

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет  
Кафедра общей физики  
Першин Иван Дмитриевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование кондактанса микросужений в двумерных проводящих  
плёнках**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19309

**Научный руководитель:**

к. ф.-м. н. Похабов Д. А.  
Оценка научного руководителя:

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума:**

ассистент Краснопевцев С. Е.  
Оценка преподавателя практикума:

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к. т. н. Астрелин В. Т.  
Итоговая оценка:

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск, 2020

## **Аннотация**

В данной работе была поставлена задача исследования проводимости микроскопического сужения в двумерном проводнике и знакомства с методами её измерения. Для её решения была использована установка, работающая по принципу синхронного детектирования, и соответствующее ей программное обеспечение. Проводник был помещён в низкотемпературную среду (гелий при 4,2 К). Проводимость сужения регулировалась напряжением на управляющих затворах. Для определения проводимости была использована четырёхконтактная схема измерения. Были определены зависимости тока и напряжения на участке проводника, содержащем сужение, от затворного напряжения при приложении к образцу постоянного напряжения. По полученным данным были построены графики зависимости проводимости сужения и её производной по затворному напряжению от указанных напряжений. Было экспериментально обнаружено явление квантования кондактанса. Также была экспериментально определена ширина энергетической щели между одномерными подзонами размерного квантования. Выполнение данной работы позволило познакомиться с методом синхронного детектирования малых сигналов и полупроводниковыми наноструктурами.

Ключевые слова: проводимость микроскопического сужения, метод синхронного детектирования, низкотемпературный эксперимент, квантование кондактанса.

:

## **Оглавление**

1. Введение .....	4
2. Описание экспериментальной установки .....	5
3. Методика проведения эксперимента .....	6
4. Результаты, их обработка и анализ .....	9
5. Выводы .....	11
6. Список литературы .....	11

## 1. Введение

В данной работе стоит задача освоить методы измерения



Рис. 1. Схематическое изображение двумерной проводящей плёнки

электродинамических величин для объектов с характерным размером порядка нескольких сотен нанометров на примере исследования кондактанса микросужения в двумерной проводящей структуре. Кондактансом называется величина, обратная

сопротивлению. Изучаемая структура является проводящей плёнкой, состоящей из слоёв AlGaAs и GaAs. На границе раздела данных материалов, согласно [2], возникает тонкий проводящий слой – т. н. двумерный электронный газ. При помощи литографии на таком слое можно создать бороздки, отделяющие части плёнки друг от друга. Эти части образуют сужение с затворами. Приложение потенциалов к затворам позволяет управлять шириной сужения за счёт полевого эффекта. Ширина сужения составляет величину порядка 500 нм.

В соответствии с теорией, за счёт квантования в направлении, перпендикулярном направлению сужения, кондактанс подчиняется формуле:

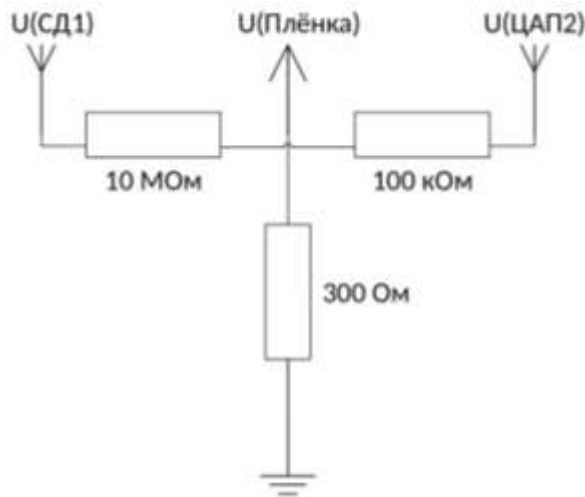
$$G = \frac{2e^2}{h} N, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $h$  – постоянная Планка,  $N$  – количество заполненных одномерных подзон, возникающих как результат размерного квантования, т. е. наблюдается эффект квантования кондактанса. Однако наблюдать это явление можно только при низкой температуре и малых токах. Исследованию этого явления в таких условиях и посвящена данная работа.

