

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Базовая кафедра
компьютерной физики и
метаматериалов физического
факультета СГУ в СФ ИРЭ
имени В.А. Котельникова РАН

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ
ТРЕХУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ НЕОДНОРОДНОГО ЭМИТТЕРА И УРОВЕНЬ ШУМА

студентки 4 курса 431 группы

направления 03.03.02 «Физика» физического факультета

Мироненко Ксении Витальевны

Научный руководитель: Шаповалов А.С.

Зав. Кафедрой: Аникин В.М.

Содержание

Введение

1 Обзор источников шумов в электронных приборах

1.1 Дробовой шум

1.2 Тепловой шум

1.3. Генерационно-рекомбинационный шум

1.4 Фликер-шум

1.5 Аномальный дробовой шум

2 Расчет влияния неоднородности эмиссионных состояний на уровень флуктуаций тока на примере трехуровневых моделей нерегулярного эмиттера

2.1 Симметричная модель

2.2 Асимметричная модель

Заключение

Список использованных источников

Приложение А

Приложение Б

Приложение В

Приложение Г

ВВЕДЕНИЕ.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования [1-10] шумовые свойства катодов вакуумных электронных приборов существенным образом зависят от степени неоднородности эмиттеров: геометрической (шероховатость эмитирующей поверхности), эмиссионной (зависимость эмиссионной способности от координат или параметров состояния катода), кинетической (зависимость плотности распределения скорости эмиттированных электронов от координат эмитирующего центра) и т.д.

Одним из важных типов неоднородности катода является неоднородность эмиссионного состояния. Она заключается в том, что катод может иметь не одно, а множество эмиссионных состояний, каждому из которых соответствует своё значение параметра интенсивности эмиссии. Под этим параметром будем понимать условное среднее число электронов, эмиттированных в единицу времени при условии, что катод находится в соответствующем эмиссионном состоянии. Таким образом, это параметр, характеризующий определенный тип возможного эмиссионного состояния.

Величина параметра интенсивности эмиссии определяется множеством физических процессов: отравления эмиттированных центров, оседание атомов остаточных газов на поверхность катода и т.д.. В условиях непрерывного протекания этих процессов значения параметра интенсивности нельзя предсказать, а это означает, что для реального эмиттера параметр интенсивности представляет собой случайную величину. В работах [5-8] показано, что непрерывная смена эмиссионных катодных состояний за счёт указанных выше процессов приводит к возникновению дополнительной компоненты дробового шума, которая была названа аномальным дробовым шумом. Вследствие появления этой компоненты полный уровень дробового шума может значительно превышать уровень, предсказываемый формулой Шоттки.

Аномальная компонента дробового шума имеет много общего с фликкер-шумом. Исследования частотной зависимости спектральной плотности аномальной компоненты показали [5,7], что она подобна аналогичной кривой для

фликкер-шума, то есть снижение спектральной плотности, по мере уменьшения частоты, пропорционально величине $1/f^\alpha$, где $\alpha = \text{const}$ [11-14]. Это означает, что физический механизм генерации фликкер-шума возможно включает в себя и те физические процессы, которые вызывают аномальный дробовой шум. Вместе с тем аномальный дробовой шум имеет и принципиальные отличия от фликкер-шума. Ширина спектра фликкер-шума невелика и, обычно, не превышает нескольких десятков килогерц. При дальнейшем увеличении частоты фликкер-шум по уровню значительно ниже дробового, то есть маскируется дробовым шумом. Касательно аномальной компоненты дробового шума, ширина ее спектра значительно выше и по порядку величины равна I_0/e (I_0 – постоянная составляющая тока, e – заряд электрона). В указанный диапазон частот попадают практически все частоты, используемые в радиофизике и электронике (исключения составляют слаботочные приборы) [5,6].

Для уточнения физической природы и механизма дополнительных источников шума, в том числе аномального дробового шума, фликкер-шума, а также для объяснения экспериментальных результатов исследования шумовых свойств приборов, разработки методов снижения собственных шумов устройств представляется актуальным статистическое моделирование неоднородности эмиссионных состояний и расчет уровня аномальных дробовых шумов на его основе. Естественно, большой практический интерес представляет теоретическое исследование и объяснение природы и уровня аномального дробового шума на низких частотах, то есть в той области частот, где его свойства подобны свойствам фликкер-шума, природа которого до сих пор не разгадана. Для этого необходима разработка таких моделей неоднородного эмиттера, которые характеризуются небольшим числом эмиссионных состояний. Именно в этом случае расчетные соотношения для уровней шумов наиболее просты, наглядны и удобны для практического использования.

