

УДК 621.391.822

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫХОДНОГО ПРОЦЕССА
ПРИ БЕЗЫНЕРЦИОННОМ ДЕТЕКТИРОВАНИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИОДА ШОТТКИ С δ -ЛЕГИРОВАНИЕМ**

© 2011 г.

А.В. Клюев

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

klyuev@rf.unn.ru

Поступила в редакцию 17.01.2011

Исследован вопрос нахождения среднего значения и дисперсии выходного процесса при безынерционном детектировании случайного стационарного процесса с учётом обратной связи с использованием диода Шоттки с δ -легированием. Зависимости выходных параметров от входных получены в гауссовом приближении.

Ключевые слова: диод Шоттки, дельта-легирование, вольтамперная характеристика, детектирование, кумулянтные функции.

Введение

Одним из основных чувствительных нелинейных элементов, используемых при детектировании микроволнового излучения является диод с барьером Шоттки.

В ряде случаев было бы желательно уменьшить эффективную высоту барьера диода Шоттки и тем самым получить детектор сигналов или умножитель частоты, работающий без постоянного смещения. В работах [1–4] показана перспективность использования технологии δ -легирования для изготовления низкобарьерных диодов.

Важной задачей является нахождение статистических характеристик выходного процесса при детектировании диодами такого типа случайного процесса с учётом обратной связи. Вообще говоря, всякое реальное детектирование, как правило, происходит с обратной связью, которую обеспечивает присутствие сопротивления нагрузки.

Если в качестве входной переменной выбрать приложенное напряжение, а в качестве выходной – ток через нагрузочное сопротивление, то при детектировании, т.е. при нелинейном безынерционном (отсутствует ёмкость) преобразовании с обратной связью с использованием диода Шоттки с δ -легированием не имеется явного выражения выходной переменной через входную, т.е. преобразование является неявным.

Таким образом, возникает задача нахождения выходных статистических характеристик

при неявных нелинейных преобразованиях случайного процесса с учётом обратной связи.

Точное отыскание статистических характеристик выходного случайного процесса при нелинейном безынерционном преобразовании с обратной связью, заданном в неявном виде, является в общем случае сложной операцией.

Для приближённого нахождения первых двух кумулянтных функций выходной переменной (а только они и будут нас интересовать) можно применять различные приёмы. Можно, например, попытаться найти точные решения в двух различных предельных случаях: при слабой связи и при сильной обратной связи. С другой стороны, можно принять гауссову аппроксимацию совокупности входной и выходной переменных.

Задача о безынерционном детектировании с обратной связью, где в качестве нелинейного элемента используется «обычный» диод, известна [5]. Решение получено в рамках гауссовой аппроксимации совокупности.

В данной работе также в рамках гауссовой аппроксимации совокупности входной и выходной переменных исследуется более сложный случай нахождения выходных статистических характеристик, когда в качестве нелинейного элемента используется диод Шоттки с δ -легированием.

Модель детектора

Исследуем детектирование случайного стационарного процесса с учётом обратной связи.

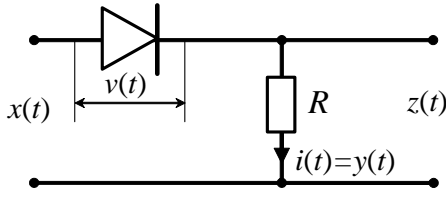


Рис. 1. Схема безынерционного детектора

Рассмотрим схему безынерционного детектора Шоттки с δ -легированием, изображённую на рис. 1.

Эта схема описывается уравнениями

$$x(t) = v(t) + z(t), \quad z(t) = i(t)R, \quad i(t) = f(v), \quad (1)$$

где $f(v)$ – вольтамперная характеристика (ВАХ) диода Шоттки с δ -легированием.

