

Министерство образования и науки Российской Федерации  
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  
имени В.А. Котельникова РАН*

**КОМБИНИРОВАННАЯ МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ  
НЕОДНОРОДНОГО ЭМИТТЕРА**

АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ  
(МАГИСТЕРСКОЙ) РАБОТЫ  
студентки 2 курса 251 группы  
направления 03.04.02 «Физика» физического факультета  
Инкина Максима Глебовича

Научный руководитель  
д.ф.-м.н. профессор А. С. Шаповалов

Заведующий кафедрой  
д.ф.-м.н. профессор В.М. Аникин

Саратов

2018

## Введение

Одной из приоритетных задач теории и практики шумов электронных приборов является исследование источников шума в таких устройствах [1-11]. Основными естественными источниками шумов вакуумных и твердотельных электронных приборов является тепловой шум, дробовой шум и избыточные шумы [2,4-6]. Несмотря на многолетние исследования этих источников помех, в их теории остался целый ряд «белых пятен». Так, применительно к дробовому шуму, остался не исследован в полной мере эффект возникновения аномальных дробовых флуктуаций [2,5,12-15]. Аномальным дробовым шумом принято считать ту компоненту дробовых флуктуаций, которая вызывается неоднородностью эмиссионных состояний катода и которая приводит к существенному повышению полного уровня дробовых флуктуаций. Эта компонента является одной из разновидностей избыточных шумов, наряду с фликер-шумом и генерационно-рекомбинационным шумом [7]. Изучение избыточных шумов представляет большой теоретический и практический интерес по многим причинам. Они отрицательно влияют на чувствительность измерительной аппаратуры, систем связи, навигации, радиолокации и других приборов. В то же время исследование таких шумов позволяет прогнозировать надежность, долговечность, отказы подобных систем, осуществлять шумовую спектроскопию энергетических уровней полупроводников [16-18].

Перед данной выпускной квалификационной работой была поставлена задача: рассмотреть комбинированную многоуровневую модель неоднородного эмиттера и оценить вклад отдельного эмиссионного состояния в уровень аномального дробового шума.

### Комбинированная многоуровневая модель

Рассмотренная в предыдущем параграфе модель позволяет оценить влияние числа эмиссионных состояний на уровень шума, однако, не позволяет оценить вклад в уровень шума отдельных эмиссионных состояний. Для этого была построена комбинированная модель аномального дробового шума. Идея модели заключается в том, что среди всех эмиссионных состояний есть небольшое число равновероятных состояний с большой суммарной вероятностью, а все остальные состояния, так же равновероятны между собой, имеют маленькую суммарную вероятность. Таким образом, при достаточно большом числе эмиссионных состояний и большой суммарной вероятности «основных» состояний, многоуровневая модель переходит в модель с меньшим числом эмиссионных состояний, что позволяет дать оценку вкладу «побочных» состояний в уровень АДШ.

Закон распределения интервала времени  $\tau$  запишется так же, как 2.4.1, однако вероятности каждого эмиссионного состояния будут отличны от  $1/N$ :

$$P_i = \begin{cases} \frac{1 - \Sigma P_k}{N - K} & , \text{ при } i \neq k \\ \frac{\Sigma P_k}{K} & , \text{ при } i = k \end{cases}$$

где  $K$  – число «основных» эмиссионных состояний,  $k$  –  $i$ -ое состояние, являющееся «основным»,  $\Sigma P_k$  – суммарная вероятность «основных» состояний.

Коэффициент повышения шума запишется следующим образом:

$$\gamma(\Omega) = 1 + 2 \frac{AC - B^2}{\Omega^2 C^2 + B^2} ,$$

где

$$A(\Omega) = \sum_{i=1}^N \frac{P_i \left( \lambda_i / \lambda_0 \right)^2}{\left( \lambda_i / \lambda_0 \right)^2 + \Omega^2} ,$$

$$B(\Omega) = \sum_{i=1}^N \frac{P_i \left( \lambda_i / \lambda_0 \right)}{\left( \lambda_i / \lambda_0 \right)^2 + \Omega^2},$$

$$C(\Omega) = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{\left( \lambda_i / \lambda_0 \right)^2 + \Omega^2}.$$

Пусть число «основных» состояний  $K = 3$ , а «побочных»  $N-K=100$ ,  $i$ -ые состояния с номерами 26,52,78 – «основные».