В связи с этим, перед данной выпускной квалификационной работой была поставлена задача по расчету уровня аномального дробового шума в низкочастотных областях его спектра для трехуровневых статистических моделей

неоднородного эмиттера, которым отвечает симметричное и асимметричное распределение параметра интенсивности эмиссии. Поскольку данные о частотной зависимости спектральной плотности аномального дробового шума для подобных моделей эмиттера приведены в [5,7], дополнительные исследования указанной зависимости в данной работе не проводятся.

Асимметричная модель

В данном параграфе рассмотрим асимметричную модель эмиттера с тремя возможными эмиссионными состояниями, которой соответствует гиперэкспоненциальный закон распределения интервала τ . Аналогично с симметричной моделью введем среднее значение параметра интенсивности λ_0 «нормального» состояния, λ_p , соответствующее «пассивному» состоянию эмиттера и λ_a – «активному» состоянию. В таком случае плотность распределения интервала времени τ запишется в виде (2.2.1).

$$\varphi \tau = p_a \lambda_a e^{-\lambda_a \tau} + p_n \lambda_0 e^{-\lambda_0 \tau} + p_p \lambda_p e^{-\lambda_p \tau}, \quad (2.2.1)$$

где p_n, p_a, p_p – вероятности реализаций параметров интенсивности $\lambda_0, \lambda_a, \lambda_p$ соответственно.

Параметры $\lambda_0, \lambda_a, \lambda_p$ и p_n, p_a, p_p связаны очевидным соотношением:

$$\lambda_0 = \lambda_a p_a + \lambda_0 p_n + \lambda_p p_p \quad (2.2.2)$$

В отличие от симметричной модели, в асимметричной появляется необходимость ввести еще один параметр s , характеризующий асимметрию распределения параметра интенсивности эмиссии. Он определяет смещение интервала параметра интенсивности $\Delta\lambda$ относительно среднего значения λ_0 . Учитывая тот факт, что λ_0 не совпадает с центром интервала $\Delta\lambda$, введем интервалы $\Delta\lambda_a$ и $\Delta\lambda_p$, определяющиеся выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_a &= \lambda_a - \lambda_0, \\ \Delta\lambda_p &= \lambda_0 - \lambda_p. \end{aligned} \quad (2.2.3)$$

Параметр асимметрии s запишется следующим образом:

$$s = \frac{\Delta\lambda_a}{\Delta\lambda_p}. \quad (2.2.4)$$

Частным случаем асимметричной модели является случай, где $s = 1$, что соответствует симметричной модели.

На ряду с параметром асимметрии, степень неоднородности эмиссионных состояний по-прежнему будем характеризовать параметром q , который определяется отношением половины ширины интервала параметра интенсивности

к среднему значению λ_0 . В принятых обозначениях параметр неоднородности q определяется выражением:

$$q = \frac{\Delta\lambda_a + \Delta\lambda_p}{2\lambda_0}. \quad (2.2.5)$$

Важно отметить, что для рассматриваемой модели ограничения на пределы изменений ее параметров приобретают другой вид. Теперь, из естественного требования корректности модели

$$\Delta\lambda_p < \lambda_0, \quad (2.2.6)$$

не следует ограничение $q < 1$. Согласно выражению (2.2.5) величина q может и превышать 1 за счет первого слагаемого правой части указанного соотношения. В то же время, требование (2.2.6) приводит к ограничению величины параметра асимметрии s . Действительно, из соотношений (2.2.5) следует

$$\Delta\lambda_p = \frac{2q\lambda_0}{1+s} \quad (2.2.7)$$

Подставляя (2.2.7) в (2.2.6) получаем соотношение:

$$s > 2q - 1 \quad (2.2.8)$$

Параметр асимметрии может принимать не любые значения, а только те, которые удовлетворяют условию (2.2.8).

