метод “Звоночек”

При подаче переменного напряжения на звоночек мембрана звоночка деформировалась и это приводило к разрыву контакта. Разрыв контакта происходил с очень большой скоростью и ступенек не наблюдалось, почти все осциллограммы были плохие.

Далее следовал метод условно названный “Маятник”. Одна из проволочек жестко укреплялась в двух точках горизонтально, а вторая проволочка располагалась вертикально под действием прикреплённого к одному из её концов грузика. Модель разрыва приведена на рис.4.

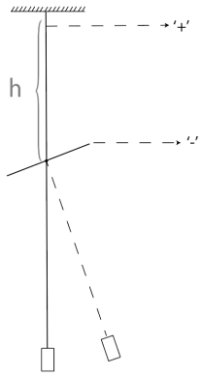

Рис. 4. Метод “Маятник”

При отклонении груза (показано пунктиром) образовывался контакт между проволочками, а при отпускании груза начиналось его движение и в какой-то момент происходил разрыв контакта. При этом, была возможность менять расстояние h от вертикального подвеса до места контакта.

Максимальное значение хороших осциллограмм в этом методе составляло 25%. Предположительно это связано с плавностью разрыва контакта во времени, чем более плавно идет разрыв на небольшой высоте, тем более вероятно появление хороших осциллограмм.

Разрыв методом “Электризация”. Одна из проволочек располагалась горизонтально между двумя опорами и под действием грузика, прикрепленного к одному из её концов, поддерживалась в напряженно растянутом состоянии (на данном рисунке эта проволочка перпендикулярна

плоскости рисунка и показана в поперечном сечении заштрихованной окружностью). Вторая проволочка расположена в плоскости рисунка и показана в сечении, но не заштрихованной для уменьшения общей площади штриховки на рисунке. Модель разрыва приведена на рис.5. Воздействуя на свободный конец второй проволочки тем или иным способом, можно было добиваться разрыва контакта. Это воздействие осуществлялось подведением к свободному концу второй проволочки предварительно заряженного диэлектрического материала (например, кусочка полиэтилена). За счет электризации проволочки происходило ее притяжение к этому материалу (новое положение этой проволочки показано пунктиром и отмечено цифрой 1) и приводило ее в контакт с первой проволочкой. При отведении диэлектрика от проволочки она приходила в движение под действием силы упругости и перемещалось в положение 2, осуществляя тем самым разрыв контакта. Исходное положение второй проволочки до подведения заряженного диэлектрика показано на рисунке цифрой 3. Это оказался лучший из методов по доле хороших осциллограмм (40%).

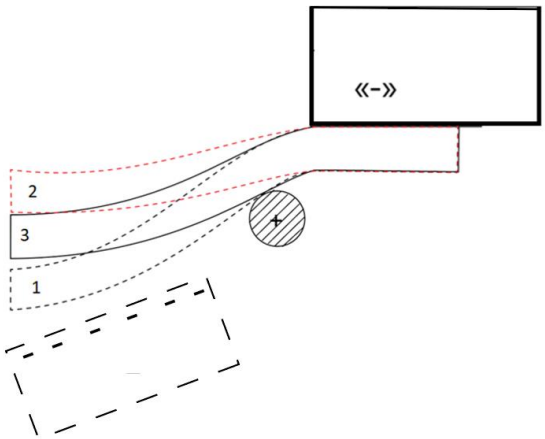

Рис. 5. Модель разрыва контакта в методе “Электризация”

Анализируя представленные способы разрыва контакта, было отмечено, что наилучшие результаты соответствует соблюдению двух условий разрыва контакта: монотонность перемещения разрыва контакта и как можно больший

временной интервал, за который происходил разрыв контакта. Еще одно условие естественным образом может быть сформулировано: возможность обеспечения одинаковых внешних условий при повторении разрыва контакта это условие наилучшим образом реализовывалось в 4 методе методом электризации за счет использования электрофорной машины. В отдельных осциллограммах метода электризации наблюдалось расхождение экспериментального значения скачка проводимости дельта ΔG и теоретической величины $\frac{2e^2}{h}$ в 10%.

Квантовомеханическая модель явления и программа численного расчета

В полуклассической одномерной модели отсутствует временная динамика изменения проводимости контакта при его разрыве. Поэтому была предложена упрощенная квантовомеханическая модель описания, удовлетворяющая динамике разрыва контакта. Моя цель была получить выражение, по смыслу несущее в себе дискретное изменение величины пропорционально $\frac{2e^2}{h}$. Геометрические условия рассматриваемой модели представлены на рис 6.