## 2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из:

- двумерного проводника, описанного во введении, установленного на



специальную подложку и помещѐнного внутри металлического кожуха для защиты от механических воздействий;

- сосуда Дьюара с гелием при температуре 4,2 К, куда погружен проводник;

- блока клемм, с помощью которых можно подключаться к клеммам подложки проводника;

- двух синхронных детекторов

(для измерения тока через проводник и напряжения на нём);

- делителя напряжения (с сопротивлениями 10 МОм, 100 кОм и 300 Ом;

- двух цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) для регулировки постоянной составляющей напряжения на проводнике и затворного напряжения;

- компьютера с программным обеспечением для управления ЦАП и снятия данных с синхронных детекторов.

На делителе напряжения переменное напряжение, подаваемое на проводник с синхронного детектора, подводится к сопротивлению 10 МОм и поэтому делится между сопротивлениями 10 МОм и 300 Ом в соотношении практически  $300:10000000 = 3:10^5$ . Поэтому на проводник подаѐтся  $3:10^5$  часть напряжения. Также на сопротивление 100 кОм подаѐтся постоянное напряжение с ЦАП 2, а на проводник подаѐтся практически  $3:10^3$  часть напряжения ЦАП.

Чтобы исключить погрешность при расчётах кондактанса, вызванную кондактансом контактов между подложкой и плёнкой, в эксперименте была использована 4-точечная схема измерения кондактанса:

$$G_{16,25} = \frac{I_{16}}{U_{25}}, \quad (2)$$

где  $I_{16}$  – ток, снимаемый с проводника на клеммах 1 и 6,  $U_{25}$  – напряжение на проводнике, снимаемое с клемм 2 и 5.

