

ОЦЕНКА ПОРОГОВОЙ АМПЛИТУДЫ ВХОДНОГО СИГНАЛА СМЕСИТЕЛЯ НА БАЗЕ ДИОДА ШОТКИ

© 2016 г. А.В. КЛЮЕВ, А.В. ЯКИМОВ

Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского
e-mail: klyuev@rf.unn.ru

Введение

Диоды с барьером Шотки находят широкое применение в современной радио-электронной аппаратуре и устройствах вычислительной техники, в частности, в детекторах [1],[2], смесителях СВЧ, применяющихся в авиационной и ракетной технике, быстродействующих переключающих устройствах, элементах логических интегральных схем и т.д. Так, приемники доплеровских РЛС содержат смеситель. При этом принимаемый сигнал бывает достаточно малым. Поэтому необходимо требовать, чтобы смесительный диод имел минимально возможный уровень фликкерного шума [3],[4].

Параметры нелинейного элемента (в нашем случае диода Шотки) могут быть подвержены флуктуациям (порождаемым фликкерным шумом диода).

Эти флуктуации, во-первых, приводят к флуктуациям коэффициента передачи, что проявляется в виде амплитудных флуктуаций, вносимых в сигнал промежуточной частоты.

Во-вторых флуктуации параметров диода приводят к возникновению фликкерного шума в выходном сигнале смесителя. Этот шум ограничивает чувствительность смесителя к величине принимаемого сигнала.

Флуктуации коэффициента передачи смесителя на диоде Шотки

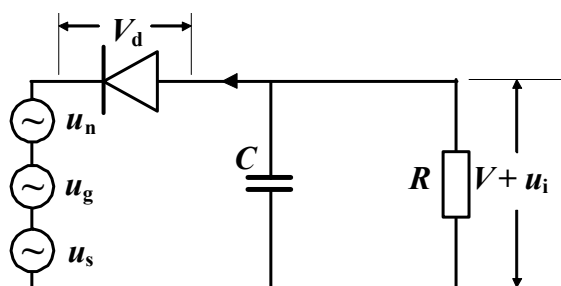


Рис.1. Эквивалентная схема смесителя

Рассмотрим эквивалентную схему смесителя [5], [6], изображённую на рис. 1.

На вход смесителя подаются напряжения гетеродина $u_g = V_g \cos(\omega_g t + \varphi_g)$ и сигнала $u_s = V_s \cos(\omega_s t + \varphi_s)$. В практических ситуациях амплитуда сигнала мала, $V_s \ll V_g$. Используя подход [5], считаем, что ёмкость C шунтирует нагрузки для частот ω_s и ω_g . Напряжение промежуточной частоты имеет вид $u_i = V_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$, где $\omega_i = |\omega_g - \omega_s|$. Модуль коэффициента передачи смесителя при этом имеет вид: $K = V_i / V_s$. Поэтому ис-

следуем напряжение $V + u_i$, выделяющееся на резисторе нагрузки R .

Параметры диода Шотки могут быть подвержены флуктуациям. Эти флуктуации, во-первых, приводят к флуктуациям коэффициента передачи, что проявляется в виде амплитудных флуктуаций, вносимых в сигнал промежуточной частоты $K = (1 + \delta K) = V_i(1 + m) / V_s$. Здесь введены в рассмотрение относительные флуктуации коэффициента передачи смесителя δK и относительные флуктуации амплитуды m . Во-вторых, появляется фликкерный шум диода $u_n(t)$, который проявляется как $v_n(t)$ в выходном сигнале смесителя. При этом фликкерный шум диода и шум в выходном сигнале смесителя связаны соотношением $v_n = [R / (R + R_d)] \cdot u_n$.

На рис. 1, $V = V_0 + v_n$ – «постоянная» составляющая, характеризующаяся невозможным значением V_0 и флуктуациям $v_n = v_n(t)$.