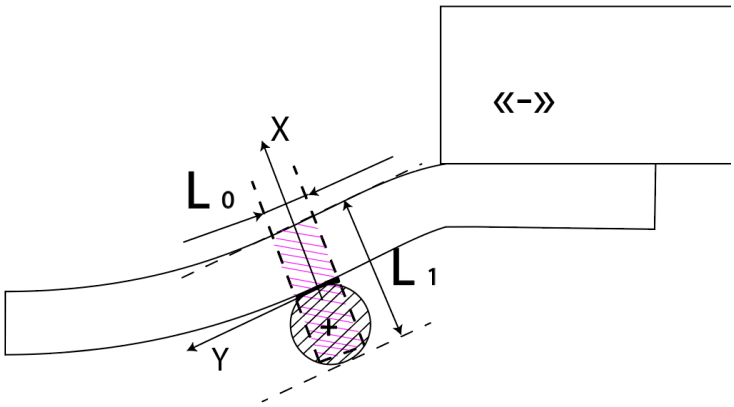

Рис. 6. Модель разрыва контакта

Предположим, что линией контакта проволочек является отрезок прямой линии длиной L_0 (выделено утолщенной линией в области контакта; при разрыве контакта L_0 уменьшается от конечной величины до нуля). Вдоль этой линии направим ось Y. Перпендикулярно ей через середину контактирующего участка расположена ось X. L_1 не меняется и равна двойному диаметру проволочки. При пересечении электронами отрезка L_0 можно считать электроны находящимися в двухмерной прямоугольной бесконечно глубокой потенциальной яме. Поперечное сечение этой прямоугольной потенциальной ямы отмечено на рис.6 красной штрихованной линией. Эта же яма вместе с осями X и Y и соответствующими размерами показана в изометрии на рис 7.

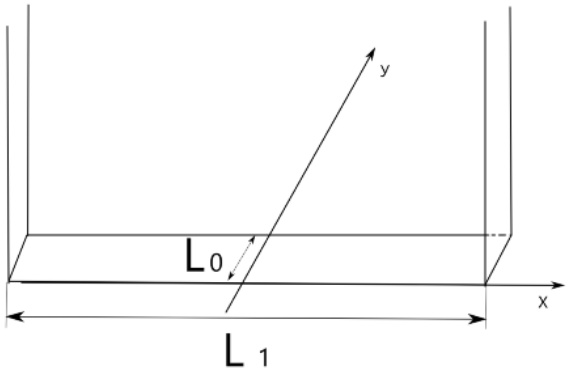

Рис. 7. Двухмерная бесконечно глубокая потенциальная яма

Электроны, участвующие, в создании тока через контакт, имеют такие же значения энергии, как и свободная частица в двухмерной потенциальной яме. Эти значения энергий получаются из стационарного уравнения Шредингера с нулевыми граничными условиями для волновой функции на стенках ямы. Хорошо известные решения этого уравнения[2] приводят к значениям энергии для $E_н$ и $E_к$.

[2] Квантовая механика под редакцией Л. Д. Фадеева. Альберт Мессиа. Монография.1978 г.

$$E_{\text{полн.}_{n,k}} = E_n + E_k, \text{ где}$$

$$E_n = \frac{n^2\pi^2h^2}{L_0^2 2m} = a\frac{n^2}{L_0^2} \qquad n = 1,2,3 \ldots,$$

$$E_k = \frac{k^2\pi^2h^2}{L_1^2 2m} = a\frac{k^2}{L_1^2} \qquad k = 1,2,3 \ldots,$$

$$a = \frac{\pi^2h^2}{2m}$$

При разрыве контакта L_0 меняется от конечного значения до нуля, а L_1 будем считать постоянным и равным двойному диаметру проволочки. Одновременно с этим электроны находятся в теле медных металлических проводников и вероятность найти у электронов значение энергии E дается функцией распределения Ферми-Дирака(рис.8).

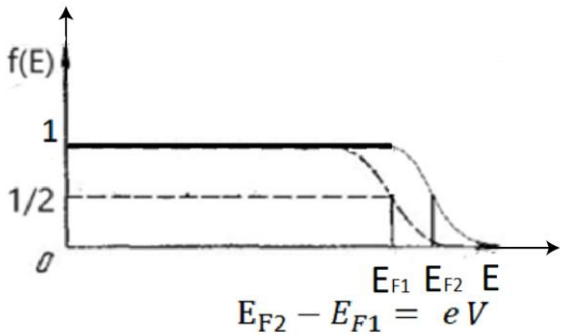

Рис.8. Функции распределения для металлических проволочек, находящихся под напряжением

На рис.8 приведены две функции распределения для металлических проволочек, находящихся под напряжением V. E_{F1} и E_{F2} значения уровней Ферми в этих проводниках. Будем считать, что ток, протекающий через контактирующие проволочки, пропорционален числу энергетических уровней $E_{полн}$, попадающих в энергетический интервал E_{F1}, E_{F2}. В качестве значений E_{F1} возьмем значения уровня Ферми для меди в 7эВ, а тогда значения E_{F2} будет

7эВ + eV(эВ). Мною была создана программа в программном пакете Wolfram Mathematica. Результаты обсчета представлены на рис.9.

