

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра компьютерной физики и метаматериалов  
на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН

**ПРОБЛЕМА СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ  
АНОМАЛЬНОГО ДРОБОВОГО ШУМА**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 4022 группы  
направления 03.03.02 «Физика» института физики

Шаповалова Александра Степановича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

В.В. Машников

---

31.05.2021

Заведующий кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

В.М. Аникин

---

31.05.2021

Саратов 2021

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Проблема снижения уровня аномального дробового шума (АДШ) относится к числу актуальных проблем современной радиофизики и электроники, так как дробовые флуктуации тока, генерируемые на потенциальных барьерах, являются одним из основных источников собственных шумов вакуумных и твердотельных электронных приборов [1-9]. В электровакуумных приборах подобные барьеры имеются на поверхности катодов, в полупроводниковых приборах - на границе раздела полупроводников с различным типом проводимости.

Проблема собственных шумов электронных приборов уже многие годы не теряет своей актуальности [1,2], так как требования к таким параметрам как чувствительность, стабильность работы, надёжность и др., всё время возрастают. Так, например, при создании современных стандартов частоты и времени обеспечиваются столь низкие уровни флуктуаций, что точность хода часов, основанных на таких стандартах, составляет 1 мкс за 3 года [2]. В наноэлектронике шумами ограничивается минимальный размер элементов электронного устройства. Шумы ограничивают плотность записи информации записывающих устройств [1].

В настоящее время достигнуты столь малые уровни флуктуаций выходного сигнала электронных устройств, что их дальнейшее снижение стало невозможным без учета всех дополнительных факторов, ведущих к увеличению интенсивности собственных шумов. К таким факторам, прежде всего, относится фактор неоднородности области генерации шума. Для дробовых шумов это область потенциального барьера.

Классическая теория, разработанная Шоттки, объясняет дробовой шум достаточно полно [4], но это относится только к однородным потенциальным барьерам. Реальные барьеры, в частности эмиттер электронов (катод), всегда неоднородны [10], и, как показывают экспериментальные исследования [11-14], уровень дробовых шумов в таких системах может на один и даже два порядка превышать величину, определяемую формулой Шоттки. Авторы первых работ [12,14] в этом направлении назвали подобный шум аномальным дробовым шумом (АДШ).

Видов неоднородности реальных барьеров достаточно много [15], однако определяющая роль в генерации АДШ принадлежит специфическому типу неоднородности, а именно - неоднородности физико-химических состояний барьера, которые непрерывно сменяют друг друга. Указанные состояния характеризуются различными значениями параметра интенсивности  $\lambda$  переходов частиц через барьер. Непрерывная смена состояний рандомизирует параметр интенсивности  $\lambda$ , т. е. придаёт ему случайный характер.

Применительно к катодам указанный параметр является параметром интенсивности эмиссии электронов и определяется как условное математическое ожидание числа электронов, эмитируемых за единичный интервал времени при условии, что эмиттер находится в данном эмиссионном состоянии.

С формальной точки зрения прохождение зарядов через потенциальный барьер полупроводникового устройства также можно рассматривать как их эмиссию через барьер, а его состояния, характеризуемые различными значениями параметра интенсивности переходов  $\lambda$ , рассматривать как различные эмиссионные состояния. Это обстоятельство позволяет пользоваться единой терминологией при анализе дробовых шумов и на катоде вакуумного прибора, и на потенциальном барьере полупроводникового устройства.

На оксидном катоде возникновение и смена различных эмиссионных состояний порождаются такими процессами, как испарение избыточных атомов бария, отравление оксидного слоя вследствие химических реакций свободного бария с атомами остаточных газов в приборе и т.д. В полупроводниковых приборах к подобным процессам относятся диффузия носителей заряда, формирующая потенциальный барьер, флуктуации скорости диффузии, генерация и рекомбинация носителей и т.д.

Основные теоретические исследования шумовых свойств неоднородных потенциальных барьеров, в частности дробовых флуктуаций тока, проводятся методами статистического моделирования подобных систем [15-24]. Поэтому разработка соответствующих статистических моделей неоднородных барьеров представляет значительный практический интерес. Использование таких моделей позволяет рассчитать спектр дробового шума при заданной степени неоднородности эмиссионных состояний, выяснить законы распределения параметра интенсивности, которым при прочих равных условиях соответствуют наиболее высокие или наиболее низкие уровни дробового шума. Эта информация важна для объяснения экспериментальных данных о шумовых свойствах электронных приборов, прогнозирования величины их шумовых параметров, совершенствования технологии их изготовления и т.д.

Как показывают исследования [15], непрерывная смена эмиссионных состояний неоднородного барьера приводит к возникновению на таком барьере дополнительно к классической компоненте дробового шума (компоненте Шоттки) ещё одной составляющей. Именно она, накладываясь на классическую компоненту, приводит к увеличению уровня полного дробового шума по сравнению с величиной, определяемой формулой Шоттки (уровнем Шоттки). Составляющую, обусловленную сменой эмиссионных состояний, называют аномальной компонентой дробового шума (АКДШ). Она принципиально отличается от классической компоненты и по физическому механизму генерации, и по спектральным характеристикам. Классическая компонента возникает вследствие случайного характера эмиссии отдельных электронов, аномальная компонента возникает вследствие случайного характера смены эмиссионных состояний. Спектр классической компоненты при пренебрежимо малом времени пролёта электрона в приборе равномерный (белый шум). Спектральная плотность аномальной компоненты зависит от частоты. Поскольку полный дробовой шум неоднородного барьера всегда содержит аномальную компоненту, его также называют аномальным. Однако превышение его уровня над уровнем Шоттки вызывается только наличием аномальной компоненты.

