

Nelina Svetlana Nikolaevna
Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.
E-mail: nelina76@mail.ru.
2, Shevchenko St., Taganrog, 347928, Russia.
Phone: 8(8634)371-603.
Department of Electronic Apparatuses Design.
Post-graduate student.

УДК 621.383.06

Г.Г. Червяков, Е.Н. Осадчий

ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СВЧ НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ С ЗАТВОРОМ ШОТКИ

Рассмотрены шумовые процессы, протекающие в полевом транзисторе с затвором Шотки (ПТШ), при преобразовании частоты при трех разных режимах работы. Проведен сопоставительный анализ этих режимов работы для смесителей СВЧ на ПТШ.

ПТШ; коэффициент шума; эквивалентная шумовая схема; источник теплового шума; суммарное напряжение шумов; шумовой источник тока.

G.G. Chervyakov, E.N. Osadchiy

THE NOISE FEATURES OF SCHOTTKY-GATE FET SHF CONVERTERS

The noise processes, occurring in SCHOTTKY-GATE FET at frequency conversion in three modes of working, are considered. Contrastive analysis of these working modes for SHF mixer on SCHOTTKY-GATE FET is carried out.

SCHOTTKY-GATE FET; noise figure; noise equivalent; heat noise source; total noise voltage; noise current source.

При воздействии на ПТШ частот сигнала и гетеродина вместе с частотой гетеродина будет изменяться концентрация неравновесных носителей $\Delta n_{\dots}(t)$, которая приведет к появлению переменной составляющей тока стока I_c , обусловленной модуляцией толщины обедненной области. Вклад этого эффекта определяется модуляцией тока стока при изменении потенциала затвора.

В ПТШ кроме источников теплового шума, создаваемых омическими сопротивлениями областей затвора, истока и стока [1-4] следует учитывать два источника шумового тока в цепи затвора \bar{i}_3^2 и в цепи стока \bar{i}_c^2 . Первый обусловлен дробовыми шумами обратносмещенного перехода затвора, а второй обусловлен тепловым шумом канала [2].

Так как толщина канала по его длине изменяется от нуля вблизи стока до его технологической толщины W вблизи истока, можно положить среднее значение, равным $0,5W$, что соответствует проводимости канала в 2 раза меньшей, чем при отсутствии питающих напряжений, и $F_s = 0,5$. При обрат-

ном смещении затвора $F_s = 2/3$, а при учете насыщения скорости в коротком канале $F_s > 1$.

В преобразователях СВЧ на ПТШ можно реализовать три принципиально разных режима работы:

1. Преобразование частоты происходит в р-п-переходе затвора (диода с барьером Шотки – ДБШ), а напряжение промежуточной частоты усиливается ПТШ.

2. Преобразование частоты происходит за счет взаимодействия токов сигнала и гетеродина в канале.

3. Переход затвора используется только для выделения напряжения с частотой ω_1 (входной сигнал), и этот сигнал взаимодействует с гетеродином на нелинейности стоковой характеристики (отсутствует постоянное напряжение на стоке, взаимодействие идет на четных гармониках частоты переменного электрического поля).

Для анализа шумовых свойств ПТШ используем общепринятую физическую эквивалентную схему [2]. Пренебрежем емкостью корпуса ПТШ и, не будем учитывать также внутренние обратные связи в схеме транзистора. Предполагаем, что во входной цепи созданы параллельные контуры, настроенные на частоты ω_1 и ω_r , а в выходной цепи контур, настроенный на частоту $\omega_{пч}$.

Так как в первом режиме преобразователь СВЧ на ПТШ эквивалентен каскадному включению диодного смесителя на ДБШ и усилительного каскада, то эквивалентная шумовая схема будет иметь вид, показанный на рис. 1.

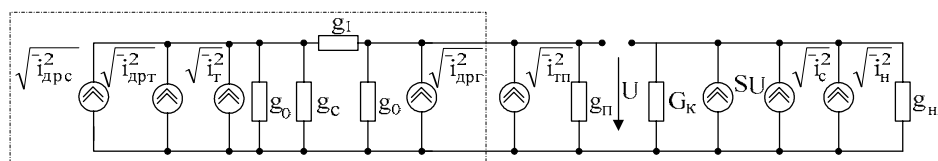


Рис. 1

Здесь обведенная пунктиром часть схемы, полностью соответствующая ДБШ при коротком замыкании на выходе смесителя, дополнена элементами:

$g_n = (r_3 + r_u)\omega_n^2 C_{3и}^2$ – резонансная проводимость контура в цепи затвора, настроенного на $\omega_{пч}$, обусловленная сопротивлениями r_3 и r_u эквивалентной схемы ПТШ; $g_{нт}$ – проводимость нагрузки в цепи стока; $\sqrt{\bar{i}_{тп}^2}$ – источник теплового шума, создаваемого сопротивлениями r_3 и r_u $\bar{i}_{mn}^2 = 4kTg_n \Delta f$; U – суммарное напряжение шумов ПЧ на затворе ПТШ; SU – шумовой источник тока на выходе ПТШ, моделирующий процесс усиления шумов в ПТШ; $\sqrt{\bar{i}_c^2}$ – источник шума на выходе ПТШ, отображающий тепловой шум канала

$\bar{i}_c^2 = 4kTG_k F_s \Delta f$; $\sqrt{\bar{i}_н^2}$ – источник теплового шума, создаваемого нагрузкой $g_{нт}$ на выходе ПТШ $\bar{i}_н^2 = 4kTg_{нт} \Delta f$, где $g_{нт} = (r_c + r_u)\omega_n^2 C_{си}^2$; G_k – проводимость канала ПТШ.

Если шумы канала и нагрузки пересчитать к затвору транзистора, эквивалентная шумовая схема приобретает вид рис. 2.

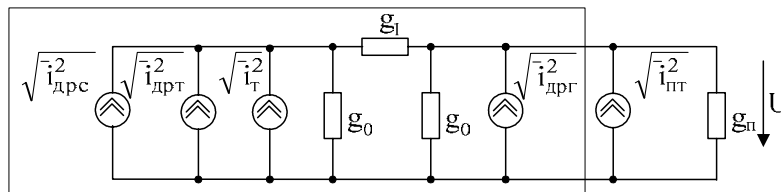


Рис. 2

где $\bar{i}_{nm}^2 = 4kT\Delta f[(G_k F_s + g_{nm})(G_k + g_{nm})^2 / S^2 + g_n] =$

$4kT\Delta f[g_n + (F_s G_k + g_{nm}) / M_u^2]$ – тепловые шумы, создаваемые проводимостью канала, нагрузкой и сопротивлениями r_3, r_n , пересчитанные к затвору транзистора; $M_u = S / (G_k + g_{nm})$ – коэффициент усиления ПТШ по напряжению.

Коэффициент шума при этом определяется выражением

$$F = 1 + n_1 \{ g_{cn} + (1 + m + g_{cn})^2 m^{-2} [1 - m^2 (1 + 2g_{cn})(1 + g_{cn})^{-2} + g_0^{-1} (g_n + (F_s G_k + g_{nm}) M_u^{-2})] \},$$

которое отличается от выражения для ДБШ дополнительным членом $g_0^{-1} (g_n + (F_s G_k + g_{nm}) M_u^{-2})$, характеризующим шумы сопротивлений потерь контуров ПЧ в цепях затвора и стока и шумы канала транзистора.

Анализ этой формулы показывает, что при учете потерь в выходном контуре смесителя и проводимости нагрузки коэффициент шума смесителя на ПТШ будет меньше коэффициента шума диодного смесителя, использующего переход затвора, если выполняется условие $g_{нд} > (G_k + g_{nm}) / M_u^2$, где $g_{нд}$ – проводимость нагрузки диодного смесителя СВЧ.

Последнее условие может выполняться в смесителе СВЧ на ПТШ даже при $g_{нд} \ll g_{нт}$. Из этого следует, что в смесителе СВЧ на ПТШ возможно некоторое увеличение отношения с/ш за счет уменьшения влияния шумов нагрузки в цепи стока в общем фоне шумов.

В смесителе СВЧ на ПТШ с преобразованием частоты в канале ПТШ (второй режим работы) процесс преобразования становится невзаимным. В этом режиме переход затвора работает в режиме прямого детектирования с выделением огибающей модуляции сигнала. При этом на затворе действует малое напряжение с частотой ω_1 и большое напряжение с частотой гетеродина ω_2 . Крутизну стокковой характеристики ПТШ можно представить в виде ряда

$$S(U_0 + U_2) = S(t) = S_0 + 2S_1 \cos \omega_2 t + 2S_2 \cos 2\omega_2 t + \dots$$

Малый сигнал с частотой ω_1 $u_1 = U_{10} \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$ создаст в токе стока разностную составляющую $\omega_{nc} = \omega_1 - \omega_2$; $i_{nc} = S_1 U_{10} \cos(\omega_{nc} t + \varphi_1)$.

При этом номинальный коэффициент передачи ФП по мощности

$$G = 4S_1^2 / g_c (g_n + G_k + g_n),$$

где $g_c = (r_s + r_u) \omega_1^2 C_{zu}^2$ – резонансная проводимость контура сигнала в цепи затвора; $g_n = (r_c + r_u) \omega_n^2 C_{cu}^2$ – резонансная проводимость контура ПЧ в цепи стока; g_n – проводимость нагрузки в цепи стока.