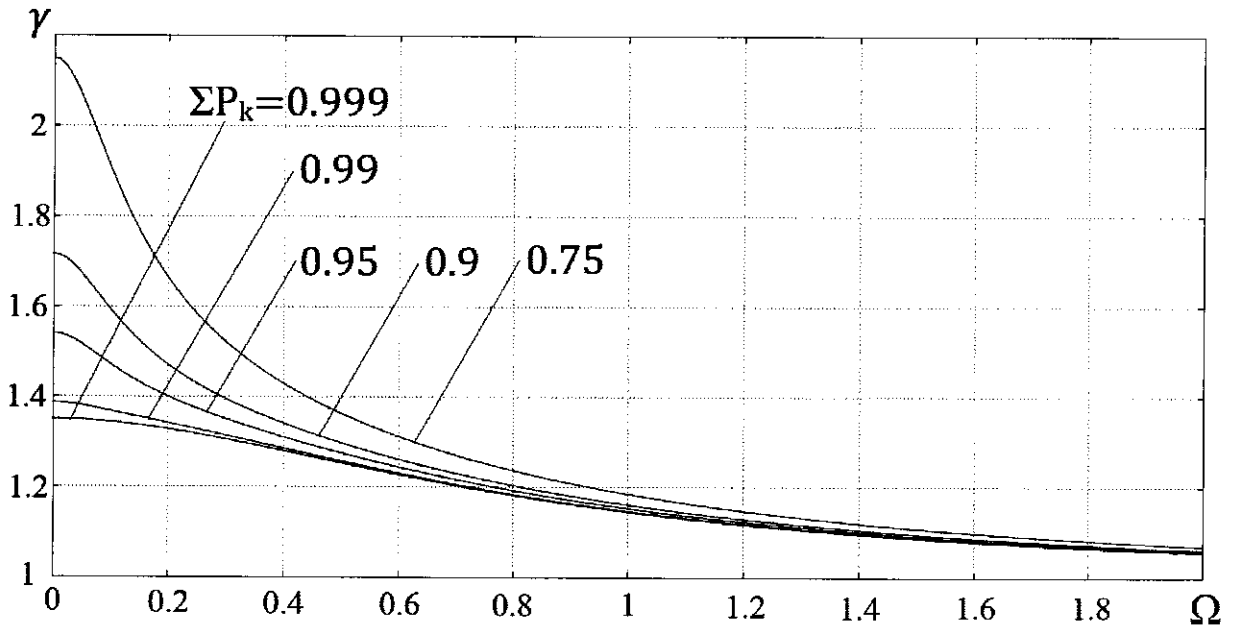


Рисунок 10 - зависимость коэффициента увеличения шума  $\gamma$  от приведенной частоты  $\Omega$  при  $q=0.9$  и различных  $\Sigma P_k$

Из рисунков 10 и 11 видно, что увеличение  $\Sigma P_k$  приводит к уменьшению коэффициента повышения шума, что обуславливается переходом модели в трехуровневую с  $q=0.45$  (за счет отсеивания «побочных» состояний на краях интервала значений параметра интенсивности эмиссии).