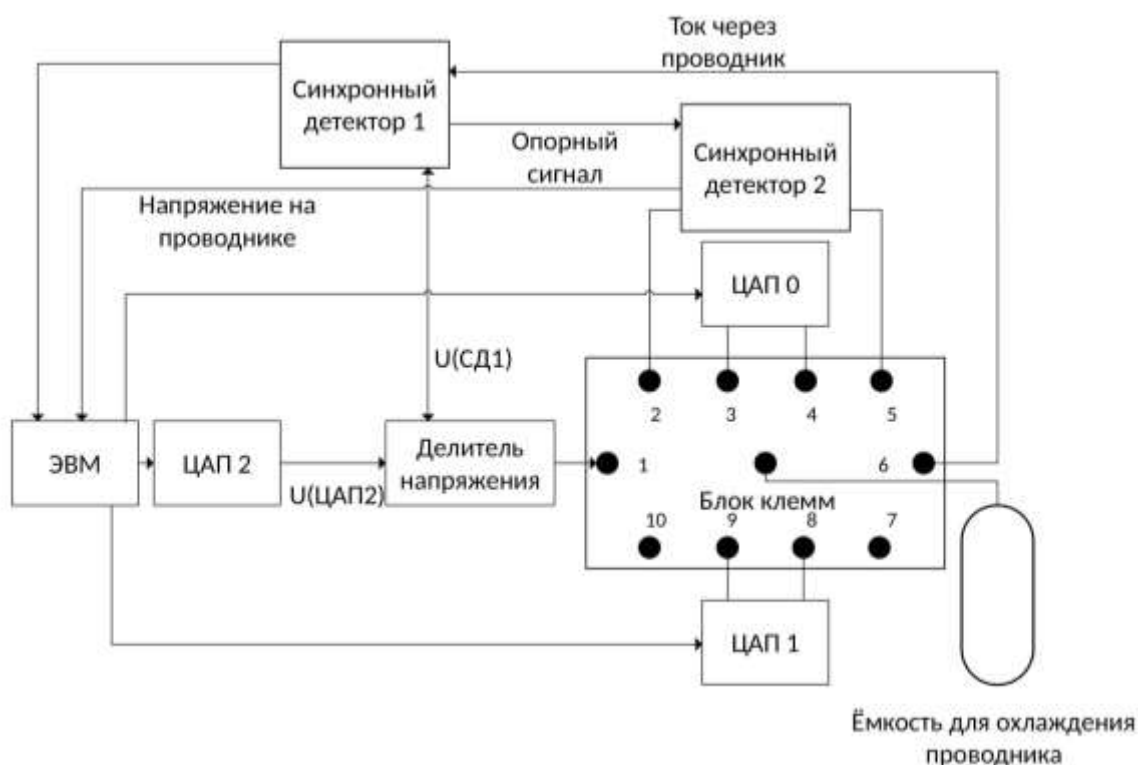


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

### 3. Методика проведения эксперимента

Для наблюдения интересующих нас эффектов, имеющих квантовую природу, необходима низкотемпературная среда. Это связано с тем, что разность энергий между подзонами размерного квантования в данной структуре достигает величины порядка 9 мэВ, тогда как характерная энергия частиц электронного газа при температуре порядка комнатной равна  $kT_{\text{комн}} \approx 26$  мэВ, где  $k$  – константа Больцмана, что не только равно разности, но и превышает её. Поэтому при комнатной температуре данные эффекты не

наблюдаются. При температуре порядка температуры кипения, например, азота эти эффекты также малы. Поэтому в качестве среды, куда был помещён

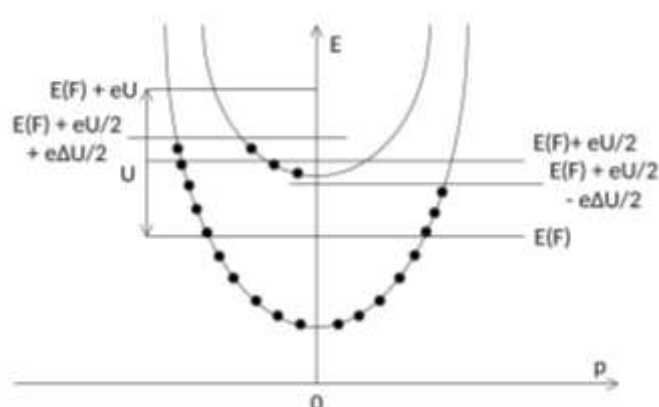


Рис. 4. Объяснение эффекта «нецелого» кондактанса.  $E_F$  – энергия уровня Ферми,  $U$  – постоянное напряжение,  $\Delta U$  – переменная добавка,  $p$  – импульс электрона в направлении сужения,  $e$  – заряд электрона

проводник, был выбран гелий при температуре 4,2 К.

Помимо этого, исследование должно было вестись при малых токах, протекающих через проводник. При прохождении большого тока проводник может сильно нагреться, что привнесёт вредные тепловые эффекты. Более того, согласно

[3], при определённом значении напряжения в прямом и обратном токах будет участвовать разное количество одномерных подзон. Вследствие симметрии проводника можно сказать, что на сужении потенциал равен  $U + \Delta U \cos(\omega t)$  (с учётом переменного напряжения). Некоторая часть переменного напряжения попадёт в область энергий, при которых электроны оказываются на  $N$  подзонах, остальная же часть – на  $(N - 1)$  подзонах. Это приведёт к «нецелому» значению кондактанса, как если бы электроны находились на  $(N - 1/2)$  подзонах, чего в реальности не происходит. В данной работе это явление можно обнаружить, подавая на плёнку некоторое дополнительное постоянное напряжение.

