

## РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

**Инерционное детектирование шума с использованием диода Шоттки с  $\delta$ -легированием**

А. В. Ключев

Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского,  
радиофизический факультет, кафедра бионики и статистической радиофизики.  
Россия, 603950, Нижний Новгород, просп. Гагарина, д. 23.

E-mail: [klyuev@rf.unn.ru](mailto:klyuev@rf.unn.ru)

Статья поступила 21.12.2011, подписана в печать 12.02.2012.

Исследовано влияние инерционности системы детектирования с использованием диода Шоттки с  $\delta$ -легированием на простейшие статистические характеристики выходного процесса.

*Ключевые слова:* диод Шоттки, дельта-легирование, вольт-амперная характеристика, детектирование, кумулянтные функции.

УДК: 621.391.822. PACS: 72.70.+m, 07.57.Kp, 05.40.-a.

**Введение**

Для создания чувствительных детекторов микроволнового излучения используются низкобарьерные диоды Шоттки. В работах [1–4] показана перспективность применения технологии  $\delta$ -легирования для изготовления низкобарьерных диодов. В некоторых пределах высоту барьера можно изменять путем дополнительного сильного легирования приповерхностной области полупроводника. Неэпитаксиальные методы, основанные на имплантации или сплавлении примеси, обеспечивают малый диапазон регулирования высоты барьера или приводят к неоднородности и плохой воспроизводимости. Более успешным оказалось прецизионное легирование в ходе эпитаксии. Здесь возможны два подхода — с использованием техники  $\delta$ -легирования и однородного легирования. В обоих случаях причиной снижения эффективной высоты барьера является возникновение термополевой компоненты тока.  $\delta$ -легирование эквивалентно сверхвысокому уровню объемного легирования. Это связано с тем, что при одинаковых поверхностных концентрациях легирующих доноров расстояние от металла до  $\delta$ -слоя, полностью экранирующего электрическое поле контакта, будет вдвое меньше, чем для случая однородного легирования. Поэтому подход с использованием  $\delta$ -легирования представляется более перспективным в задачах получения малого эффективного барьера при сохранении небольших значений коэффициента неидеальности [3].

Поскольку всякая реальная детектирующая система является инерционной, возникает важная задача исследования влияния инерционности системы детектирования на простейшие статистические характеристики выходного процесса.

Если входной переменной является произвольный случайный процесс, то отыскание статистических характеристик выходной переменной оказывается трудной задачей. Если же входная переменная является марковским процессом (или компонентой марковского процесса), то можно воспользоваться аппаратом теории марковских процессов и записать дифференциальные

уравнения для кумулянтов и кумулянтных функций искомого случайного процесса. Эти уравнения являются бесконечной цепочкой зацепляющихся уравнений. Это означает, что мы вынуждены ограничиваться модельными приближениями. Поэтому ограничимся случаем гауссова стационарного марковского процесса с нулевым средним и примем гауссово приближение для совокупности входной и выходной переменной.

Таким образом, возникает задача нахождения выходных статистических характеристик и их зависимостей от параметров входного шума при инерционном детектировании с использованием диода Шоттки с  $\delta$ -легированием в гауссовом приближении для совокупности входной и выходной переменной.

**Эквивалентная схема детектора**

Рассмотрим простейшую схему инерционного детектора на базе диода Шоттки с  $\delta$ -легированием, изображенную на рис. 1.

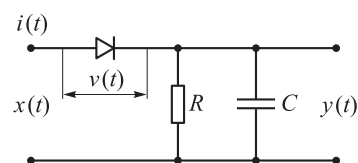


Рис. 1. Схема инерционного детектора

Если ввести обозначения  $i(t) = I(v)$  — вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода Шоттки с  $\delta$ -легированием,  $RC = a^{-1}$  характеризует постоянную времени усредняющего звена,  $F(v) = RI(v)$ , то дифференциальное уравнение, связывающее выходное исследуемое напряжение  $y(t)$  с входным  $x(t)$  имеет вид

$$dy/dt = -ay + aF(x - y). \quad (1)$$

Положим  $x(t)$  гауссовым стационарным низкочастотным шумом — марковским процессом, удовлетворяющим уравнению

$$dx/dt = -\gamma x + \xi(t), \quad (2)$$

где  $\xi(t)$  — гауссов стационарный белый шум с интенсивностью  $D_n$ ,  $\gamma$  — множитель, характеризующий полосу входного шума. Таким образом, нам заданы следующие статистические характеристики входного процесса  $x(t)$  [5]:

$$\langle x(t) \rangle = 0, \quad D_x = D_n/2\gamma, \quad B_x[\tau] = D_x e^{-\gamma|\tau|},$$

где  $\langle x(t) \rangle$  — среднее значение (здесь и далее под угловыми скобками будем понимать скобки статистического усреднения),  $D_x$  — интенсивность,  $B_x[\tau]$  — ковариационная функция входного процесса  $x(t)$ , в силу стационарности входного процесса зависящая от разности моментов времени  $\tau$ .