Проблема влияния неоднородности системы на уровень генерируемого дробового шума до последнего времени остаётся изученной не в полной мере [16]. Исследование особенностей и возможных пределов изменения уровня АДШ, методов его подавления требует разработки новых и модификации существующих статистических моделей неоднородных потенциальных барьеров.

В связи с этим вопросы, поставленные перед выпускной квалификационной работой (ВКР),

**разработка различных модификаций известных статистических моделей неоднородных потенциальных барьеров и выяснение на их основе принципиальной возможности снижения уровня генерируемого аномального дробового шума,**

носят актуальный характер.

В дальнейшем для определённости предполагается, что рассматриваемый барьер находится на поверхности неоднородного эмиттера электронов (катода), однако результаты носят общий характер.

**Цель и основные задачи работы.** Основная цель работы заключается в определении таких законов распределения параметра интенсивности эмиссии систем, которые ведут к уменьшению уровня генерируемого АДШ. Это позволит указать направления развития технологии изготовления электронных устройств, обеспечивающие не только однородность систем, но и оптимальный вид закона распределения параметра интенсивности эмиссии.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие конкретные задачи:

1. Разрабатываются различные модификации известных (базовых) статистических моделей неоднородных эмиттеров, отличающиеся тем, что уровень их аномального дробового шума зависит не только от параметра неоднородности системы, но и от дополнительного параметра, характеризующего особенности плотности распределения параметра интенсивности  $\lambda$ .

2. Определяется уровень аномального дробового шума разработанных модификаций и выясняется возможность его подавления

3. Определяются коэффициенты подавления аномального дробового шума.

**Научная новизна.** В ВКР впервые:

1. Разработаны двухпараметрические модификации непрерывных статистических моделей неоднородных эмиттеров, в рамках которых наблюдается эффект подавления аномального шума за счёт реализации соответствующего закона распределения параметра интенсивности эмиссии. Так, в линейной модификации с положительной крутизной вероятностной характеристики коэффициент подавления аномальной компоненты дробового шума может достигать значений порядка 10 и выше.

2. Для двухпараметрических модификаций моделей определены уровни аномального шума и условия его подавления.

3. Обнаружена важная в практическом отношении особенность эффекта подавления аномальной компоненты дробового шума в линейных модифика-

циях моделей, заключающаяся в том, что с ростом параметра неоднородности системы коэффициент подавления аномальной компоненты шума также возрастает и тем самым ограничивает рост полного уровня дробового шума.

**Достоверность результатов выпускной квалификационной работы.** Достоверность результатов работы определяется использованием строгих статистических методов расчёта шумовых свойств разработанных моделей неоднородных потенциальных барьеров.

**Научная и практическая значимость работы.** Научная значимость работы определяется комплексом результатов, которые существенно расширяют представления о статистическом механизме генерации аномальной компоненты дробового шума неоднородного потенциального барьера.

На основе разработанных моделей показана принципиальная возможность подавления уровня аномальной компоненты дробового шума за счет реализации соответствующего закона распределения параметра интенсивности эмиссии. Установлена связь между видом закона распределения параметра интенсивности и величиной коэффициента подавления аномального дробового шума.

Практическая значимость результатов заключается в том, что они дают направление, в котором необходимо изменять закон распределения параметра интенсивности при создании реальных малощумящих потенциальных барьеров вообще и электронных эмиттеров (катодов) в частности. Реализация таких законов распределения на практике представляет одну из важнейших задач, стоящих перед разработчиками технологии изготовления катодов.

#### **Основные результаты и положения, выносимые на защиту.**

1. Разработанный комплекс статистических моделей неоднородных эмиттеров, в рамках которых реализуются условия возникновения эффекта подавления аномальной компоненты дробового шума: линейная модификация модели с положительной крутизной вероятностной характеристики (плотности распределения параметра интенсивности); аналогичная модификация с отрицательной крутизной; смещённая модификация гиперболической модели.

2. Эффект подавления аномальной компоненты дробового шума за счёт реализации соответствующего закона параметра интенсивности эмиссии.

**Публикации.** По материалам ВКР опубликовано 4 статьи.

**Личный вклад автора выпускной квалификационной работы.** При подготовке статей, выполненных в соавторстве, принимал участие в обсуждении постановки задачи, выполнил необходимые теоретические расчёты, принимал участие в обсуждении результатов.

**Структура и объём выпускной квалификационной работы.** Работа состоит из введения, трёх разделов, заключения и списка использованных литературных источников. Она содержит 40 страниц текста, 11 рисунков, 5 таблиц. Список литературных источников содержит 24 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, сформулирована постановка задачи.

**В первом разделе**, состоящем из 6 пунктов, рассмотрено состояние проблемы моделирования неоднородных эмиттеров, обоснован выбор исходных (базовых) моделей, которые целесообразно модифицировать. К ним отнесены модель равномерной плотности распределения параметра интенсивности миссии и гиперболическая модель.

Здесь же приведены краткие сведения об основных положениях общей теории дробового шума неоднородных эмиттеров и методике их моделирования.