В связи с малостью измеряемых токов был использован прибор, работающий по принципу синхронного детектирования. Этот принцип заключается в выделении сигнала определённой частоты из набора сигналов, содержащего его, путём его умножения на опорный сигнал этой же частоты. Допустим, что сигнал на выходе из некоторой системы помимо шума содержит полезный сигнал  $A(t) = A_0 \cos(\omega_A t + \phi)$ , где  $A_0$ ,  $\omega_A$ ,  $\phi$  – амплитуда, частота и начальная фаза сигнала соответственно, т. е. является

гармоническим, а опорный сигнал  $B(t) = B_0 \cos(\omega_0 t)$ . Тогда сигнал после умножения равен

$$\begin{aligned}
 C(t) &= A_0 B_0 \cos(\omega_A t + \phi) \cos(\omega_0 t) \\
 &= A_0 B_0 (\cos(\omega_A t) \cos(\phi) - \sin(\omega_A t) \sin(\phi)) \cos(\omega_0 t) \\
 &= A_0 B_0 (\cos(\omega_A t) \cos(\omega_0 t) \cos(\phi) \\
 &\quad - \sin(\omega_A t) \cos(\omega_0 t) \sin(\phi)) \\
 &= \frac{A_0 B_0 \cos(\phi)}{2} (\cos((\omega_A - \omega_0)t) + \cos((\omega_A + \omega_0)t)) \\
 &\quad - \frac{A_0 B_0 \sin(\phi)}{2} (\sin((\omega_A + \omega_0)t) + \sin((\omega_A - \omega_0)t))
 \end{aligned} \tag{3}$$

При  $\omega_A = \omega_0$  значение сигнала после усреднения за промежуток времени  $T \gg 2\pi/\omega_0$ ,  $2\pi/\omega_A < C > = A_0 B_0 \cos(\phi)/2$ , тогда как при остальных значениях  $\omega_A$  среднее значение равно 0. Любой сигнал можно разложить на спектр гармонических сигналов. Таким образом, из набора шумов, амплитуда которых сравнима с амплитудой искомого сигнала, можно выделить набор гармонических сигналов и данным методом узнать амплитуду и фазу сигнала с нужной частотой. В данной работе, также как и на практике, вместо усреднения сигнала используется фильтрация умноженного сигнала в фильтре низких частот (ФНЧ).

Из схемы подключения приборов к проводнику можно заметить, что, помимо сопротивления сужения, к ним подключается сопротивление всей остальной части проводника. Поэтому нужно учесть поправку к сопротивлению сужения:

$$R_{\text{сужения}} + R = \frac{U}{I} \Rightarrow G = \frac{1}{R_{\text{сужения}}} = \frac{1}{\frac{U}{I} - R}, \tag{4}$$

где  $R$  – сопротивление остальной части проводника,  $U$  и  $I$  – напряжение и ток на проводнике. Ниже будет определена величина этой поправки.



Напряжение на одном из затворов  $U_G$  (на другом оно постоянно равно  $-6,5$  В) в течение эксперимента менялось в диапазоне от  $-6,5$  до  $-3$  В с шагом в  $0,01$  В, а постоянная составляющая напряжения, падающего на проводник, - от  $-15$  до  $15$  мВ с шагом  $0,3$  мВ (с учётом деления напряжения с ЦАП 2 на делителе).

#### 4. Результаты, их обработка и анализ

Данные, полученные при проведении эксперимента, можно найти в Приложении. Для их обработки и представления были выбраны программы OriginLab и Surfer.

По формуле (4) было вычислено значение кондактанса сужения  $G$ . Затем был построен график зависимости  $G/G_0$  от затворного напряжения  $U_G$  при