Вольт-амперная характеристика диода Шоттки с  $\delta$ -легированием имеет вид

$$i(t) = I(v) = I_s \exp\left(-\frac{\alpha v}{V_T}\right) \left[ \exp\left(\frac{v}{\eta V_T}\right) - 1 \right]. \quad (3)$$

Здесь  $\eta$  — коэффициент неидеальности,  $\alpha = l/L$  ( $l$  — ширина туннельного барьера на границе с металлом,  $L$  — ширина барьера Мотта,  $\alpha \sim 0.04-0.08$ ),  $V_T = kT/q$  — тепловой потенциал, определяемый постоянной Больцмана  $k$ , абсолютной температурой  $T$  и зарядом электрона  $q$ ,  $I_s$  — характерный ток,  $v$  — напряжение на диоде.

Уравнения, определяющие установившиеся значения куमुлянтов [5]:

$$\langle y \rangle = \langle F \rangle_G, \quad (4)$$

$$\langle y, x \rangle = a \langle F' \rangle_G [\gamma + a(1 + \langle F' \rangle_G)]^{-1} D_x, \quad (5)$$

$$D_y = \langle F' \rangle_G [1 + \langle F' \rangle_G]^{-1} \langle y, x \rangle. \quad (6)$$

Здесь под  $\langle F' \rangle_G$  понимается производная по аргументу функции, усредненная в предположении его гауссовости.

Исходя из (3), где  $v = x - y$ , и учитывая, что  $\langle x \rangle = 0$ , находим

$$\begin{aligned} \langle F \rangle_G = & RI_s \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right) \langle y \rangle + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 (D_x - 2\langle y, x \rangle + D_y)\right] - \\ & - RI_s \exp\left[\frac{\alpha}{V_T} \langle y \rangle + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{V_T}\right)^2 (D_x - 2\langle y, x \rangle + D_y)\right], \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle F' \rangle_G = & RI_s \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right) \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right) \langle y \rangle + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 (D_x - 2\langle y, x \rangle + D_y)\right] + \\ & + RI_s \frac{\alpha}{V_T} \exp\left[\frac{\alpha}{V_T} \langle y \rangle + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{V_T}\right)^2 (D_x - 2\langle y, x \rangle + D_y)\right]. \quad (8) \end{aligned}$$

Подставляя (4)–(6) в (7) и (8), получаем систему

$$\begin{aligned} \langle y \rangle = & RI_s \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right) \langle y \rangle + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 \left(D_x - 2\frac{a \langle F' \rangle_G}{\gamma + a(1 + \langle F' \rangle_G)} D_x + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\langle F' \rangle_G}{1 + \langle F' \rangle_G} \frac{a \langle F' \rangle_G}{\gamma + a(1 + \langle F' \rangle_G)} D_x\right)\right] - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - RI_s \exp\left[\frac{\alpha}{V_T} \langle y \rangle + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{V_T}\right)^2 \left(D_x - 2\frac{a \langle F' \rangle_G}{\gamma + a(1 + \langle F' \rangle_G)} D_x + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\langle F' \rangle_G}{1 + \langle F' \rangle_G} \frac{a \langle F' \rangle_G}{\gamma + a(1 + \langle F' \rangle_G)} D_x\right)\right], \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle F' \rangle_G = & RI_s \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right) \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right) \langle y \rangle + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 \left(D_x - 2\frac{a \langle F' \rangle_G}{\gamma + a(1 + \langle F' \rangle_G)} D_x + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\langle F' \rangle_G}{1 + \langle F' \rangle_G} \frac{a \langle F' \rangle_G}{\gamma + a(1 + \langle F' \rangle_G)} D_x\right)\right] + \\ & + RI_s \frac{\alpha}{V_T} \exp\left[\frac{\alpha}{V_T} \langle y \rangle + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{V_T}\right)^2 \left(D_x - 2\frac{a \langle F' \rangle_G}{\gamma + a(1 + \langle F' \rangle_G)} D_x + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\langle F' \rangle_G}{1 + \langle F' \rangle_G} \frac{a \langle F' \rangle_G}{\gamma + a(1 + \langle F' \rangle_G)} D_x\right)\right], \quad (10) \end{aligned}$$

$$D_y = \frac{\langle F' \rangle_G}{1 + \langle F' \rangle_G} \frac{a \langle F' \rangle_G}{\gamma + a(1 + \langle F' \rangle_G)} D_x. \quad (11)$$

### Численное решение системы уравнений

Для численного решения системы трансцендентных уравнений (9)–(11) применялись программные средства системы MATLAB 6.5.

