

УДК 621.373

ФЛИККЕРНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ В ГЕНЕРАТОРЕ ГАННА

В. В. Зайцев, В. Б. Орлов, А. В. Якимов

Рассмотрены технические флуктуации амплитуды и частоты автоколебания в генераторе на диоде Ганна, работающем в пролетном режиме. В качестве источников шумов наряду с нестабильностью питания учтены фликкерные флуктуации уровня легирования и длины рабочей области диода. Получены выражения для спектральных плотностей мощности амплитудно-частотных шумов выходного сигнала. Проанализированы зависимости уровней шумов от величины напряжения смещения на диоде и даны их численные оценки.

Флуктуации амплитуды и частоты автоколебаний в генераторе на диоде Ганна обусловлены прежде всего собственными шумами диода. Основной вклад здесь принадлежит техническим шумам фликкерного типа. Однако к настоящему времени анализ низкочастотных фликкерных шумов ганновского генератора, удовлетворительно описывающий имеющиеся экспериментальные данные (см., например, [1]), в литературе отсутствует. Авторы имеющихся теоретических работ, как правило, ограничиваются лишь учетом нестабильности питания диода [2, 3].

В настоящей работе рассмотрены фликкерные флуктуации амплитуды и частоты автоколебания в генераторе на диоде Ганна, работающем на пролетной моде колебаний (см. классификацию, принятую в [5]). Для описания динамических характеристик диода используются известные представления (см., например, [4, 5]). Фликкерные флуктуации параметров диода описываются на базе моделей, развитых в [6, 7].

1. Эквивалентная схема рассматриваемого генератора представляет собой параллельный колебательный контур, возбуждаемый генератором тока $I_d(t)$. Параметры последнего могут быть определены на основе анализа физических процессов зарождения, распространения и гашения домена сильного поля в диоде Ганна. Ток диода представляет собой периодическую последовательность импульсов на фоне постоянного тока I_0 , протекающего в цепи во время прохождения домена и определяемого величиной электрического поля вне домена [4, 5].

В случае достаточно коротких по сравнению с периодом следования импульсов их форма не играет существенной роли. Будем, как сделано в [5], считать импульсы прямоугольными с амплитудой I_m и длительностью τ_d , приблизительно равной времени вхождения домена в анод: $\tau_d = W_d/v_d$, где W_d и v_d — ширина и скорость движения стабильного домена. Для амплитуды импульса имеем: $I_m = I_t - I_0$, где I_t — пороговое значение тока [5]. Период следования импульсов τ определяется временем пролета домена через рабочую область диода с эффективной длиной W , т. е. $\tau = W/v_d$.

Таким образом, основная гармоника тока возбуждения $I_d(t)$ может быть представлена в виде

$$I_d(t) = R_d \cos \omega_d t, \quad (1)$$

где амплитуда R_d и частота ω_d равны

$$R_d = I_m \tau_d / \tau, \quad \omega_d = 2\pi / \tau.$$

Нестабильность источника питания и собственные низкочастотные шумы диода приводят к флуктуациям параметров тока возбуждения, а именно — к флуктуациям амплитуды импульса I_m и длительностей τ и τ_d . Относительные величины данных флуктуаций обозначим через $\delta I_m(t)$, $\delta \tau(t)$ и $\delta \tau_d(t)$ соответственно. Прежде чем переходить к их вычислению, рассмотрим источники собственных шумов диода.

2. Считаем, что в рассматриваемом диоде фликкерным флуктуациям подвержены уровень легирования N и эффективная длина W рабочей области диода, т. е.

$$N = N_0[1 + \delta N(t)], \quad W = W_0[1 + \delta W(t)],$$

где N_0 , W_0 и $\delta N(t)$, $\delta W(t)$ — средние значения и относительные флуктуации соответствующих величин. Физическая модель данных флуктуационных процессов предложена в работах [6, 7]. Предполагается, что флуктуации обусловлены диффузией атомов примеси из областей с высокой их концентрацией в области с более низкой концентрацией. В данном случае это может быть диффузия доноров с коэффициентом диффузии D_n из омических контактов в рабочую область.