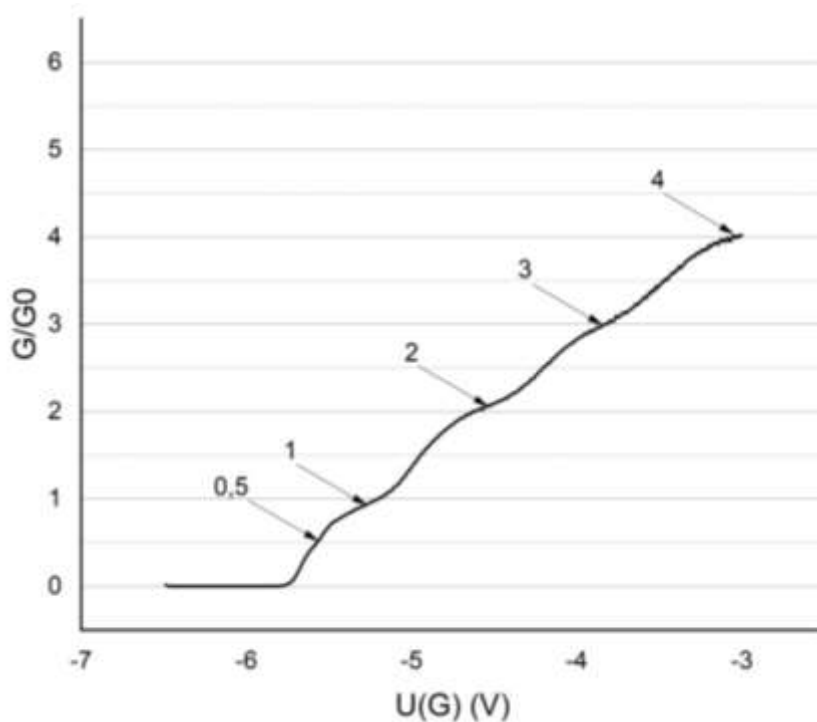


Рис. 5. График зависимости относительного кондактанса  $G/G_0$  от затворного напряжения  $U_G$  при отсутствии постоянного напряжения на проводнике  
изменении постоянной составляющей напряжения  $U_{SD}$ , где квант кондактанса

$$G_0 = \frac{2e^2}{h} \quad (5)$$

Значение поправки к сопротивлению сужения оказалось равно  $R \approx 1$  кОм. Относительно величины, обратной кванту кондактанса это составило  $G_0R \approx 7,7 * 10^{-2} = 7,7 \%$ , что можно считать систематической погрешностью.

Дальше был построен двумерный график производной  $G/G_0$  по напряжению на затворе  $U_G$ . Таким способом можно найти значения  $U_G$  и  $U_{SD}$ ,