Учитывая этот факт и выражение (2.2.2) плотность распределения интервала (2.2.1) запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi(\tau) = & \frac{1-p_H}{1+s} \frac{\lambda_0}{1+s+2sq} e^{-\lambda_0 \frac{1+s+2sq}{1+s} \tau} + p_H \lambda_0 e^{-\lambda_0 \tau} + \\ & + \frac{(1-p_H)s\lambda_0(1+s-2q)}{1+s} e^{-\lambda_0 \frac{(1+s-2q)}{1+s} \tau}. \end{aligned} \quad (2.2.9)$$

На основании (2.2.9) получим выражения для среднего значения интервала τ и среднего значения τ^2 .

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{\lambda_0} p_H + (1-p_H) \frac{1}{1+s+2sq} + \frac{s}{1+s-2q} \\ \tau^2 &= \frac{2}{\lambda_0^2} p_H + (1-p_H)(1+s) \frac{1}{(1+s+2sq)^2} + \frac{s}{(1+s-2q)^2} \end{aligned}$$

Выражение для квадрата коэффициента вариации записывается следующим образом:

$$\gamma = \nu^2 = -1 + \frac{\tau^2}{\tau^2}. \quad (2.2.10)$$

Подставив в выражение (2.2.10) значения среднего значения интервала τ и среднего значения τ^2 получим формулу, описывающую квадрат коэффициента вариации для асимметричной модели:

$$\gamma = \nu^2$$

$$= -1 + \frac{2 p_n + 1 - p_n \quad 1 + s \quad \frac{1}{1 + s + 2sq} + \frac{s}{1 + s - 2q}}{p_n + 1 - p_n \quad \frac{1}{1 + s + 2sq} + \frac{s}{1 + s - 2q}} \quad (2.2.11)$$

Полученное выражение (2.2.11), как уже было сказано, описывает квадрат коэффициента вариации и, следовательно, уровень шума в области низких частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенного исследования была выполнена следующая работа, позволившая существенно дополнить физические представления о природе аномального дробового шума, статистическом механизме его возникновения, возможных числовых характеристиках его уровня.

Для возможности сравнения параметров аномального дробового шума с аналогичными величинами других источников флуктуаций проведен краткий обзор известных механизмов генерации шумов в электронных приборах. К ним относятся дробовой шум, тепловой шум, генерационно-рекомбинационный шум, фликкер-шум.

Основные результаты, обладающие новизной, получены на трехуровневых статистических моделях неоднородного эмиттера: симметричной и асимметричной. Симметричная модель уже описывалась ранее, а асимметричная – впервые представлена и использована в данной работе.

Важным результатом дополнительного анализа симметричной модели неоднородного эмиттера является определение такой связи ее параметров (q , p_1), при которой уровень аномального дробового шума максимален. При этом его величина неограниченно возрастает по мере приближения параметра неоднородности q к его предельно допустимому значению. Возможность возникновения чрезвычайно высоких уровней аномального дробового шума позволяет предположить, что неоднородность эмиттера (эффект смены эмиссионных состояний) является одной из причин генерации фликкер-шума.

Для исследования вклада отдельных эмиссионных состояний в уровень аномального дробового шума была разработана специальная асимметричная модель неоднородного эмиттера, в рамках которой математическое ожидание параметра интенсивности эмиссии остается неизменным, но величины и вероятности этого параметра для «активных» и «пассивных» состояний

могут изменяться. Предварительные исследования показали, что основной вклад в уровень аномального дробового шума вносят «активные» состояния.

Естественно, что трехуровневая асимметричная модель, так же, как и ее частный случай – симметричная модель, при определенной связи параметров, предсказывает появление чрезвычайно высоких уровней аномального дробового шума, что характерно для фликкер-шума.

Вышесказанное позволяет утверждать, что неоднородность эмиссионных состояний катода и их смена могут являться одной из причин высоких и аномально высоких шумов реальных эмиттеров. Это обстоятельство должно учитываться при объяснении экспериментальных результатов исследования шумов и разработке технологий изготовления реальных катодов.

Естественной практической рекомендацией по снижению шумов в реальных эмиттерах является обеспечение максимально возможной однородности эмиссионных состояний эмиттера (уменьшение параметра q). Дальнейшее снижение шума (при минимизированном значении q) возможно за счет уменьшения вероятности высокоактивных состояний.