Для дальнейшего анализа, аналогично [6], удобно ввести следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\begin{aligned} \sigma = \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 D_x, \quad m = \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right) \langle y \rangle, \\ D = \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 D_y. \end{aligned}$$

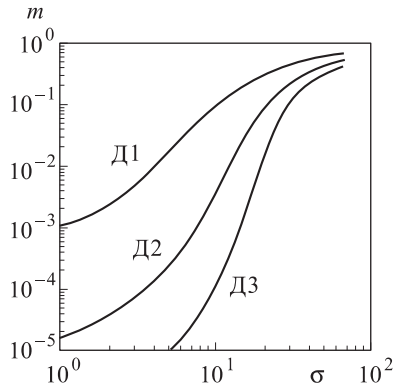
Первая переменная  $\sigma$  пропорциональна мощности возмущающего шума, вторая  $m$  является безразмерным средним значением и третья  $D$  — дисперсией безразмерной выходной переменной.

Для численного решения системы уравнений (9)–(11) выбирались параметры ВАХ реальных диодов Шоттки с  $\delta$ -легированием, которые исследовались ранее [7, 8]. Параметры ВАХ этих диодов приведены в таблице. Диоды отличаются значениями характерного тока, который определяется, в частности эффективной высотой барьера, зависящей от параметров  $\delta$ -легирования, в том числе от поверхностной концентрации атомов донорной примеси [3, 4].

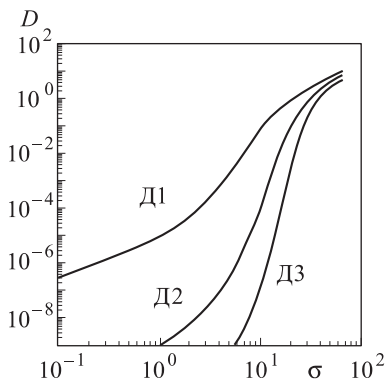
Параметры ВАХ диодов Шоттки с  $\delta$ -легированием

Параметр	Д1	Д2	Д3
$I_s$ , А	$5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$
$\eta$	1.21	1.21	2.2
$\alpha$	0.08	0.08	0.04
$R$ , Ом	10	3	10

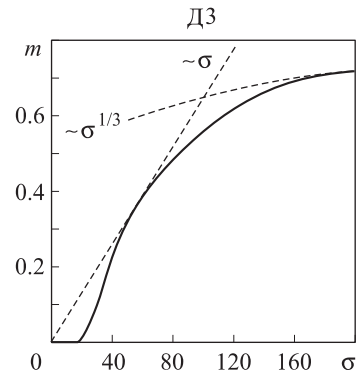
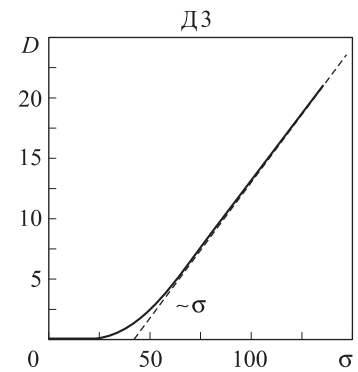
На рис. 2 представлены зависимости  $m$  от  $\sigma$  для трех различных наборов параметров ВАХ диодов Д1, Д2 и Д3.

Рис. 2. Зависимость  $m(\sigma)$ 

Зависимости  $D = D(\sigma)$  приведены на рис. 3 для тех же значений параметров ВАХ диодов Д1, Д2 и Д3.

Рис. 3. Зависимость  $D(\sigma)$ 

Анализ полученных зависимостей показывает, что безразмерное среднее значение сначала при малых  $\sigma$  возрастает с ростом  $\sigma$  медленно, а затем скорость роста увеличивается. Такое поведение связано с тем, что при малой мощности действующей на вход шума нелинейность детектора, отвечающая за постоянную составляющую, сказывается сравнительно мало и начинает играть заметную роль при относительно больших значениях  $\sigma$ . Последующее уменьшение скорости роста  $m$  связано с тем, что появившаяся постоянная составляющая из-за отрицательной обратной связи непрерывно сдвигает рабочую точку нелинейного элемента в область меньшей крутизны так, что при больших значениях мощности входного шума постоянная составляющая на выходе становится пропорциональной этой мощности. При дальнейшем росте мощности входного шума приходим к зависимости  $m \sim \sqrt[3]{\sigma}$ . На рис. 4 показана зависимость  $m(\sigma)$  в линейном масштабе для диода Д3. Эта зависимость при относительно больших значениях мощности входного шума полностью совпадает с зависимостью, полученной в работе [6]. Это означает, что мы переходим в режим безынерционного детектирования. На рис. 5 показана зависимость  $D(\sigma)$  в линейном масштабе для диода Д3. При относительно больших  $\sigma$  дисперсия безразмерной выходной переменной растет линейно с увеличением безразмерной дисперсии входного процесса  $D \sim \sigma$ , что также указывает на режим безынерционного детектирования.