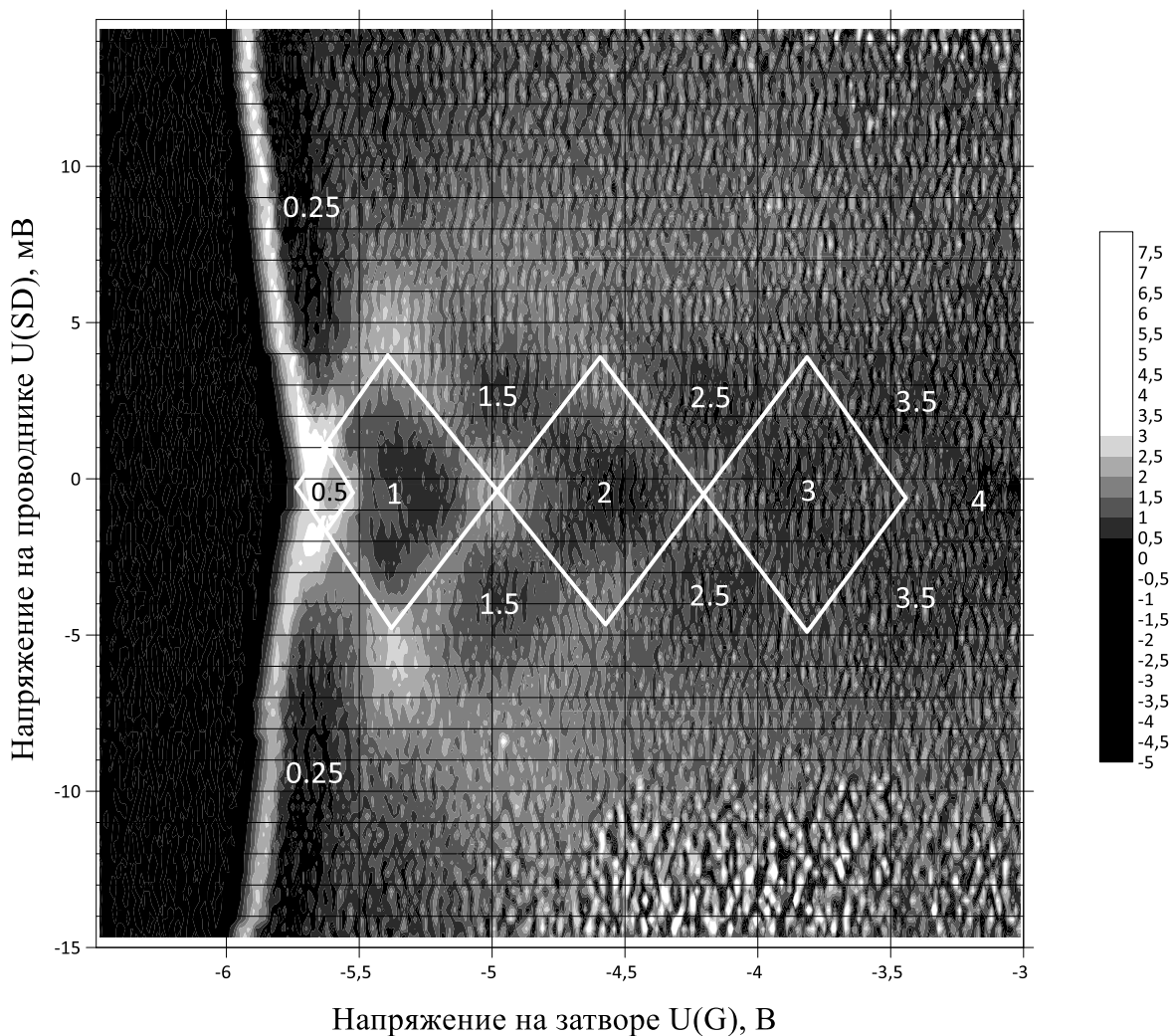


Рис. 6. Двумерный график зависимости относительного кондактанса  $G/G_0$  от затворного напряжения  $U_G$  и постоянной составляющей напряжения на плёнке  $U_{SD}$  в которых образуются ступени, т. к. в этих точках значение данной производной близко к 0. На этом графике, помимо найденных ранее значений кондактанса на ступенях, можно заметить ступень, соответствующую значению  $G = 4G_0$ ; ступени, соответствующие «нецелым» значениям кондактанса (объяснение этого факта – см. раздел «Методика проведения эксперимента»); две ступени, соответствующие значению  $G = 0,25G_0$ .

По данному графику можно определить ширину энергетической щели между одномерными подзонами размерного квантования, определив ширину ромба по  $U_{SD}$ , ограничивающего 1-ю ступень. Она составила около 9 мВ, что при пересчёте на один электрон даёт энергию  $\Delta E \approx 9$  мэВ.

## 5. Выводы

В результате выполнения данного эксперимента были освоены методы исследования электродинамических величин микроскопических объектов (в т. ч. метод синхронного детектирования). Была найдена ступенчатая зависимость кондактанса сужения от затворного напряжения, предсказанная теоретически. Также были найдены аномальные ступени, где кондактанс принимает значения  $0,25G_0$  и  $0,5G_0$ , где  $G_0$  – квант кондактанса. При помощи построения графика производной функции  $G(U_G, U_{SD})$  по затворному напряжению  $U_G$  ( $U_{SD}$  – постоянная составляющая напряжения) была определена ширина уровня Ферми.

## 6. Список литературы

1. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования. Киев: Выща школа, Головное изд-во, 1989 // 431 с.
2. Погосов А. Г. Кинетические явления в твердотельных электронных биллиардах, докторская диссертация, 2006.
3. Похабов Д. А. Квантовый транспорт в микросужениях и подвешенных квантовых точечных контактах на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, кандидатская диссертация, 2018.
4. Эдельман В. С. Вблизи абсолютного нуля // Библиотечка «Квант». 1983. Вып. 26. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы // 178 с.