

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Калачев Иван Владимирович

КУРСОВАЯ РАБОТА

Влияние тепловых шумов на измерение уровня дробового шума в вакуумном диоде

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19301

Научный руководитель:

Никишин Алексей Викторович

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью работы являлось определение влияния тепловых шумов на измерение заряда электрона по дробовому шуму. Для этой цели была собрана цепь, содержащая высокочастотный генератор, вакуумный диод, полосовой фильтр, усилитель и вольтметр среднеквадратичных значений. Измерения проводились вблизи резонансной частоты цепи. Был измерен вклад тепловых шумов в измерение заряда электрона по дробовому шуму. Выбрана оптимальная методика, оценены погрешности полученных величин.

Ключевые слова: тепловые шумы, дробовой шум, заряд электрона, резонансная частота.

Оглавление:

1. Введение 4
2. Описание экспериментальной установки 6
3. Методика 7
4. Результаты 8
5. Оценка погрешностей 9
6. Вывод 10
7. Литература 10

1. Введение

Дробовой шум – частный случай электрических флуктуаций — хаотических изменений потенциалов и токов в электрических цепях, обусловленных дискретностью электрических зарядов. Ток, протекающий в диоде – сумма токов от электронов. Число электронов, покидающих катод за одинаковые промежутки времени, флуктурует. Ток в вакуумном диоде флуктурует относительно среднего значения тока I ; очевидно, что величина этих флуктуаций должна зависеть от заряда электрона. Эти флуктуации называются дробовым шумом.

Флуктуации тока намного меньше его среднего значения, так как число электронов, протекающих через диод, велико; следовательно, флуктуации можно обнаружить лишь с помощью чувствительных усилителей.

Тепловой шум возникает в любом проводнике электрического тока, обладающем активным сопротивлением, и связан с хаотичным движением подвижных носителей заряда, в результате которого на концах проводника появляются флуктуации напряжения. Поскольку в цепи много элементов, которые могут быть источниками тепловых шумов: усилитель, резисторы и нагретый до высокой температуры катод диода; их влияние необходимо оценить отдельно.

2. Теоретическая часть

Так как число электронов велико, необходимо применять статистический подход. Согласно теории Шоттки, выражение для среднего квадрата флуктуаций тока I диода:

$\overline{\Delta I^2}_{др} = 2eI\Delta f$, где e — заряд электрона; Δf — полоса частот, в которой измеряются флуктуации тока.

Если нагрузкой диода служит сопротивление Z , то средний квадрат флуктуаций напряжения на нем равен:

$$\overline{\Delta U^2}_{др} = 2eI|Z|^2\Delta f, \text{ где } |Z| \text{ — модуль комплексного сопротивления.}$$

Спектр шума на сопротивлении нагрузки определяется зависимостью величины $|Z|^2$ от частоты. Очевидно, что для увеличения точности измерений надо выбрать $|Z|^2$ таким, чтобы он был как можно больше. Для этого выбираем в качестве нагрузки параллельный колебательный контур. Для LCR — контура, зависимость комплексного сопротивления от частоты имеет вид $Z(\omega) = \frac{(R+i\omega L)}{1-\omega^2 LC+i\omega RC}$. Если такой контур служит нагрузкой вакуумного диода, напряжение шумов на нем равно:

$$\Delta U^2_{др} = 2eI \int_0^\infty |Z(f)|^2 df = \frac{2eI}{2\pi} \int_0^\infty |Z(\omega)|^2 d\omega.$$

Это выражение используется для определения заряда электрона.

$$e = \frac{2\omega_0 C^2 \langle U^2_{др} \rangle}{IQ}$$

Тепловой шум вносит вклад в измерения $\langle U^2_{др} \rangle$. Поэтому необходимо устремить анодный ток к нулю, чтобы исключить дробовой шум и оставить только тепловую составляющую.

3. Описание экспериментальной установки

Схема установки изображена на рис.1(а). Принцип работы схемы следующий: дробовой шум создается в диоде при флуктуациях количества вылетевших с катода электронов. Полосовой фильтр (рис.1(б)) служит для пропускания сигнала в заданной полосе частот. Тем самым достигается отсев всех низкочастотных и высокочастотных наводок, а так же регистрация сигнала в области, где его спектральная плотность постоянна и не зависит от частоты. Конденсатор служит для того, чтобы отрезать постоянную составляющую анодного тока. Далее стоит усилитель, поскольку величина шумового напряжения мала. Также в схему включены измеритель анодного тока, частотомер, вольтметр среднеквадратичных значений и регулятор величины анодного тока.