Возьмём в качестве выходной координаты ток через нагрузочное сопротивление: $y(t) = i(t)$. Тогда $y(t) = f(x - Ry)$. В таких переменных роль сопротивления нагрузки как обратной связи отчётливо видна.

Вольтамперная характеристика диода Шоттки с δ -легированием имеет вид:

$$i(t) = f(v) = I_s \exp\left(-\frac{\alpha v}{V_T}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{v}{\eta V_T}\right) - 1 \right]. \quad (2)$$

Здесь η – коэффициент неидеальности, α – относительная толщина δ -слоя ($\alpha \sim 0.04 - 0.08$), $V_T = kT/q$ – тепловой потенциал, определяемый постоянной Больцмана k , абсолютной температурой T и зарядом электрона q , I_s – характерный ток.

Рассмотрим гауссово приближение, положив среднее значение входной переменной равным нулю: $\langle x(t) \rangle = 0$ (здесь и далее под угловыми скобками будем понимать скобки статистического усреднения).

Зависимость постоянной составляющей m_y и дисперсии D_y выходной переменной от дисперсии на входе D_x найдём с помощью известного метода ковариационных рядов [5], учитывая, что нелинейное преобразование является неявным:

$$m_y = \langle f \rangle, \quad D_y = \langle f' \rangle^2 [1 + R \langle f' \rangle]^{-2} D_x, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \langle f \rangle &= I_s \left\langle e^{\left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)v} \right\rangle - I_s \left\langle e^{-\frac{\alpha}{V_T}v} \right\rangle, \\ \langle f' \rangle &= \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T} \right) \langle f \rangle + \frac{I_s}{\eta V_T} \left\langle e^{-\frac{\alpha}{V_T}v} \right\rangle. \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку v также гауссово, т.к. рассматривается гауссова аппроксимация, а переменная $v = x - Ry$ при этой аппроксимации также имеет гауссово распределение, то

$$\begin{aligned} \left\langle e^{\left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)v} \right\rangle &= \\ &= \exp\left[\left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)\langle v \rangle + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 D_v\right], \\ \left\langle e^{-\frac{\alpha}{V_T}v} \right\rangle &= \exp\left[-\frac{\alpha}{V_T}\langle v \rangle + \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{V_T}\right)^2 D_v\right], \end{aligned}$$

где, как очевидно,

$$\langle v \rangle = -R \langle y \rangle, \quad D_v = [1 + R \langle f' \rangle]^{-2} D_x.$$

Следовательно, для m_y и D_y получаем систему трансцендентных уравнений (5)–(7):

$$\begin{aligned} m_y &= \frac{1}{\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}} \left[\langle f' \rangle - I_s \frac{1}{\eta V_T} \times \right. \\ &\times \left. \exp\left(\frac{\alpha}{V_T} R m_y + \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{V_T}\right)^2 [1 + R \langle f' \rangle]^{-2} D_x\right) \right], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \langle f' \rangle &= I_s \frac{1}{\eta V_T} \exp\left[\left(\frac{\alpha}{V_T} - \frac{1}{\eta V_T}\right) R m_y + \right. \\ &\left. + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 [1 + R \langle f' \rangle]^{-2} D_x\right] + \end{aligned} \quad (6)$$

$$+ I_s \frac{\alpha}{V_T} \exp\left[\frac{\alpha}{V_T} R m_y + \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{V_T}\right)^2 [1 + R \langle f' \rangle]^{-2} D_x\right],$$

$$D_y = \langle f' \rangle^2 [1 + R \langle f' \rangle]^{-2} D_x. \quad (7)$$

Численное решение системы уравнений

Для численного решения системы трансцендентных уравнений (5)–(7) применяются программные средства системы MATLAB 6.5.