Эквивалентная шумовая схема смесителя с преобразованием частоты в канале имеет вид рис.3 и коэффициент шума определяется формулой

$$F = 1 + 2I_s / I_{01} + 2\varphi_m / I_{01} [g_c + (F_s G_k + g_n + g_n)^3 / S_1^2].$$

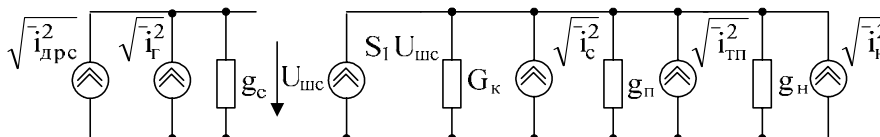


Рис. 3

Откуда видно, что коэффициент шума уменьшается с ростом постоянной составляющей тока затвора I_{01} (за счет возрастания доли дробовых шумов генерации носителей тока в переходе затвора в общем шуме смесителя) и крутизны преобразования S_1 . Для уменьшения коэффициента шума необходимо также уменьшать потери в контурах сигнала g_c и промежуточной частоты g_n . При этом отношение с/ш будет равно

$$N_{cш} = I_c / \{2e(I_{01} + 2I_s)\Delta f + 4kT\Delta f [g_c + (F_s G_k + g_n + g_n)^3 / S_1^2]\}^{0.5}.$$

Режим ограничения «шумом в сигнале» реализуется при

$$I_{01} + 2I_s \gg 2\varphi_m [g_c + (F_s G_k + g_n + g_n)^3 / S_1^2],$$

что соответствует $N_{cш} = I_c / [2e(I_{01} + 2I_s)\Delta f]^{0.5}$.

Смеситель СВЧ с преобразованием частоты на нелинейности стоковой характеристики ПТШ (третий режим работы), когда напряжение гетеродина подается в цепь стока, эквивалентен каскадному включению прямого фотодетектора на ПТШ, выделяющего и усиливающего огибающую света и смесителя на двухполюсной нелинейной проводимости. Для ПТШ можно использовать аппроксимацию для тока стока $i_c = A(U_s - U_{30})^2 (1 - e^{-BU_c})$.

Проводимость канала определяется, как $G_k = A(U_s - U_{30})^2 B e^{-|BU_c|}$ и специфика её состоит в том, что при отсутствии постоянного напряжения на

стоке ($U_0 = 0$) $G_k(U_0 + U_2) = G_k(t) = G_{k0} + 2G_{k1} \cos \omega_2 t + 2G_{k2} \cos 2\omega_2 t + \dots$ имеет равными нулю амплитуды всех нечетных гармоник $G_{k1} = G_{k3} = \dots = 0$, т.е. преобразование частоты происходит на четных гармониках гетеродина.

Эквивалентная схема такого преобразователя для сигнала имеет вид рис. 4, а напряжение на выходе и номинальный коэффициент усиления определяются выражениями:

$$U_H = I_c g_2 S / g_c [g_2 (2g_0 + g_H) + g_0 (g_0 + g_H)];$$

$$G = 4S_n^2 m_2^2 g_{Hn} / g_{cH} [1 + 2m_2 + g_{Hn} (1 + m_2)]^2,$$

где

$$G_{k0} = g_0; \quad G_{k2} = g_2;$$

$$S_n = S / g_0; \quad m_2 = g_2 / g_0; \quad g_{Hn} = g_H / g_0; \quad g_{cH} = g_c / g_0.$$

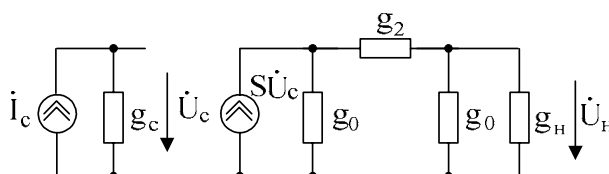


Рис. 4

Зависимость $G(g_{Hn})$ имеет максимум при оптимальной нагрузке

$$g_{Hnopt} = (1 + 2m_2) / (1 + m_2)$$

равный

$$G_m = S_n^2 m_2^2 / g_{cH} [(1 + 2m_2)(1 + m_2)].$$

Откуда следует, что максимальный коэффициент усиления смесителя возрастает с ростом глубины модуляции проводимости канала m_2 , с ростом крутизны стокзатворной характеристики и уменьшением потерь в контуре в цепи затвора, настроенном на ω_1 , при этом $g_{cHmin} = (r_z + r_u) \omega_1^2 C_{сз}^2$.

Коэффициент усиления смесителя меньше коэффициента усиления усилителя на ПТШ в $m_2^2 / (1 + m_2)(1 + 2m_2)$ раз за счет большей величины G_{Hnopt} .