Общая теория аномального дробового шума [15] построена для произвольного закона распределения интервала времени  $\tau$  между двумя последовательными моментами испускания электронов, а следовательно, и произвольного закона распределения параметра интенсивности эмиссии  $\lambda$ . В классической теории параметр  $\lambda$  считается постоянной детерминированной величиной, равной среднему числу электронов, эмитируемых за единицу времени. В общей теории он рандомизируется, то есть приобретает случайный характер вследствие непрерывной смены эмиссионных состояний катода. Теперь это условное математическое ожидание при условии, что катод находится в данном эмиссионном состоянии. При построении моделей неоднородного эмиттера обычно предполагают, что условная плотность распределения интервала  $f(\tau | \lambda)$ , определяемая при условии, что катод находится в данном эмиссионном состоянии, представляет собой экспоненциальный закон.

$$f(\tau | \lambda) = \lambda \exp(-\lambda \tau)$$

Для произвольного закона распределения  $\lambda$  выражение для спектральной плотности полного дробового шума  $S_i(\omega)$ , полученное в [15], имеет вид

$$S_i(\omega) = \frac{eI_0}{2\pi} + \frac{eI_0}{\pi} \operatorname{Re} \frac{M\{\exp(j\omega\tau)\}}{1 - M\{\exp(j\omega\tau)\}},$$

где  $I_0 = \frac{e}{\bar{\tau}}$  - постоянная составляющие тока эмиссии,  $\bar{\tau} = M\{\tau\}$  - математическое ожидание интервала,  $M$  - символ взятия математического ожидания,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $i$  - символ флуктуационной составляющей тока эмиссии,  $\omega$  - круговая частота,  $e$  - абсолютная величина заряда электрона.

Первое слагаемое в приведённом выражении представляет классическую компоненту дробового шума, рассчитанную Шоттки. Второе слагаемое показывает, что в спектре шума неоднородного эмиттера появляется дополнительная аномальная компонента. Нетрудно показать, что при экспоненциальном законе распределения интервала  $\tau$ , которое характерно для однородных эмиттеров, эта компонента равна нулю.

Для введения коэффициентов, удобных для сравнения дробовых шумов однородных и неоднородных эмиттеров, указанное выражение часто записывают также одним из следующих способов:

$$S_i(\omega) = \frac{eI_0}{2\pi} \gamma(\omega),$$

$$S_i(\omega) = \frac{eI_0}{2\pi} + [\gamma(\omega) - 1] \frac{eI_0}{2\pi},$$

где

$$\gamma(\omega) = 1 + 2 \operatorname{Re} \frac{M\{\exp(j\omega\tau)\}}{1 - M\{\exp(j\omega\tau)\}}.$$

Величина  $\gamma(\omega)$  является коэффициентом повышения, полного уровня дробового шума по сравнению с уровнем Шоттки ( $eI_0/2\pi$ ), величина  $\gamma(\omega)-1$  характеризует вклад в этот коэффициент дополнительной – аномальной компоненты. Другими словами коэффициенты  $\gamma(\omega)$  и  $\gamma(\omega)-1$  характеризуют уровни соответственно полного дробового шума и его аномальной компоненты в системе отсчёта, где за единицу интенсивности шума принимается уровень Шоттки. В то же время эти величины можно рассматривать как относительные (безразмерные) спектральные плотности полного дробового шума и его аномальной компоненты.

На достаточно низких частотах, когда  $\omega \ll I_0/e$ , коэффициент повышения шума  $\gamma_0 = \gamma(\omega \rightarrow 0)$  максимален и практически совпадает с квадратом коэффициента вариации  $v_\tau^2$  интервала  $\tau$

$$\gamma_0 = \gamma(\omega \rightarrow 0) = v_\tau^2 = \frac{M\{\tau^2\} - M^2\{\tau\}}{M^2\{\tau\}}.$$

В указанной области частот, которые условно можно называть низкими, отличие величин  $\gamma$  и  $\gamma_0$  пренебрежимо мало.

Для расчёта численных значений коэффициента повышения уровня дробового шума  $\gamma(\omega)$  требуется задать плотность распределения  $\psi(\lambda)$  параметра интенсивности эмиссии  $\lambda$ . Для краткости эту функцию будем называть вероятностной характеристикой модели эмиттера. Конкретизация этой функции, по существу, означает выбор частной математической модели неоднородного эмиттера.

При заданной характеристике  $\psi(\lambda)$  безусловная плотность вероятности интервала  $\tau$  определяется интегралом

$$f(\tau) = \int_0^{\infty} \psi(\lambda) \lambda \exp(-\lambda\tau) d\lambda.$$

К настоящему времени разработано довольно много [15-24] и дискретных, и непрерывных математических моделей неоднородного эмиттера, многие из которых могут соответствовать реальным образцам катодов, отличающихся различными факторами: типом, структурой, химическим составом, технологией изготовления и т.д. Использование совокупности частных моде-

лей неоднородного эмиттера позволяет ответить на вопросы, касающиеся возможных пределов изменения шумовых параметров эмиттера при той или иной степени его неоднородности, требований к технологии изготовления и др. Для полноты ответа на подобные вопросы необходимы экспериментальные данные о типе и степени неоднородности эмиттеров и дальнейшая разработка новых и модификация существующих частных моделей. При этом очевидно, что наибольший интерес представляют наиболее простые частные модели, отличающиеся наиболее низким уровнем АДШ и позволяющие оперативно рассчитать этот уровень.

Тип и название непрерывных частных моделей определяется видом основной вероятностной характеристики параметра интенсивности  $\lambda$ .

В этом же разделе обоснован выбор базовых моделей, подлежащих модифицированию. К ним отнесены модель равномерной плотности и гиперболическая модель.

**Во втором разделе**, состоящем из 5 пунктов, приведены результаты разработки и исследования шумовых свойств линейных модификаций модели неоднородного эмиттера.

В качестве исходной (модифицируемой) модели принимается модель равномерной плотности, в рамках которой параметр  $\lambda$  распределён по равномерному закону. Совокупность исходной модели и её модификаций образуют общую линейную модель неоднородного эмиттера, под которой понимается такая система, для которой плотность распределения  $\psi(\lambda)$  параметра интенсивности эмиссии  $\lambda$  описывается отрезком прямой с произвольным наклоном относительно оси  $\lambda$ . Функция  $\psi(\lambda)$  отлична от нуля только в интервале  $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_a$ , границы которого определяются соответственно наименьшим  $\lambda_p$  и наибольшим  $\lambda_a$  дозволёнными значениями параметра интенсивности эмиссии. В этом интервале аналитическое выражение для  $\psi(\lambda)$  имеет вид линейной функции. Вне этого интервала  $\psi(\lambda)=0$ .