Измерения показали, что в вольтамперных характеристиках (ВАХ) исследованных диодов наряду с термоэлектронной компонентой (которая преобладает при относительно больших токах) проявляются дополнительные компоненты тока диода. Ранее в работе [7] при исследовании диодов Шоттки также были обнаружены дополнительные компоненты тока. Одна из компонент имеет квазиомический характер (утечка) и слабо проявляется при малых токах. Вторая компонента обусловлена механизмом термополевой эмиссии электронов сквозь вершину барьера на границе металл–полупроводник [8]. В отличие от работы [3], где основной компонентой считалась термоэлектронная, в настоящей работе в качестве основной рассматривается компонента термополевой эмиссии. Это объясняется тем, что термоэлектронная компонента преобладает в ВАХ при напряжениях и токах более 0.7 В и 10^{-3} А, соответственно. В то время как компонента термополевой эмиссии преобладает в диапазоне напряжений 0.1 – 0.7 В и токов 10^{-5} – 10^{-3} А. При напряжениях менее 0.1 В и токах менее 10^{-5} А в ВАХ заметно влияние линейной утечки. Так как нас интересует нелинейный режим работы прибора, то диапазон менее 0.1 В и менее 10^{-5} А здесь не анализируется. Таким образом, в работе [3] рассмотрен случай относительно больших токов и напряжений, а в настоящей работе рассматривается случай относительно малых. За исключением области очень малых смещений в прямом направлении вольтамперная характеристика диода Шоттки в случае механизма термополевой эмиссии имеет вид [8]:

$$I_d = I_s \cdot \exp\left(\frac{V_d}{E_0}\right), \quad (1)$$

где V_d – приложенное напряжение; $E_0 = E_{00} \operatorname{cth}(qE_{00}/kT)$ – параметр, определяемый постоянной Больцмана k , абсолютной температурой T и зарядом электрона q . Предэкспоненциальный множитель I_s слабо зависит от приложенного напряжения. Он является сложной функцией температуры, высоты барьера и параметров полупроводника. Параметр E_{00} , зависящий от природы полупроводника и степени его легирования, для полупроводника n -типа имеет вид:

$$E_{00} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{\frac{N_D}{\epsilon_s \epsilon_0 m^*}},$$

где $\epsilon_s \epsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость полупроводника, N_D – концентрация ионизованных доноров, m^* – эффективная масса электрона, \hbar – постоянная Планка.

Используя результаты работ [5] и [6] находим модуль коэффициента передачи смесителя:

$$K = \frac{V_i}{V_s} = \frac{I_{d0} R}{E_0 + I_{d0} R} \mu(\xi), \quad (2)$$

здесь I_{d0} – постоянная составляющая тока через диод, $\mu(\xi) = I_1(\xi)/I_0(\xi)$ – отношение модифицированных функций Бесселя первого и нулевого порядков, $\xi = V_g/E_0$ – безразмерная амплитуда сигнала гетеродина. За исключением области малых смещений постоянная составляющая тока I_{d0} через диод определяется трансцендентным уравнением

$$I_{d0} = I_s \left[I_0(\xi) \exp\left(-\frac{I_{d0} R}{E_0}\right) \right]. \quad (3)$$

С учётом введённых ранее флуктуаций, можно найти выражение для спектра относительных флуктуаций коэффициента передачи смесителя:

$$\langle \delta K^2 \rangle_f = \left[1 + \frac{I_{d0} R}{E_0} \right]^{-2} \frac{\langle v_n^2 \rangle_f}{V_0^2}. \quad (4)$$

Для оценок выберем параметры диодов, исследовавшихся в [9]. Структуры представляют собой планарные $TiAu/SiO_2/GaAs$ диоды Шоттки. В качестве подложек использовались пластины n^+ - $GaAs$. Измерения [9] показали, что при фиксированном

токе через диод спектр $\langle u_n^2 \rangle_f$ шумового напряжения $u_n(t)$, выделяющегося на диоде, имеет вид:

$$\langle u_n^2 \rangle_f = \frac{A}{f^\gamma}. \quad (5)$$

Здесь величина параметра формы спектра γ зависит от конкретного диода и принимает значения, близкие к единице, $\gamma \approx 1$. Значение A , определяющее высоту спектра на частоте 1 Гц, зависит как от типа и экземпляра диода, так и от тока через диод. Отметим, что выражение типа (5) справедливо не только для диодов Шотки, но и для других типов диодов, см., например, [10], [11].