Для дальнейшего анализа удобно ввести следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\rho = \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 D_x, \quad m = \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right) R m_y,$$

Параметры ВАХ диодов Шоттки с δ -легированием

Параметр	«D-600»	«D-40k»	«D-330k»
I_s, A	$5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$
η	1.21	1.21	2.2
α	0.08	0.08	0.04
$R, \text{ Ом}$	10	3	10

$$D = \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T} \right)^2 R^2 D_y, \quad \mu = R \langle f' \rangle.$$

Первая переменная ρ является безразмерной дисперсией входного случайного процесса, вторая m и третья D являются безразмерным средним значением и дисперсией безразмерной выходной переменной, равной $\left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T} \right) R y$.

Последний параметр μ является промежуточной переменной.

Для численного моделирования выберем параметры ВАХ реальных диодов Шоттки с δ -легированием, которые исследовались ранее [6]. Параметры ВАХ этих диодов приведены в таблице ниже.

На рис. 2 представлены зависимости m от ρ для трёх различных наборов параметров ВАХ диодов «D-600», «D-40k» и «D-330k».

Зависимости $D=D(\rho)$ приведены на рис. 3 для тех же значений параметров ВАХ диодов «D-600», «D-40k» и «D-330k».

Анализ полученных графиков показывает, что при большой дисперсии входного процесса $m \sim \sqrt[3]{\rho}$, $D \sim \rho$. При малой дисперсии входного процесса рост безразмерного среднего значения и дисперсии безразмерной выходной переменной в зависимости от безразмерной дисперсии входного случайного процесса оказывается несколько более быстрым. Эти закономерности можно объяснить тем, что при малой мощности входного шума эффект детектирования обусловлен только первыми членами в разложении вольтамперной характеристики диода Шоттки с δ -легированием, а при больших мощностях на эффекте детектирования сказываются все нелинейности.

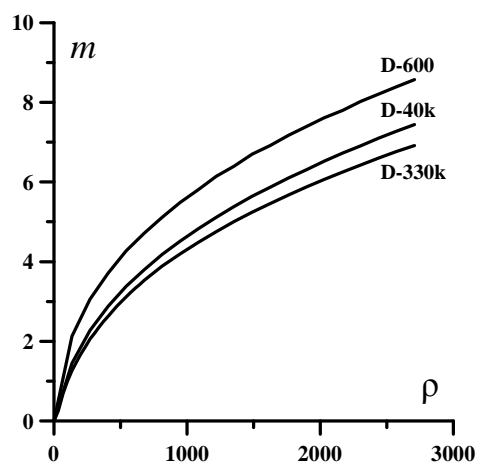
Из полученных графиков видно, что качественно зависимости ведут себя одинаково для всех диодов, однако имеются некоторые количественные различия. Введём безразмерный параметр $A = \frac{I_s R}{\eta V_T}$, характеризующий нелинейный элемент вместе со степенью обратной

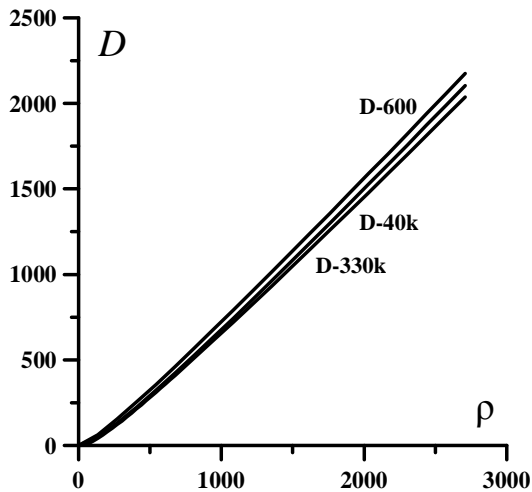
связи. Можно показать [6], что $\frac{I_s}{\eta V_T} = \frac{1}{R_{D0}}$, где

R_{D0} – дифференциальное сопротивление диода Шоттки с δ -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 «D-600», «D-40k» и «D-330k» имеет значение $2 \cdot 10^{-2}$, $6 \cdot 10^{-5}$, $7 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Таким образом, из рис. 2 и рис. 3 видно, что с ростом коэффициента обратной связи A графики $m = m(\rho)$ и $D = D(\rho)$ сдвигаются вдоль оси ординат вверх.