С учётом сказанного вероятностная характеристика линейной модели представляется так:

$$\psi(\lambda) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda_a - \lambda_p} + k \frac{\lambda - \lambda_o}{\lambda_o^2} & \text{при } \lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_a, \\ 0 & \text{при } \lambda < \lambda_p, \lambda > \lambda_a. \end{cases}$$

где  $\lambda_o = \frac{\lambda_a + \lambda_p}{2}$  - средняя точка интервала возможных значений  $\lambda$ ,  $k = \lambda_o^2 \frac{d\psi}{d\lambda}$  - безразмерный параметр наклона плотности распределения вероятности  $\psi(\lambda)$ , то есть безразмерная крутизна вероятностной характеристики. При  $k > 0$  функция  $\psi(\lambda)$  является возрастающей, при  $k < 0$  - убывающей.

Для корректного использования приведённого соотношения установлены границы области допустимых значений параметра крутизны  $k$ , исклю-



чающие появление отрицательных значений функции  $\psi(\lambda)$ . Дозволенные значения крутизны вероятностной характеристики  $k$  лежат в интервале

$$-|k_{zp}| \leq k \leq +|k_{zp}|,$$

где

$$|k_{zp}| = \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda_a + \lambda_p}{\lambda_a - \lambda_p} \right)^2$$

Если в качестве параметра эмиссионной неоднородности модели ввести в рассмотрение величину максимального перепада интенсивности эмиссии

$$\eta = \frac{\lambda_a}{\lambda_p},$$

то приведённое соотношение можно записать так:

$$|k_{zp}| = \frac{1}{2} \left( \frac{\eta + 1}{\eta - 1} \right)^2.$$

С увеличением параметра  $\eta$  модули граничных значений монотонно уменьшаются и при  $\eta \rightarrow \infty$  величины  $k_{zp}$  составляют  $+0,5$  и  $-0,5$ .

Приведённые выражения для плотности распределения  $\psi(\lambda)$  и области допустимых значений параметра крутизны  $k$  этого распределения составляют математическую основу линейной модели неоднородного эмиттера, позволяющую рассчитать уровень аномального дробового шума.

На основе указанных формул определена безусловная плотность распределения  $f(\tau)$  интервала времени  $\tau$  между двумя последовательными моментами испускания электронов, числовые характеристики (моменты) интервала и коэффициент увеличения  $\gamma_o$  полного дробового шума, то есть его максимальный уровень, соответствующий условию  $\omega \ll I_0/e$ ,

$$\gamma_o = \frac{2\lambda_o \left[ \frac{\lambda_o - k(\lambda_a - \lambda_p)}{\lambda_a \lambda_p} + \frac{k}{\lambda_o} \ln \frac{\lambda_a}{\lambda_p} \right]}{\left[ \frac{\lambda_o - k(\lambda_a - \lambda_p)}{\lambda_a - \lambda_p} \ln \frac{\lambda_a}{\lambda_p} + k \frac{\lambda_a - \lambda_p}{\lambda_o} \right]^2} - 1,$$

Как уже говорилось, максимальное значение уровня аномальной компоненты составляет  $\gamma_o - 1$ .

Это соотношение является основным результатом расчёта шумовых свойств линейной модели эмиттера. Через параметр неоднородности оно записывается так:

$$\gamma_o = \gamma_o(\eta, k) = \frac{2(\eta + 1) \left[ \frac{(\eta + 1) - 2k(\eta - 1)}{\eta} + \frac{4k}{\eta + 1} \ln \eta \right]}{\left[ \frac{(\eta + 1) - 2k(\eta - 1)}{\eta - 1} \ln \eta + \frac{4k(\eta - 1)}{\eta + 1} \right]^2} - 1.$$

Величина  $\gamma_o$  увеличивается с ростом параметра неоднородности и уменьшается с ростом модуля крутизны вероятностной характеристики.

При анализе шумовых свойств модели основной практический интерес представляет информация о полном уровне  $\gamma_o$  дробового шума, так как именно он определяет выходные шумовые параметры прибора (коэффициент шума, отношение шума к сигналу, чувствительность и др.)

Однако рост величины  $\gamma_o$  на неоднородном потенциальном барьере происходит за счёт появления и изменения только аномальной компоненты, уровень которой равен  $\gamma_o - 1$ . Поэтому с теоретической точки зрения для выяснения особенностей механизма генерации и возможности подавления дробового шума в неоднородных системах основной интерес представляет информация о поведении именно аномальной компоненты шума. В связи с этим для полноты анализа шумовых свойств рассматриваемой модели необходимо проведение совместного исследования поведения и уровня полного дробового шума  $\gamma_o$ , и уровня его аномальной компоненты  $\gamma_o - 1$ .

Результаты расчёта уровня полного дробового шума  $\gamma_o$  иллюстрируются кривыми рисунка 1.

