РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Безынерционное детектирование случайного процесса с учетом обратной связи с использованием диода Шоттки с δ-легированием

А. В. Клюев

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

Статья поступила 22.11.2010, подписана в печать 29.12.2010

Исследован вопрос нахождения среднего значения и дисперсии выходного процесса при безынерционном детектировании случайного стационарного процесса с учетом 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.
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 δ-легирования для изготовления низкобарьерных диодов.

Важной задачей при исследовании шумов [5] является нахождение статистических характеристик процесса на выходе детекторов такого типа. Вообще говоря, всякое реальное детектирование, как правило, происходит с обратной связью, которую обеспечивает сопротивление нагрузки.

Задача о безынерционном (отсутствует емкость) детектировании с обратной связью, где в качестве нелинейного элемента используется «обычный» диод, известна [6]. В настоящей работе в рамках гауссовой аппроксимации совокупности входной и выходной переменной исследуется более сложный случай нахождения выходных статистических характеристик, когда в качестве нелинейного элемента используется диод Шоттки с δ-легированием.

Эквивалентная схема детектора

Рассмотрим детектирование случайного стационарного процесса с учетом обратной связи. Схема безынерционного детектора Шоттки с δ-легированием изображена на рис. 1.

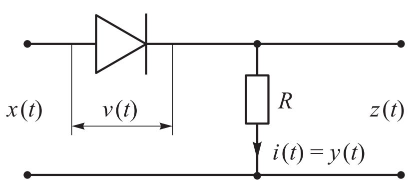

Рис. 1. Схема безынерционного детектора

Эта схема описывается уравнениями

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

где $x(t)$ — входная переменная, соответствующая приложенному к детектору напряжению; $v(t)$ — напряжение, выделяющееся на переходе Шоттки; $z(t)$ — напряжение, выделяющееся на сопротивлении R; $f(v)$ — вольтамперная характеристика (ВАХ) диода Шоттки с δ-легированием.

Возьмем 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 отчетливо видна. При этом выходная переменная в момент t определяется значением входной переменной в тот же момент.

Вольтамперная характеристика диода Шоттки с δ-легированием имеет вид

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

Здесь η — 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.

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

Точное отыскание статистических характеристик выходного случайного процесса при нелинейном безынерционном преобразовании с обратной связью, заданном в неявном виде, является в общем случае сложной операцией. При этом предположение о гауссовости входной переменной нисколько не упрощает решение задачи. Если же не ставить вопроса о точном нахождении всех статистических характеристик выходной переменной, а приближенно взять неизвестное распределение в виде модельного, т. е. ограничиться нахождением конечного числа кумулянтных функций, то задача существенно упрощается. Наиболее просто задача решается, если принять гауссову аппроксимацию совокупности входной и выходной переменной.

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

Зависимость постоянной составляющей m_y и дисперсии D_y выходной переменной от дисперсии входа D_x найдем с помощью известного метода ковариационных рядов [6], учитывая, что нелинейное преобразование является неявным:

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

где

$$\langle f \rangle = I_s \left\langle \exp\left[\left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right) v\right]\right\rangle - I_s \left\langle \exp\left(-\frac{\alpha}{V_T} v\right)\right\rangle,$$

$$\langle f' \rangle = \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right) \langle f \rangle + \frac{I_s}{\eta V_T} \left\langle \exp\left(-\frac{\alpha}{V_T} v\right)\right\rangle. \tag{4}$$

Переменная $v = x - Ry$ в рамках рассматриваемой гауссовой аппроксимации также имеет гауссово распределение, поэтому

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

$$\left\langle \exp\left(-\frac{\alpha}{V_T} v\right)\right\rangle = \exp\left(-\frac{\alpha}{V_T}\langle v \rangle + \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{V_T}\right)^2 D_v\right),$$

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

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

$$\langle f' \rangle = I_s \frac{1}{\eta V_T} \exp\left[\left(\frac{\alpha}{V_T} - \frac{1}{\eta V_T}\right) R m_y + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 (1 + R\langle f' \rangle)^{-2} D_x\right] + I_s \frac{\alpha}{V_T} \exp\left[\frac{\alpha}{V_T} R m_y + \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{V_T}\right)^2 (1 + R\langle f' \rangle)^{-2} D_x\right], \tag{6}$$

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

Результаты численного решения системы уравнений

Система трансцендентных уравнений (5)–(7) решалась численными методами с использованием программных средств системы MATLAB 6.5.

Для численного решения системы уравнений (5)–(7) выбирались параметры ВАХ типичных диодов Шоттки с δ-легированием [5]. Параметры ВАХ этих диодов приведены в таблице.

Параметры ВАХ диодов Шоттки с δ-легированием

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

Так как система уравнений (5)–(7) является трансцендентной, то искомые зависимости $m_y = m_y(D_x)$, $D_y = D_y(D_x)$ проще всего изобразить графически. Для удобства графического анализа удобно ввести следующие безразмерные переменные и параметры:

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

$$D = \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 R^2 D_y.$$

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

На рис. 2 представлены зависимости безразмерного среднего значения m от безразмерной дисперсии входного случайного процесса σ для трех различных наборов параметров ВАХ диодов Д1, Д2 и Д3.