Список использованных источников

1. Ахманов С.А. Статистическая радиофизика и оптика. Случайные колебания и волны в линейных системах/ С.А. Ахманов, Ю.Е. Дьяков, А.С. Чиркин. М.: Физматлит, 2010.
2. Шаповалов А.С. Вероятностные расчёты в физике/ А.С. Шаповалов. С.: Саратов. 2015.
3. Якубов В.П. Статистическая радиофизика/ В.П. Якубов. Изд-во ТГУ. 2003.
4. Букингем, М. Шумы в электронных приборах и системах/ М. Букингем. М.: Мир, 1986. 398с.
5. Шаповалов, А.С. Эмиссионные и шумовые свойства неоднородных эмиттеров/ А.С. Шаповалов, А.Ф. Голубенцев, Ю.И. Денисов. С.: Издательство Саратовского университета, 1983. 90с.
6. Шаповалов А.С. Статистический механизм возникновения аномальных дробовых шумов в потоках носителей заряда/ А.С. Шаповалов, Ю.И. Денисов. Изв. Вузов. Радиолекtronика. Т.28, №5, 1985. с.88.
7. Инкин М.Г., Мироненко К.В., Минкин Л.М., Шаповалов А.С. Частотные характеристики аномального дробового шума для трехуровневой симметричной модели неоднородного эмиттера/Вопросы прикладной физики выпуск №22 С.: Изд. Саратовского университета, 2015. с.48-51
8. Мироненко К.В., Инкин М.Г., Минкин Л.М., Шаповалов А.С. Энергетические характеристики аномального дробового шума для трехуровневой симметричной модели неоднородного эмиттера/Вопросы прикладной физики выпуск №22 С.: Изд. Саратовского университета, 2015. с.52-53
9. Набоков Ю.И. Об аномальном дробовом эффекте в приборах с оксидным катодом/ Ю.И. Набоков, В.Е. Авдеев. Известия АН СССР Сер. Физическая. Т.33, №3, 1960. с.452-457.

10. Попов А.И. О возможном механизме аномально высоких дробовых шумов в ПУЛ/ А.И. Попов, Д.Е. Колпаков. Электронная техника. Сер. 5. Приемно-усилительные лампы, В.1, 1971. с.35-42.
11. Малахов, А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах/ А.Н. Малахов. М.: Наука, 1968. 660с.
12. Шумы в электронных приборах. Под ред. Л.Д. Смуллина и Г.А. Хауса. М.-Л.: Энергия. 1964.
13. Лукьянчикова Н.Б. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах/ Н.Б. Лукьянчикова. М.: Радио и связь. 1990.
14. Жалуд В. Шумы в полупроводниковых устройствах/ В. Жалуд , В.Кулешов. М.: Сов. Радио, 1977.
15. Робинсон, Ф.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях/ Ф.Н.Х. Робинсон. М.: Атомиздат, 1980. 225с.
16. Давенпорт В.Б. Введение в теорию случайных сигналов и шумов/ В.Б. Давенпорт, В.Л. Рут. М.: ИЛ, 1960. 467с.
17. Голубенцев А.Ф. Введение в статистическую электронику/ А.Ф. Голубенцев, Ю.И. Денисов, Л.М Минкин. С.: Изд. СГУ, 1990. 126с.
18. Отт, Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах/ Г. Отт. М.: Мир, 1979. 317с.
19. Херринг К. Термоэлектронная эмиссия/ К. Херринг, М. Никольс. М.: ИЛ, 1950. 260с.
20. Добрецов Л.Н. Эмиссионная электроника/ Л.Н. Добрецов, М.В. Гомоюнова. М.: Наука, 1966.
21. Герман Г. Оксидный катод/ Г. Герман, С. Вагенер. М.,Л.: Гостехиздат, 1949.
22. Мойжес Б.Я. Физические процессы в оксидном катоде/ Б.Я. Мойжес. М.: Наука, 1968.
23. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций/ А.А. Свешников. М.: Наука, 1968.

24. Кокс, Л. Теория восстановления/ Л. Кокс, У. Смит. М.: Сов. Радио, 1967. 299с.
25. Харкевич А.А. Спектры и анализ/ А.А. Харкевич. М.: Физматгиз, 1962. 236с.