Рис. 4. Зависимость  $m(\sigma)$  для диода Д3. Линейный масштабРис. 5. Зависимость  $D(\sigma)$  для диода Д3. Линейный масштаб

Из полученных графиков видно, что качественно зависимости ведут себя одинаково для всех диодов, однако имеются некоторые количественные различия. Введем безразмерный параметр  $A = \frac{I_s R}{\eta V_T}$ , характеризующий нелинейный элемент вместе со степенью обратной связи. Можно показать [7], что  $\frac{I_s R}{\eta V_T} = \frac{1}{R_{D0}}$ , где  $R_{D0}$  — дифференциальное сопротивление диода Шоттки с  $\delta$ -легированием при нулевом напряжении  $v = 0$ . Таким образом, коэффициент  $A = R/R_{D0}$  можно рассматривать как безразмерный коэффициент обратной связи. Безразмерный коэффициент обратной связи, рассчитанный для диодов Д1, Д2 и Д3 имеет значения  $2 \cdot 10^{-2}$ ,  $6 \cdot 10^{-5}$ ,  $7 \cdot 10^{-6}$  соответственно. Таким образом, из рис. 2 и 3 видно, что с ростом коэффициента обратной связи  $A$  рост зависимостей  $m = m(\sigma)$  и  $D = D(\sigma)$  происходит быстрее.

### Заключение

Исследован вопрос нахождения выходных статистических характеристик при инерционном детектировании стационарного шума с использованием диода Шоттки с  $\delta$ -легированием. Зависимости выходных параметров от входных получены в гауссовом приближении. Анализ полученных зависимостей позволил выявить особенности поведения среднего значения и дисперсии выходного шума при малой интенсивности возмущающего шума. Показано, что при относительно большой дисперсии входного шума имеет место переход в режим безынерционного детектирования.

Автор выражает благодарность группе В.И. Шашкина (Институт физики микроструктур РАН) за предоставленные диоды Шоттки с  $\delta$ -легированием.

Работа выполнена при финансовой поддержке приоритетного национального проекта «Образование», программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (госконтракт № П2606).

### Список литературы

1. Шашкин В.И., Вакс В.Л., Данильцев В.М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. **48**, № 6. С. 544.
2. Shashkin V.I., Drjagin Yu.A., Zakatov V.R. et al. // Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves. 2007. **28**, N 11. P. 945.
3. Шашкин В.И., Мурель А.В., Данильцев В.М., Хрыкин О.И. // Физика и техника полупроводников. 2002. **36**, № 5. С. 537.
4. Шашкин В.И., Мурель А.В. // Физика и техника полупроводников. 2004. **38**, № 5. С. 574.
5. Малахов А.Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. М., 1978.
6. Клюев А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2011. № 3. С. 20.
7. Yakimov A.V., Klyuev A.V., Shmelev E.I. et al. // Proc. 20th Intern. Conf. «Noise and Fluctuations, ICNF 2009». Pisa, Italy, 2009. P. 225.
8. Клюев А.В. Низкочастотные шумы в наноразмерных полупроводниковых структурах: источники, измерение, методы анализа. LAP, 2011.

## Inertial detecting of noise by Schottky diode with $\delta$ -doping

A. V. Klyuev

*Department of Bionics and Statistical Radiophysics, Faculty of Radiophysics, N.I. Lobachevsky Nizhniy Novgorod State University, Gagarin ave. 23, N. Novgorod 603950, Russia.*

*E-mail: klyuev@rf.unn.ru.*

Investigated the simplest statistical characteristics of process after inertial detecting of noise by Schottky diode with  $\delta$ -doping.

*Keywords:* Schottky diode, delta doping, current-voltage characteristic, detecting, cumulant functions.

*PACS:* 72.70.+m, 07.57.Kp, 05.40.-a.

*Received 21 December 2011.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2012).

### Сведения об авторе

Клюев Алексей Викторович — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; тел.: (831) 465-61-53; e-mail: klyuev@rf.unn.ru.