С точки зрения приложений, полезно оценить роль обратной связи в статистических характеристиках выходного процесса. Если $A \ll 1$, то влияние обратной связи мало и имеет место обычное нелинейное безынерционное преобразование, если же $A \gg 1$, то детектируется небольшая часть входного процесса и система является практически линейной.

Следует отметить, что несмотря на более сложный вид вольтамперной характеристики диода Шоттки с δ -легированием (2) по сравнению с вольтамперной характеристикой «обычного» диода, проанализированные зависимости при большой дисперсии входного процесса практически совпадают с аналогичными зави-

Рис. 2. Зависимость $m(\rho)$

Рис. 3. Зависимость $D(\rho)$

симостями, полученными в работе [5] для «обычного» диода. Это объясняется тем, что для реальных исследованных диодов выполняется соотношение $\alpha/V_T < 1/(\eta V_T)$, например, для диода «D-600» различие составляет более десяти раз. Таким образом, из системы уравнений (5)–(7) видно, что основную роль играет член $1/(\eta V_T)$, который, в свою очередь, определяет вольтамперную характеристику «обычного» диода.

Заключение

Исследован вопрос нахождения статистических характеристик выходного процесса при детектировании случайного стационарного процесса с учётом обратной связи с использованием диода Шоттки с δ -легированием. Получены зависимости выходных параметров от входных после детектирования с использованием диода Шоттки с δ -легированием стационарного случайного процесса в гауссовом приближении. Анализ полученных зависимостей показал, что при большой дисперсии входного процесса безразмерное среднее значение растёт пропорционально кубическому корню из без-

размерной дисперсии входного случайного процесса, а дисперсия безразмерной выходной переменной растёт линейно с увеличением безразмерной дисперсии входного процесса.

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

Решаемые задачи связаны с работами, выполняемыми по приоритетному национальному проекту «Образование». Исследования проведены при поддержке программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (Государственные контракты № 02.740.11.0163, № 02.740.11.0003 и № П2606) и программы «У.М.Н.И.К.–08–3» (государственный контракт № 7686р/11191).

Список литературы

1. Шашкин В.И., Вакс В.Л., Данильцев В.М. и др. Микроволновые детекторы на основе низкобарьерных планарных диодов Шоттки и их характеристики // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48. Вып. 6. С. 544–551.
2. Shashkin V.I., Drjagin Yu.A., Zakamov V.R. et al. Millimeter-wave Detectors Based on Antenna-coupled Low-barrier Schottky Diodes // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2007. V. 28. № 11. P. 945–952.
3. Шашкин В.И., Мурель А.В., Данильцев В.М., Хрыкин О.И. Управление характером токопереноса в барьере Шоттки с помощью δ -легирования: расчет и эксперимент для Al/GaAs // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. Вып. 5. С. 537–542.
4. Шашкин В.И., Мурель А.В. Теория туннельного токопереноса в контактах металл–полупроводник с приповерхностным изотипным δ -легированием // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. Вып. 5. С. 574–579.
5. Малахов А. Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. М.: Советское радио, 1978. 376 с.
6. Yakimov A.V., Klyuev A.V., Shmelev E.I. et al. 1/F noise in Si delta-doped Schottky diodes // Proc. 20-th Int. Conf. «Noise and Fluctuations, ICNF 2009». Pisa, Italy, 14–19 June 2009. P. 225–228.

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF OUTPUT PROCESS IN INERTIALESS DETECTION WITH A Δ -DOPED SCHOTTKY DIODE

A. V. Klyuev

We study the problem of finding the mean and variance of the output process in inertialess feedback detection of a random stationary process with a δ -doped Schottky diode. The dependences of the output parameters on the input ones are obtained in the Gaussian approximation.

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