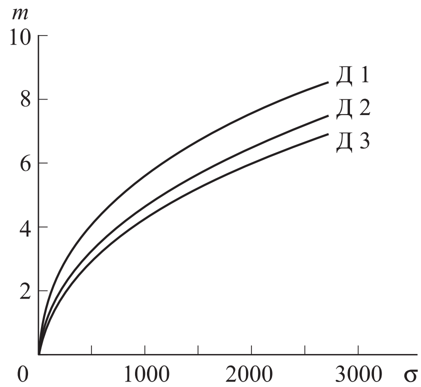

Рис. 2. Зависимость $m(\sigma)$

Зависимости дисперсии безразмерной выходной переменной от безразмерной дисперсии входного случайного процесса $D = D(\sigma)$ приведены на рис. 3 для тех же значений параметров ВАХ диодов Д1, Д2 и Д3.

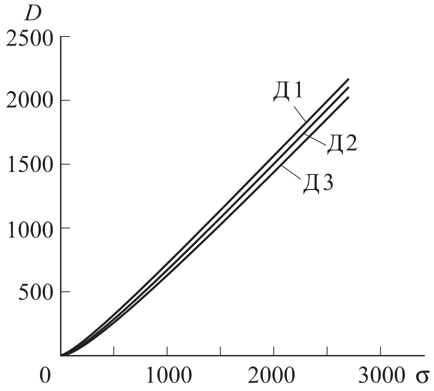

Рис. 3. Зависимость $D(\sigma)$

Анализ полученных зависимостей показывает, что при малой дисперсии входного процесса $m\sim\sigma^2$, $D\sim\sigma^3$. При большой дисперсии входного процесса безразмерное среднее значение растет пропорционально кубическому корню из безразмерной дисперсии входного случайного процесса $m\sim\sqrt[3]{\sigma}$, а дисперсия безразмерной выходной переменной растет линейно с увеличением безразмерной дисперсии входного процесса $D\sim\sigma$. 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.

Как показывают результаты численных расчетов, представленные на графиках (см. рис. 2, 3), качественно зависимости ведут себя одинаково для всех диодов, однако имеются некоторые количественные различия. Введем безразмерный параметр $A=\frac{I_sR}{\eta V_T}$, характеризующий диод вместе со степенью обратной связи. Можно показать [5], 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 Д1, Д2 и Д3, имеет значение $2\cdot10^{-2}$, $6\cdot10^{-5}$, $7\cdot10^{-6}$ соответственно. Таким образом, из рис. 2 и 3 следует, что с ростом коэффициента обратной связи A увеличиваются скорость роста безразмерного среднего значения $m=m(\sigma)$ и дисперсии безразмерной выходной переменной $D=D(\sigma)$ в зависимости от безразмерной дисперсии входного случайного процесса σ.

Полезно оценить роль обратной связи в статистических характеристиках выходного процесса. Если $A\ll1$, то влияние обратной связи мало́ и имеет место обычное нелинейное безынерционное преобразование, если же $A\gg1$, то детектируется небольшая часть входного процесса и система является практически линейной.

Следует отметить, что при малой дисперсии входного процесса безразмерное среднее значение растет быстрее по сравнению со случаем «обычного» диода (где наблюдается линейная зависимость), что можно объяснить наличием экспоненты в уравнении (5), обусловленной α. Дисперсия безразмерной выходной переменной растет практически так же, как и для «обычного» диода ($D\sim\sigma^3$), что качественно объясняется тем, что уравнение (7) по форме совпадает с аналогичным уравнением для «обычного» диода, в уравнение (6) входит сумма двух экспонент с близкими показателями, что мало отличает это уравнение от случая «обычного» диода, где присутствует одна экспонента. Отличие вносит только уравнение (5), что слабо сказывается на зависимости $D(\sigma)$. При большой дисперсии входного процесса полученные зависимости ведут себя аналогично зависимостям, полученным в работе [6] для «обычного» диода. Это объясняется тем, что для типичных диодов рассмотренного типа отношение $1/(\eta V_T)$ превышает отношение α/V_T более чем в десять раз. Таким образом (как видно из системы уравнений (5)–(7)), вклад, обусловленный введением δ-слоя, оказывается малым.

Заключение

Исследован вопрос нахождения статистических характеристик выходного процесса при детектировании случайного стационарного процесса с учетом обратной связи с использованием диода Шоттки с δ-легированием в гауссовом приближении. При малой дисперсии входного процесса σ безразмерное среднее значение и дисперсия входного процесса зависят от σ как $m\sim\sigma^2$, $D\sim\sigma^3$, а при большой дисперсии входного процесса полученные зависимости ведут себя аналогично зависимостям, полученным для «обычного» диода. Рассмотрены предельные случаи слабой обратной связи, при которой имеет место обычное нелинейное безынерционное детектирование, и сильной обратной связи, при которой детектируется небольшая часть входного процесса и система является практически линейной.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке приоритетного национального проекта «Образование», программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (гос. контракты № 02.740.11.0163, № 02.740.11.0003 и № П2606) и программы «УМНИК-08-3» (гос. контракт № 7686р/11191).

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., Zakamov V.R.* et al. // Int. J. 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. *Yakimov A.V., Klyuev A.V., Shmelev E.I.* et al. // Proc. 20th Int. Conf. «Noise and Fluctuations (ICNF) 2009». Pisa (Italy), 2009. P. 225.
6. *Малахов А.Н.* Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. М., 1978.

Noninertial feed-back detecting of random process by Schottky diode with δ–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 average value and dispersion of process after noninertial feed-back detecting of random stationary process by Schottky diode with δ-doping. Dependences of output parameters from input are received in Gaussian approach.

Keywords: Schottky diode, delta doping, current-voltage characteristic, detecting, cumulant functions.
PACS: 72.70.+m; 07.57.Kp; 05.40.–a.
Received 22 November 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2011).

Сведения об авторе

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