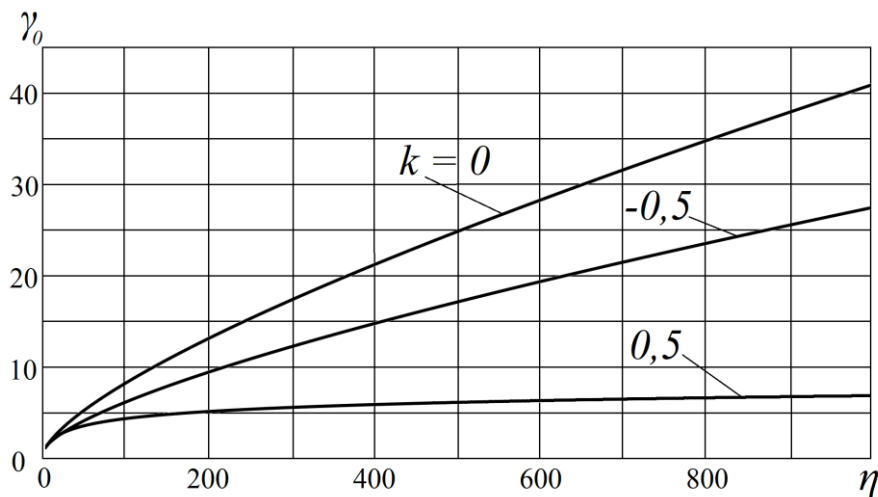


Рисунок 1. Зависимость уровня полного дробового шума  $\gamma_o$  от параметра неоднородности эмиттера  $\eta$  при значениях крутизны  $k$ , равных 0; 0,5; -0,5.

Выбранные значения крутизны являются дозволёнными (их модули не превышают соответствующих предельных значений) при любых  $\eta$  в диапазоне  $1 \leq \eta < \infty$ .

Кривая, отвечающая  $k=0$ , соответствует модели равномерной плотности. С появлением отличной от нуля крутизны уровень полного дробового шума уменьшается. Обе кривые, которым соответствуют  $k=0,5$  и  $k=-0,5$ , идут ниже кривой для  $k=0$ . Таким образом, появление крутизны вероятностной характеристики не зависимо от её знака всегда приводит к уменьшению уровня шума, то есть вызывает эффект подавления шума. При этом положительная крутизна вызывает более глубокое подавление шума, чем отрицательная.

Количественно эффект подавления уровня полного дробового шума за счёт влияния крутизны вероятностной характеристики можно охарактеризовать коэффициентом подавления  $D_{пол}$ , представляющим отношение уровня шума при крутизне  $k = 0$  и при  $k \neq 0$ ,

$$D_{пол} = \frac{\gamma_o(\eta, k = 0)}{\gamma_o(\eta, k \neq 0)}.$$

Коэффициент подавления полного дробового шума  $D_{пол}$  зависит от параметра неоднородности  $\eta$ . Из кривых следует, что эффект подавления шума проявляется тем сильнее, чем больше параметр неоднородности  $\eta$ . Так при крутизне  $k=0,5$  и увеличении  $\eta$  до 1000 он принимает значение, равное 6. При отрицательной крутизне эффект подавления также наблюдается, но выражен значительно слабее. С увеличением  $\eta$  коэффициент подавления  $D_{пол}$  при положительной крутизне  $k$  возрастает значительно быстрее, чем при отрицательной

Отмеченные особенности изменения уровня полного дробового шума вызываются соответствующими изменениями уровня  $\gamma_o - 1$  только аномальной компоненты дробового шума. Классическая компонента полного дробового шума при любых изменениях параметров неоднородности  $\eta$  и крутизны  $k$  остаётся неизменной. Её безразмерный уровень всегда равен 1. Поэтому с теоретической точки зрения особый интерес вызывают изменения аномальной компоненты в чистом виде. Графически результаты представлены на рисунке 2.

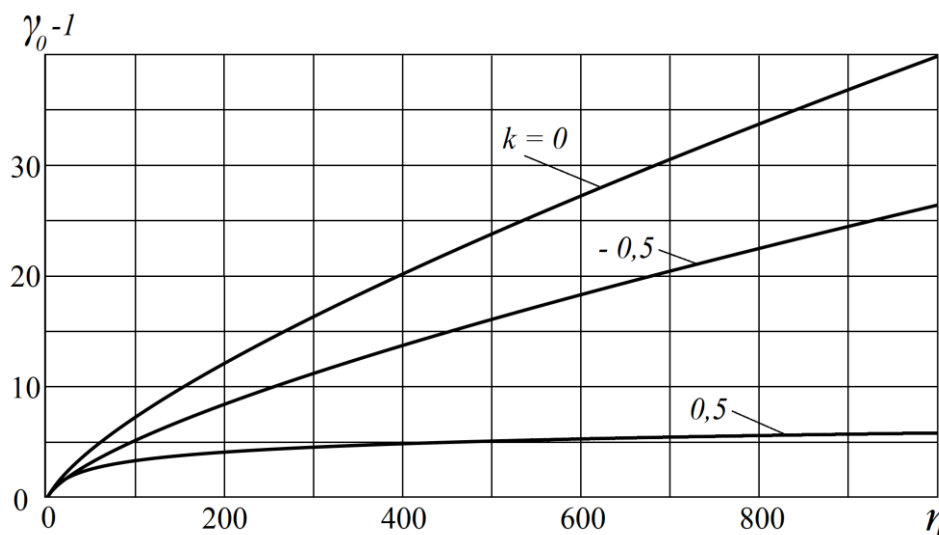


Рисунок 2. Кривые зависимости уровня  $\gamma_o - 1$  аномальной компоненты дробового шума от параметра неоднородности модели при фиксированных значениях крутизны, равных соответственно 0; 0,5; -0,5.