Используя связь v_n с u_n можно получить выражение, связывающее спектр $\langle v_n^2 \rangle_f$ шумового напряжения $v_n(t)$ в выходном сигнале смесителя со спектром $\langle u_n^2 \rangle_f$ шумового напряжения $u_n(t)$, выделяющегося на диоде:

$$\langle v_n^2 \rangle_f = \left[\frac{R}{R + R_d} \right]^2 \langle u_n^2 \rangle_f. \quad (6)$$

Оценка пороговой величины амплитуды принимаемого сигнала

Используя выражения (5) и (6) и приняв $\gamma = 1$, определим мощность шума в заданной полосе частот Δf (в данном случае [1 Гц, 20 кГц]):

$$\langle v_n^2(\Delta f) \rangle = \int_{1\text{Гц}}^{20\text{кГц}} \frac{A}{f} \left[\frac{R}{R + R_d} \right]^2 df \approx 10A \left[\frac{R}{R + R_d} \right]^2.$$

Рассмотрим отношение сигнал/шум:

$$\text{SNR} = \frac{V_i^2 / 2}{\langle v_n^2(\Delta f) \rangle} = \frac{V_s^2 \cdot K^2 / 2}{\langle v_n^2(\Delta f) \rangle}.$$

Это отношение позволяет определить пороговую величину V_{s0} амплитуды принимаемого сигнала. При этом предполагается, что промежуточная частота лежит в указанном диапазоне частот. Если это не так, то шумы надо анализировать в другом диапазоне частот.

Приведём график зависимости (2) коэффициента передачи смесителя от амплитуды сигнала гетеродина (см. рис. 2).

Например, выберем порог обнаружения 3 дБ, то есть $\text{SNR} = 2$.

Зависимости величины пороговой амплитуды V_{s0} и эффективного напряжения шума в полосе частот Δf (в данном случае [1 Гц, 20 кГц]) от амплитуды сигнала гетеродина для $\text{SNR}=3$ дБ показаны на рис. 3.

Также на рис. 3 представлены зависимости величины пороговой амплитуды V_{s0} и эффективного напряжения шума в полосе частот Δf ([1 Гц, 20 кГц]) от амплитуды сигнала гетеродина для $\text{SNR}=10$ дБ.

На основании анализа рис. 3 представляется разумным использовать амплитуду сигнала гетеродина хотя бы на порядок большую, чем амплитуда принимаемого сигнала, т.е. 10^{-2} В.

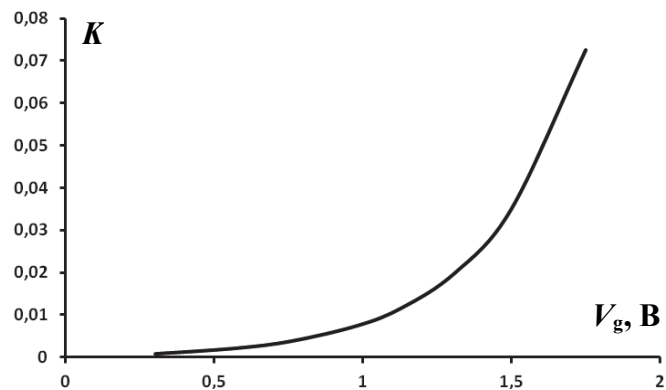


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи смесителя от амплитуды сигнала гетеродина.