Схема экранирована от наводок и помещена в металлический корпус. Однако элементы цепи порождают тепловые шумы, влияние которых предстоит оценить.

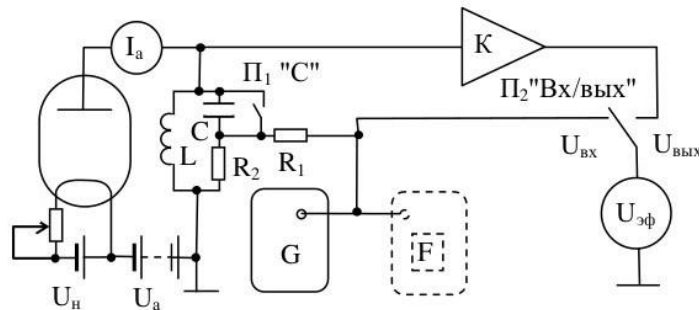


Рис.1а. Схема установки

I_a – встроенный миллиамперметр, G – генератор, F – частотомер
 $U_{эф}$ – вольтметр переменного напряжения.

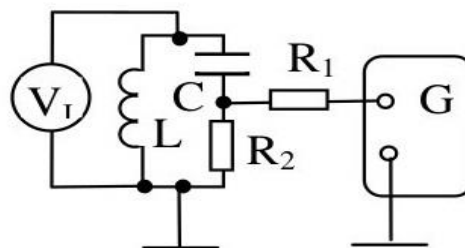


Рис. 1б Полосовой фильтр

4. Методика

Измерения проводились при анодных токах от 1 до 4 мА. Для каждого значения тока были измерены добротности контура и среднеквадратичные напряжения. Была построена зависимость среднеквадратичного напряжения от величины IQ , где I – величина анодного тока, Q – добротность контура при соответствующем значении анодного тока.

Эксперимент по определению заряда электрона по дробовому шуму был проведен следующим образом:

1. Определялся коэффициент усиления операционного усилителя.
2. Была найдена резонансная частота колебательного контура и определена его добротность.
3. Проводилась регистрация среднего значения напряжения на выходе устройства в зависимости от тока через лампу. Измерения проводились при анодных токах от 1 до 4 мА.
4. При устремлении анодного тока к нулю было определено шумовое напряжение, которое впоследствии было учтено при измерении заряда электрона

5. Результаты:

Данные, которые содержат ток через диод, и среднеквадратичное значение напряжения представлены в таблице 1. Также там показаны значения добротности для разных значений тока.

Таблица 1.

I, mA	Q	U, mV	IQ	U ² , mV ²
1	120	1,4	0,12	0,006399408
2	84	1,8	0,168	0,008292899
3	64	2,1	0,192	0,010023669
4	52	2,2	0,208	0,010659763