Средний квадрат шумового тока к.з. на выходе, создаваемый всеми источниками шума $\bar{i}_{шкз}^2 = g_2^2 S^2 (\bar{i}_{дрс}^2 + \bar{i}_{дрт}^2 + \bar{i}_m^2) / g_c^2 (g_0 + g_2)^2 + \bar{i}_m^2 + \bar{i}_H^2$.

Величина среднего квадрата тока короткого замыкания, создаваемого сигналом будет равна $\bar{i}_{шс}^2 = g_2^2 S^2 / g_c^2 (g_0 + g_2)^2 \bar{i}_{дрс}^2$ и коэффициент шума смесителя будет:

$$F = \bar{i}_{шкз}^2 / \bar{i}_{шс}^2 = 1 + 2I_s / I_{01} + 2\varphi_m g_0 / I_{01} \{ g_{cH} + g_{cH}^2 [g_{Hn} + (1 + m_2)^2 (1 - m_2^2) / m_2^2] / S_n^2 \},$$

т.е. для его уменьшения необходимо снижать потери в контурах $g_{сн}$ и $g_{нн}$ (уменьшая и проводимости нагрузки по ПЧ) и стремиться к выполнению условий $m_2 \rightarrow 1$ и $I_{01} \gg I_s$.

Отношение с/ш для такого смесителя

$$N_{сш} = I_c / [2e(I_{01} + 2I_s)\Delta f + 4kT\Delta f g_{зш}]^{0,5},$$

где $g_{зш}$ – эквивалентная шумовая проводимость, приведенная к затвору ПТ.

Откуда видно, что влияние шумов преобразователя и нагрузки в этом ФП ослаблено за счет внутреннего усиления ПТ, возрастающего с ростом S . Условие реализации режима ограничения «шумом в сигнале» имеет вид

$$I_s + I_{01} \gg 2\varphi_m \{g_c + g_c^2 [g_n + g_0(1+m_2)^2(1-m_2^2)/m_2^2] / S_n^2\}.$$

Сопоставительный анализ трех возможных режимов работы смесителя СВЧ на ПТШ показывает, что при возможности получения большого усиления ПТШ на частоте ω_1 целесообразно использовать режим преобразования частоты с использованием нелинейности стоковой характеристики. При этом частота гетеродина может быть уменьшена в два раза за счет преобразования на второй гармонике. Если ПТШ обладает низкими усилительными свойствами на частоте ω_1 и хорошими на частоте $\omega_{пч}$ можно использовать первый и второй режимы, причем второй режим предпочтителен, так как в нем переход затвора в течение всего периода гетеродина заперт и меньше дробовые шумы в цепи затвора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ван-дер-Зил А. Шум. Описание, источники, измерение: Пер. с англ. / Под ред. А.К. Нарышкина. – М., Связь, 1973. – 228 с.
2. Червяков Г.Г. Избирательный фотоприем. Элементы, параметры, характеристики. Монография. – Таганрог: ТРТУ, 1999. – 186 с.
3. Шварц Н.З. Усилители СВЧ на полевых транзисторах. – М.: Радио и связь, 1987. – 200с.
4. Pucel R.A., Haus H.A., Statz H. Signal and Noise Properties of Gallium Arsenide Microwave Field-effect Transistor.-In: Adv. Electron. And Electron. Phys.,v. 38. N.Y. Academic Press, 1975. – p. 195-265.

Червяков Георгий Георгиевич

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: rte@fep.tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 8(8634)371-629.

Кафедра радиотехнической электроники.

Заведующий кафедрой.

Осадчий Евгений Николаевич

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: andron@fep.tsure.ru.
347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.
Тел.: 8(8634)371-629.
Кафедра радиотехнической электроники.
Доцент.

Chervykov Georgiy Georgievich
Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: rte@fep.tsure.ru.
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.
Phone: 8(8634)371-629.
Department of Electronic Devices.
Chair of the department.

Osadchiy Evgeniy Nikolaevich
Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: andron @fep.tsure.ru.
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.
Phone: 8(8634)371-629.
Department of Electronic Devices.
Associate professor.

УДК 621.3.049.77

И.Е. Лысенко

**МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ
УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ И ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ LL-ТИПА**

Описаны метод проектирования микромеханического гироскопа-акселерометра с двумя осями чувствительности LL-типа. Предложено уравнение движения чувствительных элементов ММГА.

Метод; проектирование; конструкция; микроэлектромеханические системы; сенсор; гироскоп; акселерометр.

I.E. Lysenko

**DESIGN METHOD OF MICROMACHINED
GYROSCOPE-ACCELEROMETER LL-TYPE**

Design method of two-axis micromechanical gyroscope-accelerometer is described. Gyroscope-accelerometer model are developed.

Method; design; microelectromechanical systems; sensor; gyroscope; accelerometer.

Микромеханические сенсоры угловых скоростей, или микромеханические гироскопы (ММГ), являются компонентами микроэлектромеханических