Выводы

В работе исследованы шумы диода Шотки, входящего в состав смесителя. Получено выражение для спектральной плотности относительных флуктуаций коэффициента передачи смесителя на частоте f . Из отношения сигнал/шум определена поро-

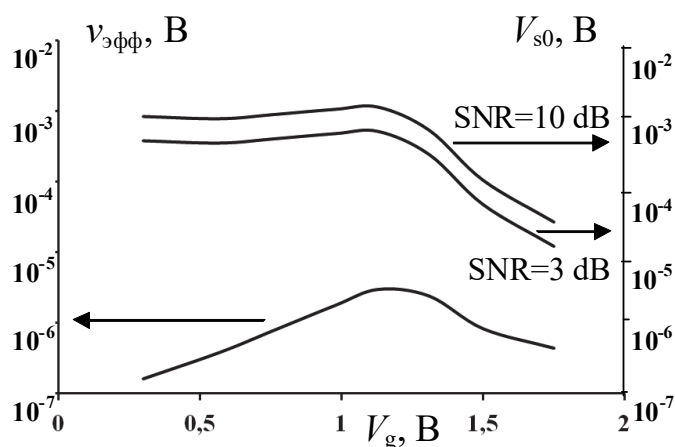


Рис. 3. Зависимости величины пороговой амплитуды V_{s0} и эффективного напряжения шума в полосе частот Δf (в диапазоне [1 Гц, 20 кГц]) от амплитуды сигнала гетеродина для SNR=3 дБ и SNR=10 дБ.

говая величина амплитуды принимаемого сигнала и её зависимость от амплитуды сигнала гетеродина.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России: государственное задание «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)», код проекта 2183. Работа поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев А.В. Безынерционное детектирование случайного процесса с учетом обратной связи с использованием диода Шоттки с δ -легированием // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. - 2011, № 3, с. 20-23.
2. Ключев А.В. Инерционное детектирование шума с использованием диода Шоттки с δ -легированием // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. - 2012, № 3, с. 13-16.
3. Ключев А.В., Рыжкин М.И., Ключев А.В. Оценка влияния флуктуаций коэффициента передачи смесителя на диоде Шоттки на форму спектральной линии колебания на выходе. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. - 2013. - Т.13.- № 3.- С. 105-108.
4. Maas S.A. Microwave Mixers, 2nd edition, Artech House, 1993. 335 p. ISBN 0-89006-605-1.
5. Гуткин Л.С. Преобразование сверхвысоких частот и детектирование (Вопросы теории и расчета). М.; Л. Госэнергоиздат, 1953. 415 с.
6. Малахов А.Н. Флуктуации коэффициента передачи смесителя на кристаллическом диоде // Известия ВУЗов. Радиофизика. - 1960, Т. 3, № 6, с. 1001 - 1003.
7. Киселёв М.Р., Ключев Ал.В., Ключев Ан.В. К вопросу о физических механизмах генерации фликкерного шума в $Ti-Au/GaAs$ диодах Шоттки. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. - 2014, № 1(2), с. 158 - 162.
8. Родерик Э. Х. Контакты металл-полупроводник. М.: Радио и связь, 1982. 208 с. [Пер. с англ.: Rhoderich E. H. Metal-Semiconductor Contacts. Clarendon Press, Oxford, 1978.].
9. Ключев А.В., Шмелёв Е.И., Якимов А.В. Исследование $1/f$ шума $TiAu/SiO_2/GaAs$ диодов Шоттки. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. - 2011. - Т.11.- № 1.- С.199-202.
10. Беляков А.В., Ключев А.В., Якимов А.В. Проявление $1/f$ шума тока утечки в наноразмерных светоизлучающих структурах. // Известия ВУЗов. Радиофизика. -2008, т. 51, № 2, с.149-161.
11. Klyuev A.V., Yakimov A.V. $1/f$ noise in GaAs nanoscale light-emitting structures // Physica B. - 2014, v. 440, p. 145-151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2014.01.021>.