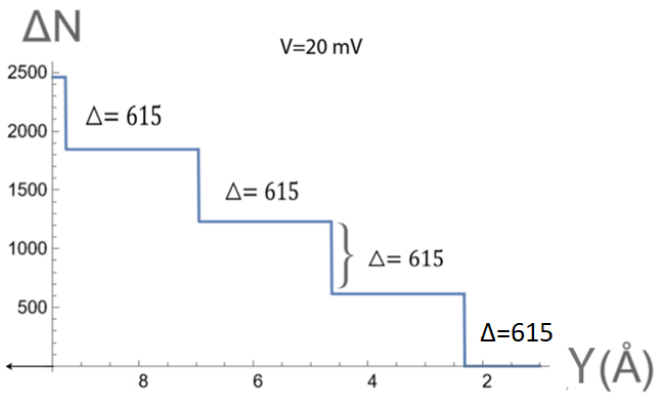

Рис. 9. Расчет в Wolfram Mathematica

Здесь по горизонтальной оси отложена длина линии контакта между проволочками Y, по вертикальной оси ΔN – количество энергетических уровней $E_{\text{полн.}_{n,k}}$, находящихся между уровнями Ферми. На этом графике наблюдается ожидаемая, то есть ступенчатая зависимость от длины контакта, подобная хорошим осциллограммам. Вертикальные скачки совпадают, что и оправдывает использование этой модели в качестве первого приближения для описания рассматриваемого явления.

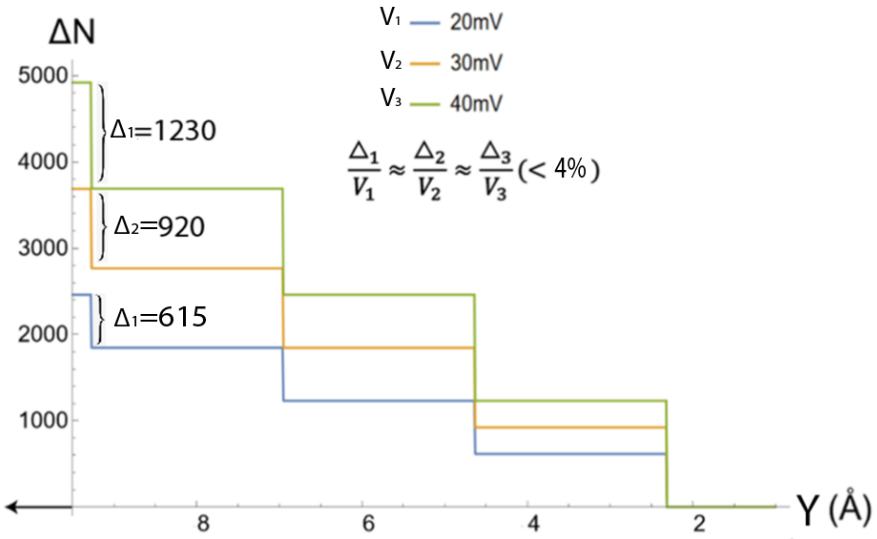

Рис. 10. Расчеты для трех напряжений на контакте

На рис.10 приведены аналогичные расчеты для трех напряжений на контакте. Из графика следует, что отношения высот вертикальных участков к отвечающим им напряжениям отличаются не более чем на три процента. Так как мы считаем ток пропорциональным количеству энергетических уровней $\triangle N$, то, по рассчитанной модели, можно утверждать, что скачки проводимости отличаются не более чем на три процента. То есть можно считать, что данная модель качественно описывает квантовое явление скачка проводимости при разрыве контакта.

Заключение

В работе были предложены, реализованы и исследованы четыре метода разрыва контакта проводников, сформулирован критерий дифференциации осциллограмм на хорошие и плохие и выбран наилучший из способов. Им оказался метод “Электризация” с использованием электрофорной машины. Доля хороших осциллограмм в этом методе составляла более 40% от общего числа осциллограмм.

В теоретической части была предложена упрощенная квантовомеханическая модель рассмотренного явления. В программном пакете Wolfram Mathematica написана программа расчета и построены графики зависимости $\triangle N$ от длины контактного участка проводников. Полученный результат ступенчатой зависимости позволяет утверждать о правильном качественном описании этого явления, совпадающем с экспериментальными осциллограммами со ступеньками скачков тока через контакт при его разрыве.