Кривые рис. 2 имеют те же особенности, что и кривые рис. 1. При любых значениях  $\eta$  появление отличной от нуля крутизны  $k$  вероятностной характеристики модели вызывает уменьшение уровня аномальной компоненты  $\gamma_o - 1$ , то есть - эффект подавления аномальной компоненты дробового шума. Однако числовые характеристики эффекта подавления аномальной компо-

ненты, естественно, отличаются от аналогичных характеристик для полного шума в сторону более высоких значений. С целью оценки этого различия в рассмотрение вводится коэффициент подавления  $D_{ан}$  аномальной компоненты шума

$$D_{ан} = \frac{\gamma_o(\eta, k=0) - 1}{\gamma_o(\eta, k \neq 0) - 1}$$

Как и в предыдущем случае, из кривых рис. 2 следует, что подавление аномальной компоненты шума происходит тем эффективнее, чем больше параметр неоднородности  $\eta$ . Так при крутизне  $k=0,5$  и увеличении параметра неоднородности до  $\eta=1000$  коэффициент подавления аномальной компоненты  $D_{ан}$  достигает значения, равного 8. Наблюдаемое подавление аномальной компоненты при положительной крутизне  $k$  является более значительным, чем при отрицательной.

Аналогичные кривые были построены при условии, что в каждой точке кривой  $\gamma_o = \gamma_o(\eta)$  значение модуля крутизны равно его граничному значению  $|k| = |k_{зр}|$ , которое зависит от  $\eta$ . Таким образом, каждой точке кривой соответствует своё (предельно высокое по модулю) значение крутизны. Соответствующие кривые, отвечающие  $k=0$ ;  $k = +|k_{зр}|$ ;  $k = -|k_{зр}|$ , ведут себя аналогичным образом, что и кривые рис. 1, отличаясь лишь численными значениями коэффициентов подавления. Так при  $k = +|k_{зр}|$  и  $\eta=1000$  коэффициент подавления аномальной компоненты дробового шума достигает значения 10.

Проведённый анализ модификаций линейной модели подтвердил принципиальную возможность существенного ослабления уровня аномальной компоненты дробового шума за счёт реализации соответствующего закона распределения  $\psi(\lambda)$  параметра интенсивности эмиссии.

**В третьем разделе**, состоящем из 3 пунктов, рассмотрены шумовые свойства так называемой смещённой модификации гиперболической модели неоднородного потенциального барьера [18,20].

В качестве модифицируемой (базовой) модели принимается гиперболическая модель неоднородного потенциального барьера [18,20].

Предполагается, что плотность распределения параметра интенсивности (вероятностная характеристика) описывается усечённой гиперболой, для которой точка пересечения асимптот смещена из начала декартовой системы координат, то есть

$$\psi(\lambda) = \begin{cases} C\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_s}\right) & \text{при } \lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_a, \\ 0 & \text{при } \lambda < \lambda_p, \lambda > \lambda_a. \end{cases}$$

Здесь  $C$  – постоянная величина, определяемая из условия нормировки,  $\lambda_a \leq \lambda_s$ ,  $\lambda_s$  – точка пересечения гиперболы с осью  $\lambda$ , которую считаем направленной вдоль горизонтальной оси декартовой системы координат (оси  $x$ ).

При этом значения плотности распределения  $\psi(\lambda)$  откладываются вдоль вертикальной оси декартовой системы (оси  $y$ ).

Приведённое выражение описывает гиперболу, горизонтальная асимптота которой смещена в направлении против оси  $y$  на величину  $(-C/\lambda_s)$ . Поскольку смещена и сама гипербола рассматриваемая модификация названа смещённой модификацией гиперболической модели.

С учётом условия нормировки окончательное выражение для плотности распределения  $\psi(\lambda)$  имеет вид

$$\psi(\lambda) = \begin{cases} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_s} \right) \left( \ln \frac{\lambda_a}{\lambda_p} - \frac{\lambda_a - \lambda_p}{\lambda_s} \right)^{-1} & \text{при } \lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_a, \\ 0 & \text{при } \lambda < \lambda_p, \lambda > \lambda_a. \end{cases}$$

При  $\lambda_s \rightarrow \infty$  это выражение совпадает с законом распределения параметра интенсивности эмиссии для базовой гиперболической модели неоднородного эмиттера.

Использование этого выражения даёт следующее соотношение для величины  $\gamma_0$ , показывающий превышение уровня  $\gamma_0$  полного дробового шума над уровнем Шоттки,

$$\gamma_0 = \left( \ln \frac{\lambda_a}{\lambda_p} - \frac{\lambda_a - \lambda_p}{\lambda_s} \right) \frac{\frac{\lambda_a^2 - \lambda_p^2}{\lambda_a^2 \lambda_p^2} - 2 \frac{\lambda_a - \lambda_p}{\lambda_a \lambda_p \lambda_s}}{\left( \frac{\lambda_a - \lambda_p}{\lambda_a \lambda_p} - \frac{1}{\lambda_s} \ln \frac{\lambda_a}{\lambda_p} \right)^2} - 1.$$

Это соотношение содержит три размерных параметра:  $\lambda_a, \lambda_p, \lambda_s$ . Однако его анализ показывает, что величину  $\gamma_0$  можно представить как функцию всего двух безразмерных параметров. Один из таких параметров уже использовался. Это параметр  $\eta = \lambda_a/\lambda_p$  максимального перепада интенсивности эмиссионных состояний. В качестве второго безразмерного параметра можно выбрать величину

$$s = \frac{\lambda_s}{\lambda_a},$$

которую целесообразно назвать параметром смещения, так как она характеризует смещение верхней границы интервала дозволённых значений  $\lambda$  относительно точки  $\lambda_s$ . Изменение этого параметра вызывает изменение крутизны кривой  $\psi(\lambda)$ . При  $\lambda_s \rightarrow \infty$  рассматриваемая модификация совпадает с базовой гиперболической моделью, а параметр смещения  $s \rightarrow \infty$ . Наименьшее значение  $s$  равно 1, так как оно соответствует равенству  $\lambda_s = \lambda_a$ . Таким образом,  $s$  может изменяться в пределах от 1 до  $\infty$ .