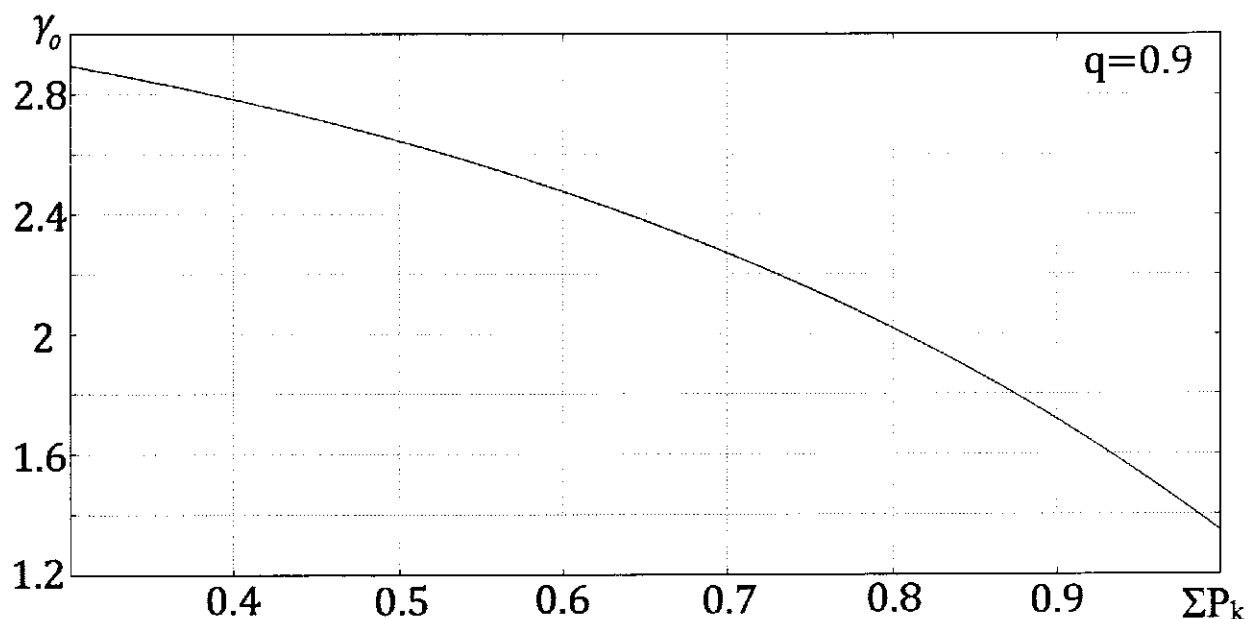


Рисунок 11 - зависимость коэффициента увеличения шума  $\gamma$  (при  $\Omega \rightarrow 0$ ) от суммарной вероятности «основных» состояний  $\Sigma P_k$

Рисунок 11 явным образом показывает уменьшение вклада «побочных» эмиссионных состояний при уменьшении вероятности их реализации. При  $\Sigma P_k=1$  модель полностью переходит в трехуровневую модель. Таким образом, конструирование эмиттеров необходимо проводить так, чтобы выделить несколько эмиссионных состояний, которые будут иметь большую вероятность. В таком случае даже при сильной неоднородности можно добиться маленького коэффициента повышения шума, что положительно скажется на шумовых характеристиках данного прибора.

Рисунок 12 наглядно иллюстрирует зависимость коэффициента повышения шума от суммарной вероятности «основных» состояний, при чем, при переходе модели в трехуровневую не происходит изменение относительной полуширины спектра  $q$ . Соответственно «основные» состояния имеют номера 1, 52 и 103, а общее число состояний, по-прежнему, 103. При таком расположении «основных» состояний, зависимость коэффициента повышения шума от частоты представлена на рисунке 13.