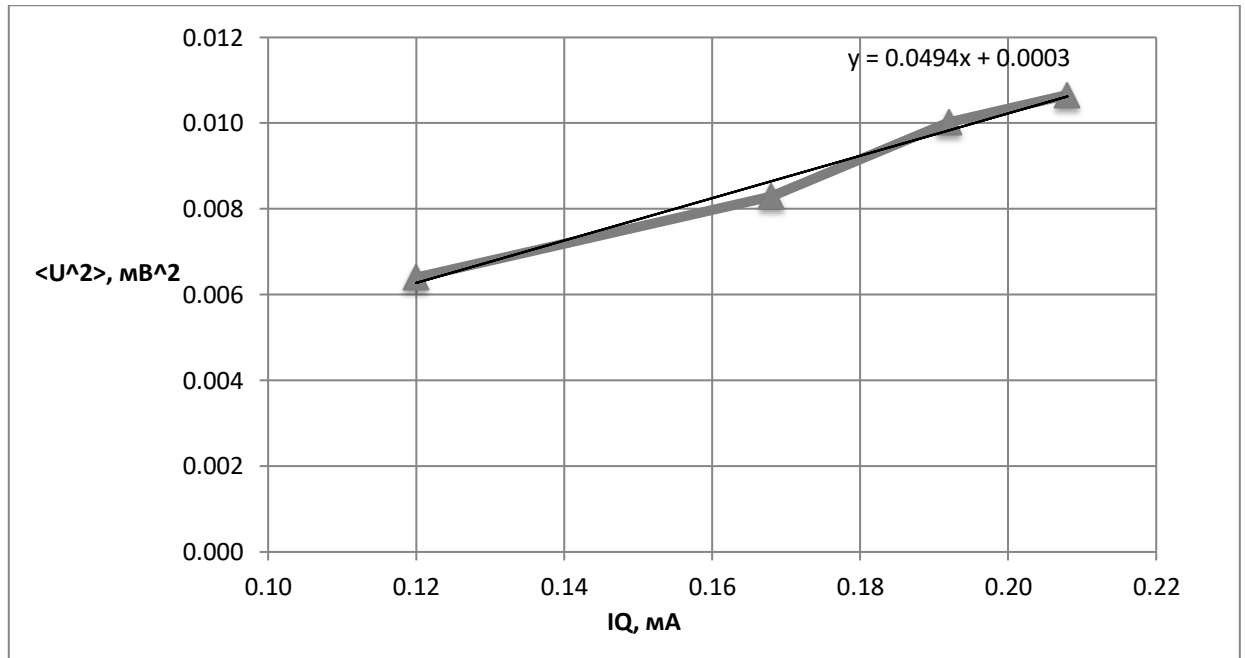


Рисунок 2.1 Зависимость среднего значения квадрата напряжения (U^2) от параметра IQ . (тепловой шум не исключён)

Для нахождения шумового напряжения, продолжу линейно график зависимости U^2 (IQ), устремив анодный ток к нулю. Получил, что шумовое напряжение равно $U_{ш} \approx 0,00033 \text{ мВ}^2$, что составляет не более 5,5% от общего напряжения. В среднем, вклад шумового напряжения около 4% от общего. Следует учесть это при нахождении заряда электрона.

Для определения заряда электрона также были использованы следующие данные:

Резонансная частота контура $f = 47,8 \pm 2 \text{ kHz}$

Емкость конденсатора контура $C = 3 \pm 0.3 \text{ nF}$

Коэффициент наклона графика $\langle U \rangle(IQ)$ $k = 0.049$

Соответственно, заряд электрона составил

$$e = 4\pi f_0 C^2 k \approx 2.6 * 10^{-19} \text{ Кл}$$

6. Оценка погрешности измерений

1. Погрешность измерения напряжения – $\pm 3\%$
2. Погрешность измерения тока – $\pm 0.2 \text{ mA}$.
3. Погрешность определения емкости конденсатора – 10% .
4. Погрешность измерения частоты – $\pm 2 \text{ kHz}$
5. Средний вклад тепловых шумов – 4%

$$\Delta e = e \sqrt{\left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + 2\left(\frac{U_{ш}}{U}\right)^2} \approx 0,5 * 10^{-19} \text{ Кл}$$

7. Вывод

В ходе работы был изучен метод определения заряда электрона по дробовому эффекту. Значение заряда, определенное экспериментально, составило: $2.6 * 10^{-19} \pm 0,5 * 10^{-19}$ Кл.

Причиной того, что полученное значение завышено относительно табличных данных, может служить неточное определение коэффициента усиления операционного усилителя или наличие других посторонних шумов, вносящих ошибку в измерение напряжения на диоде. Также было показано, что тепловые шумы, присутствующие в элементах цепи дают небольшой вклад в измерения, поскольку полосовой фильтр отсеивает большинство наводок и сигналов, связанных с тепловым шумом.

8. Литература

1. Зайдель А. Н. Погрешности измерения физических величин. Л.: Наука, 1985.
2. А. ван дер Зил. Шумы при измерениях. М.: Мир, 1979.
3. В. Т. Астрелин, П. П. Дейчули, А. А. Краснов, В. В. Кубарев, Л. Н. Смирных, Ю. В. Шестаков. Лабораторный практикум "Электричество и магнетизм". Выпуск 2. Физические явления в вакуумном диоде.