В отношении уровня шумов рассматриваемая модель является двухпараметрической и  $\gamma_0 = \gamma_0(\eta, s)$ . Соотношение для  $\gamma_0$ , выраженное через параметры  $\eta$  и  $s$ , имеет вид

$$\gamma_0(\eta, s) = s \left( \ln \eta - \frac{\eta - 1}{\eta s} \right) \frac{s(\eta^2 - 1) - 2(\eta - 1)}{[s(\eta - 1) - \ln \eta]^2} - 1.$$

Расчёты по приведённой формуле показывает, что величина  $\gamma_0$  растёт с увеличением и параметра неоднородности  $\eta$ , и параметра смещения  $s$ . При этом зависимость от  $\eta$  является значительно более резкой, чем зависимость от  $s$ .

Для рассматриваемой модели также обнаружен эффект подавления аномального дробового шума.

Чтобы оценить степень влияния параметра смещения  $s$  на уровень  $\gamma_0$  дробового шума при любом заданном  $\eta$ , достаточно сравнить значения  $\gamma_{0\max}(\eta) = \gamma_0(\eta, s \rightarrow \infty)$  и  $\gamma_{0\min}(\eta) = \gamma_0(\eta, s = 1)$ , которые отвечают соответственно наиболее «шумящему» и наименее «шумящему» вариантам обсуждаемой модели неоднородного эмиттера. Это отношение, по существу, является коэффициентом подавления уровня полного дробового шума рассматриваемой модификации по сравнению с аналогичной величиной для базовой гиперболической модели

$$D_{\text{пол}} = \frac{\gamma_{0\max}(\eta)}{\gamma_{0\min}(\eta)} = \frac{\gamma_0(\eta, s \rightarrow \infty)}{\gamma_0(\eta, s = 1)}$$

Аналогичным образом можно определить и коэффициент подавления аномальной компоненты дробового шума

$$D_{\text{ан}} = \frac{\gamma_{0\max}(\eta) - 1}{\gamma_{0\min}(\eta) - 1}$$

Численные значения коэффициентов подавления представлены в таблицах 1 и 2. полного дробового шума и его аномальной компоненты в зависимости от параметра перепада  $\eta$  представлены соответственно в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Значения коэффициентов подавления полного дробового шума

$\eta$	2	4	10	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$
$D_{\text{пол}} = \frac{\gamma_{0\max}(\eta)}{\gamma_{0\min}(\eta)}$	1,03	1,08	1,2	1,23	1,18	1,14	1,1

Таблица 2. Значения коэффициентов подавления аномальной компоненты

$\eta$	4	10	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$
$D_{\text{ан}} = \frac{\gamma_{0\max}(\eta) - 1}{\gamma_{0\min}(\eta) - 1}$	1,5	1,6	1,35	1,22	1,16	1,11

Табличные данные позволяют сделать вывод о том, что при любой степени неоднородности эмиттера уровень шумов смещенной модификации гиперболической модели ниже, чем у базовой гиперболической модели. Однако величина коэффициентов подавления здесь невелика. Достаточно сказать, что максимальная величина коэффициента подавления аномальной компоненты дробового шума равна 1,6.

Тем не менее, полученный вывод очень важен в принципиальном плане. Он означает, что различные модификации гиперболической модели могут иметь не только более высокий, но и более низкий уровень шумов, чем у базовой гиперболической модели. Следовательно, имеется возможность определить такую модификацию гиперболической модели, в рамках которой уровень шума окажется значительно ниже, чем у базовой модели.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ**

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы получены следующие результаты и выводы.

Проведён анализ состояния проблемы моделирования неоднородных потенциальных барьеров, в том числе электронных эмиттеров (катодов электровакуумных приборов). Краткий обзор известных моделей позволил определить типы базовых (исходных) моделей, перспективных для модифицирования: модель равномерной плотности и гиперболическую модель неоднородного эмиттера.

Разработаны две двухпараметрические модификации модели равномерной плотности. Анализ шумовых свойств линейных модификаций модели показал принципиальную возможность подавления уровня аномальной компоненты дробового шума за счёт реализации соответствующего вида вероятностной характеристики.

Для линейных модификаций обнаружена важная особенность генерации аномальной компоненты шума, заключающаяся в том, что интенсивность генерации зависит от крутизны вероятностной характеристики модели. При любой отличной от нуля крутизне уровень флуктуаций тока оказывается ниже, чем у базовой модели с нулевой крутизной. Таким образом, появление крутизны сопровождается появлением эффекта подавления аномальной компоненты дробового шума. .

В линейной модификации с положительной крутизной вероятностной характеристики коэффициент подавления аномальной компоненты дробового шума может достигать значений порядка 10. В линейной модификации с отрицательной крутизной коэффициент подавления аномальной компоненты значительно ниже и не превышает величины порядка 1,5.

Практически важной особенностью эффекта подавления аномальной компоненты дробового шума в линейных модификациях является рост коэффициента подавления по мере увеличения степени неоднородности системы. В условиях эффективного подавления шума аномальная компонента может быть незначительной даже при существенной неоднородности системы. В результате её наблюдение и измерение могут стать затруднительными вследствие маскировочного эффекта, создаваемого классической компонентой Шоттки.

Разработана двухпараметрическая модификация гиперболической модели. Эффект подавления аномальной компоненты наблюдался и в этой модификации. Максимальное значение коэффициента подавления составило 1.6. Указанное снижение шумов невелико, однако главное достоинство полученного результата состоит в том, что он доказывает возможность существования эффекта подавления шума в различных типах базовых моделей. Особенность эффекта подавления в этой модели состоит в том, что коэффициент подавления не является монотонной функцией параметра неоднородности и имеет максимум.