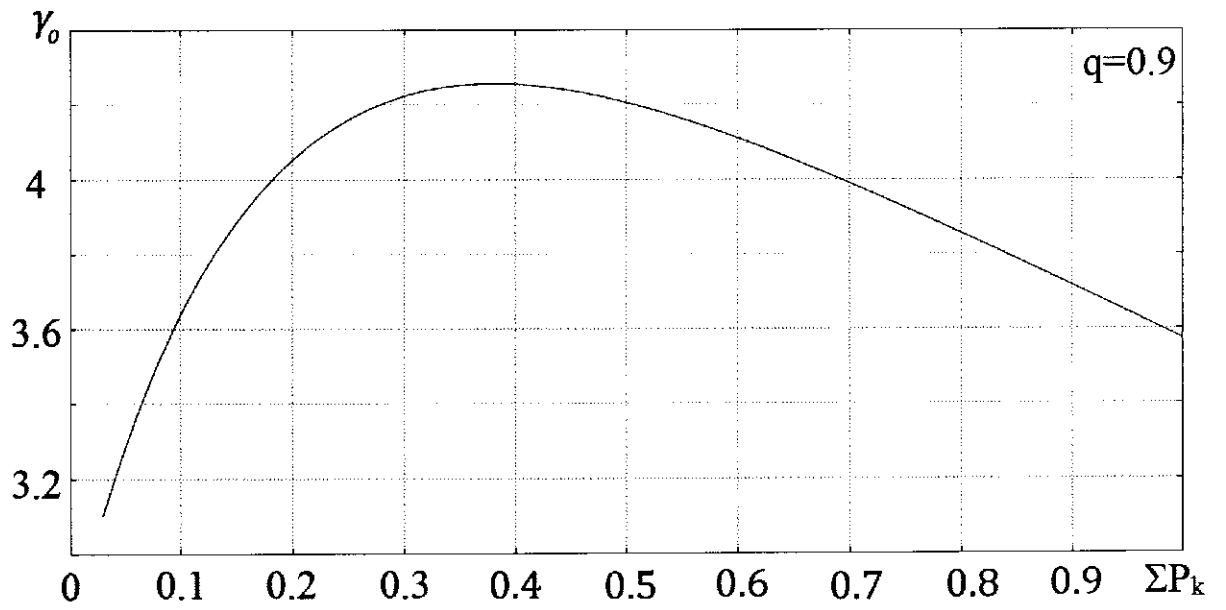


Рисунок 12 - зависимость коэффициента увеличения шума  $\gamma$  (при  $\Omega \rightarrow 0$ ) от суммарной вероятности «основных» состояний  $\Sigma P_k$

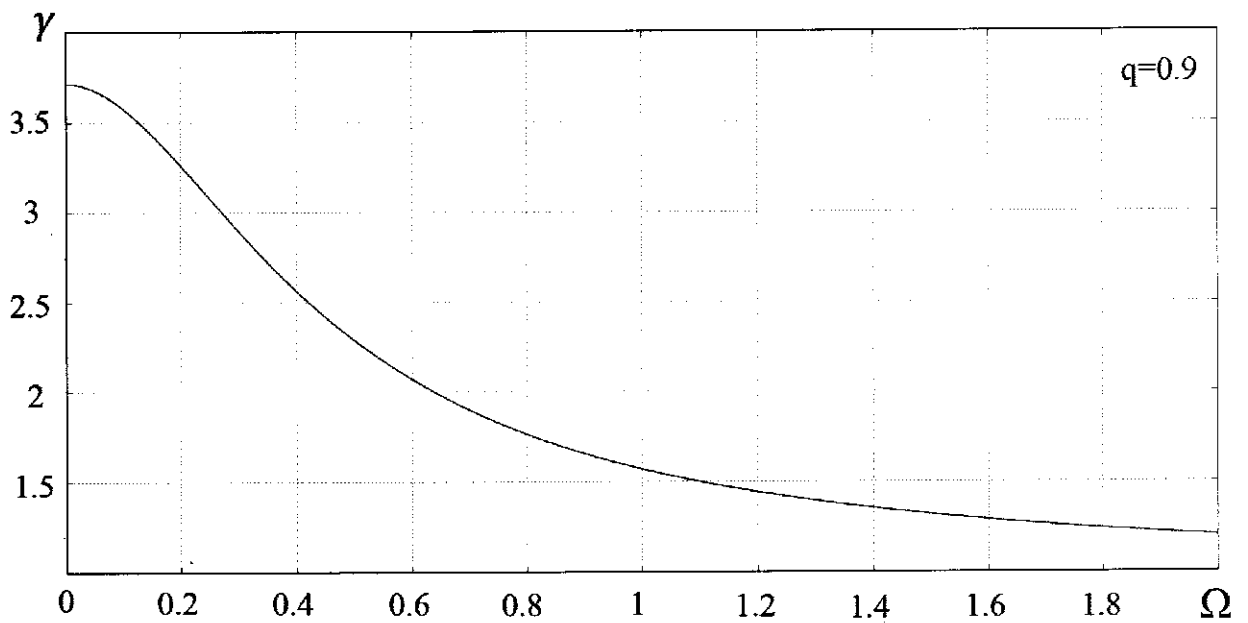


Рисунок 13 - зависимость коэффициента увеличения шума  $\gamma$  от приведенной частоты  $\Omega$  при  $q=0.9$  и  $\Sigma P_k=0.9$

## Заключение

В результате проведенных исследований предложены и обоснованы серии статистических моделей эмиттеров, неоднородных с точки зрения эмиссионных состояний: трехуровневая модель, многоуровневая модель и непрерывная модель равномерной плотности вероятности эмиссионных состояний. Указанные модели могут найти практическое применение при оценке уровня аномальных дробовых шумов и ширины их спектра.

Сопоставление моделей показало, что многоуровневая модель эмиссионных состояний позволяет адекватно описать, как дискретные, так и непрерывные модели эмиссионных состояний, так как допускает получение численных результатов при практически любом числе эмиссионных состояний, в том числе при  $N$  фактически соответствующих непрерывному закону распределения  $\lambda$ .

Проведенные исследования показали, что вклад отдельных эмиссионных состояний во многом зависит от вероятности их реализации. При низкой вероятности, даже большой набор эмиссионных состояний дает меньший вклад в аномальную компоненту дробового шума, чем состояния, имеющие большую вероятность. Так же, полученные данные позволяют оценить ошибку, возникающую в результате дискретизации (т.е. пренебрежение частью эмиссионных состояний, находящихся между рассматриваемыми состояниями).

Предложенная модель неоднородного эмиттера позволяет сделать определенное заключение о природе и причинах аномального дробового шума практически любого неоднородного эмиттера. Это обстоятельство определяет фундаментальный характер этой модели. Однако следует отметить, что эта модель представляет интерес и в чисто прикладном плане. Сопоставление экспериментальных значений  $\gamma(\Omega)$  с теоретическими кривыми позволило бы определить число эмиссионных состояний реализуемых в реальном эмиттере, то есть осуществить шумовую локацию эмиссионных состояний.

Многоуровневую модель, описанную в работе можно использовать для описания аномального дробового шума, генерируемого на любом потенциальном барьере, в том числе на барьерах, имеющих место в полупроводниковых устройствах, содержащих р-п, п-р и более сложные потенциальные барьеры.



### 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. Малахов, А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах/ А.Н. Малахов. М.: Наука, 1968. 660с.
7. Лукьянчикова Н.Б. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах/ Н.Б. Лукьянчикова. М.: Радио и связь. 1990.
8. Жалуд В. Шумы в полупроводниковых устройствах/ В. Жалуд , В.Кулешов. М.: Сов. Радио, 1977.
9. Голант М.Б. Генераторы СВЧ малой мощности/ М.Б. Голант, К.Л. Бобровский. М.: «Советское радио», 1977.
10. Робинсон, Ф.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях/ Ф.Н.Х. Робинсон. М.: Атомиздат, 1980. 225с.
11. Шумы в электронных приборах. Под ред. Л.Д. Смуллина и Г.А.Хауса. М.-Л.: Энергия. 1964.
12. 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.

13. 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.
14. Шаповалов А.С. Статистический механизм возникновения аномальных дробовых шумов в потоках носителей заряда/ А.С. Шаповалов, Ю.И. Денисов. Изв. Вузов. Радиолектроника. Т.28, №5, 1985. с.88.
15. Dalke W., Dlonhy F. A Cathode Test Utilizing Noise Measurements/ Proc. IRE. – 1958. – vol. 46, <sup>1</sup> 9. – P.1639-1645.
16. Придорогин В.М. Шумовые свойства транзисторов на низких частотах/ В.М. Придорогин. М.: Изд-во «Энергия», 1976.
17. Пряников В.С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов/ В.С. Пряников М.: Энергия, 1972.
18. Нарышкин А.К. Теория низкочастотных шумов/ А.К. Нарышкин , А.С. Врачев. М.: Энергия, 1972.
19. Отт, Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах/ Г. Отт. М.: Мир, 1979. 317с.
20. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций/ А.А. Свешников. М.: Наука, 1968.
21. Давенпорт В.Б. Введение в теорию случайных сигналов и шумов/ В.Б. Давенпорт, В.Л. Рут. М.: ИЛ, 1960. 467с.
22. Кокс, Л. Теория восстановления/ Л. Кокс, У. Смит. М.: Сов. Радио, 1967. 299с.
23. Харкевич А.А. Спектры и анализ/ А.А. Харкевич. М.: Физматгиз, 1962. 236с.
24. Херринг К. Термоэлектронная эмиссия/ К. Херринг, М. Никольс. М.: ИЛ, 1950. 260с.
25. Добрецов Л.Н. Эмиссионная электроника/ Л.Н. Добрецов, М.В. Гомоюнова. М.: Наука, 1966.

26. Герман Г. Оксидный катод/ Г. Герман, С. Вагенер. М.,Л.: Гостехиздат, 1949.
27. Мойжес Б.Я. Физические процессы в оксидном катоде/ Б.Я. Мойжес. М.: Наука, 1968.
28. 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
29. 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