Сравнение шумовых свойств рассмотренных модификаций показывает, что наименьшим уровнем аномальной компоненты дробового шума обладает линейная модификация с положительной крутизной вероятностной характеристики.

Практическая значимость результатов в том, что они дают направление, в котором необходимо изменять закон распределения параметра интенсивности при создании реальных малошумящих эмиттеров. Реализация таких законов распределения на практике представляет одну из важнейших задач, стоящих перед разработчиками технологии изготовления катодов.

### Список использованных источников

1. Жигальский Г.П. Флуктуации и шумы в электронных твёрдотельных приборах. – М.:Физматлит, 2012. - 512 с.
2. Якимов А.В. Физика шумов и флуктуаций параметров. Электронное учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. – 85 с.
- 3 Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. – М.: Наука, 1981. – 640 с.
4. Шумы в электронных приборах / Под ред. Л.Д. Смуллина и Г.А. Хауса, пер. с англ. под ред. К.И. Палатова. - М.-Л.: Энергия, 1964, – 484 с.
5. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах. – М.: Мир, 1986.
- 6 Робинсон Ф.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях. – М.: Атомиздат, 1980.
- 7 Жалуд В., Кулешов В.Н. Шумы в полупроводниковых устройствах. – М.: Сов. Радио, 1977.
8. Лукьянчикова Н.Б. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах/ Н.Б. Лукьянчикова. М.: Радио и связь. 1990.
9. Давенпорт В.Б., Рут В.Л. Введение в теорию случайных сигналов и шумов / Пер. с англ. под ред. Р.Л. Добрушина. – М.: ИЛ, 1960, – 468 с.
10. Дружинин А.В., Кондрашенков Ю.А., Некрасов В.И. Эмиссионная неоднородность эффективных термокатодов // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. – 1969. – Т. 33, № 5. – С. 411-420.
11. Dalke W., Dlonhy F. A Cathode Test Utilizing Noise Measurements // Proc. IRE. – 1958. – Vol. 46, № 9. – P. 1639-1645.
12. Набоков Ю.И., Авдеев В.Е. Об аномальном дробовом эффекте в приборах с оксидным катодом // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. – 1969. – Т. 33, № 3. – С. 452-457.
13. Taczanowski A., Derko H., Zbikowski A. Badania szumow katod termoelectronowych // Pracen Przemysl. inst. Electron. – 1960. – Vol. 1, № 1. P. 20-34.



14. Попов А.И., Колпаков Д.Е. О возможном механизме аномально высоких дробовых шумов в ПУЛ // Электронная техника. Сер. 5. Приёмно-усилительные лампы. – 1971. – В. 1. – С. 35-42.
15. Шаповалов А.С., Голубенцев А.Ф., Денисов Ю.И. Эмиссионные и шумовые свойства неоднородных эмиттеров. – Саратов.: Издательство Саратовского университета, 1983. – 92 с.
16. Шаповалов А.С., Инкин М.Г., Мироненко К.В. Аномальный дробовой шум на неоднородном потенциальном барьере // Гетеромагнитная микроэлектроника: Сб. науч. тр. / Под ред. проф. А.В. Ляшенко. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, - 2016. – Вып. 20. – С. 41-46.
17. Шаповалов А.С. Вероятностные расчёты в физике. – Саратов: Саратовский источник. 2015. -72 с.
18. Шаповалов А.С., Шаповалов С.А. Зависимость уровня дробовых шумов неоднородного эмиттера от характера распределения параметра интенсивности эмиссии // Вопросы прикладной физики.: Межвуз. науч. сб. Саратов.: Изд-во СГУ. – 2014. – В. 21. – С. 43-45.
19. Шаповалов А.С., Инкин М.Г. Уровень дробового шума на неоднородном потенциальном барьере Релеевского типа // Вопросы прикладной физики.: Межвуз. науч. сб. Саратов.: Изд-во СГУ. – 2019. – В. 26. – С. 37-40.
20. Шаповалов А.С., Шаповалов С.А. Универсальная статистическая модель неоднородного потенциального барьера в режиме генерации аномального дробового шума // Вопросы прикладной физики.: Межвуз. науч. сб. Саратов.: Изд-во СГУ. – 2019. – В. 26. – С. 11-14.
21. Шаповалов А.С., Инкин М.Г., Шаповалов А.С. мл. Максимальный уровень дробового шума гиперболической модели неоднородного потенциального барьера // Вопросы прикладной физики.: Межвуз. науч. сб. Саратов.: Изд-во СГУ. – 2020. – В. 27. – С. 36-37.
22. Шаповалов А.С., Инкин М.Г., Шаповалов А.С. мл. Частотные характеристики аномального дробового шума гиперболической модели неоднородного потенциального барьера // Вопросы прикладной физики.: Межвуз. науч. сб. Саратов.: Изд-во СГУ. – 2020. – В. 27. – С. 37-40.
23. Шаповалов А.С., Машников В.В., Шаповалов А.С. мл. Модификация гиперболической модели неоднородного потенциального барьера с пониженным уровнем аномального дробового шума // Вопросы прикладной физики.: Межвуз. науч. сб. Саратов.: Изд-во СГУ. – 2020. – В. 27. – С. 40-45.
24. Шаповалов А.С., Шаповалов С.А., Шаповалов А.С. мл. Методические аспекты общей теории аномального дробового шума и её практического применения // Вопросы прикладной физики.: Межвуз. науч. сб. Саратов.: Изд-во СГУ. – 2020. – В. 27. – С. 6-9.