Под влиянием процесса диффузии происходит «расплывание» технологических переходов, в частности, изменение расстояния от места зарождения домена до места его гашения, т. е. эффективной длины рабочей области диода. При этом на основании [6, 8] для спектра флуктуаций $\delta W(t)$ получаем следующее выражение:

$$\langle \delta W^2 \rangle_F = B_W / F^2, \quad B_W = 2D_n / \pi W_0^2. \quad (2)$$

Тот же процесс диффузии донорных атомов из омических контактов приводит к изменению уровня легирования рабочей области. Качественное рассмотрение данного эффекта проведено в [7], откуда следует, что в диапазоне частот, представляющих практический интерес, спектр флуктуаций $\delta N(t)$ может быть представлен как

$$\langle \delta N^2 \rangle_F = B_N / F, \quad B_N = N_a a / 2N_0^2 W_0^2 A. \quad (3)$$

Здесь N_a — концентрация активированных атомов примеси в области омического контакта, a — постоянная кристаллической решетки, A — площадь поперечного сечения прибора.

Нестабильность источника питания характеризуется наличием флуктуаций напряжения смещения на диоде $V = V_0[1 + \delta V(t)]$ со спектром относительных флуктуаций $\delta V(t)$, равным

$$\langle \delta V^2 \rangle_F = B_V / F^\gamma, \quad (4)$$

где параметры B_V и γ зависят от типа источника питания; обычно $\gamma \sim 1$ (см., например, [8]).

3. Расчет флуктуаций параметров тока возбуждения, т. е. $\delta I_m(t)$, $\delta \tau(t)$ и $\delta \tau_d(t)$, может быть проведен в квазистатическом приближении на основе известных динамических характеристик. В результате имеем

$$\begin{aligned} \delta \tau(t) &= (1 - \alpha_W) \delta W(t) - \alpha_V \delta V(t) - \alpha_N \delta N(t), \\ \delta \tau_d(t) &= (\beta_W - \alpha_W) \delta W(t) + (\beta_V - \alpha_V) \delta V(t) + (\beta_N - \alpha_N) \delta N(t), \\ \delta I_m(t) &= \gamma_W \delta W(t) + \gamma_V \delta V(t) + \gamma_N \delta N(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь через α , β и γ обозначены модуляционные чувствительности скорости движения домена, его ширины и амплитуды импульсов тока диода к флуктуациям соответствующих параметров. Для определения аналитических выражений для этих величин используем а) нелинейную зависимость приложенного к домену избыточного напряжения V_D от поля вне домена E_T ; б) «приборную» прямую, описываемую соотноше-

нием $E_0 W_0 = E_r W_0 + V_D(E_r)$, где $E_0 = V_0/W_0$ — среднее поле смещения; в) вольт-амперную характеристику диода Ганна $I_d(V)$ (см., например, [5]).

Отметим, что характеристика $V_D(E_r)$ в качестве параметра содержит плотность легирующей примеси в рабочей области диода. Таким образом для указанных чувствительностей имеем

$$\begin{aligned} \alpha_W &= -W_0 \left[W_0 + \left(\frac{\partial V_D}{\partial E_r} \right)_{V=V_0} \right]^{-1}, & \alpha_V &= -\frac{V_0}{W E_r} \alpha_W, \\ \alpha_N &= \left[\frac{N_0}{E_r} \left(\frac{\partial V_D}{\partial E_r} \right)^{-1} \left(\frac{\partial V_D}{\partial N} \right)_{N=N_0} \right]_{V=V_0}, & \beta_W &= \left[\frac{E_r}{2V_D} \left(\frac{\partial V_D}{\partial E_r} \right) \right]_{V=V_0} \alpha_W, \\ \beta_V &= \left[\frac{E_r}{2V_D} \left(\frac{\partial V_D}{\partial E_r} \right) \right]_{V=V_0} \alpha_V, & \beta_N &= \frac{1}{2} \left[\frac{E_r}{V_D} \left(\frac{\partial V_D}{\partial E_r} \right) \right]_{V=V_0} \alpha_N, \\ \gamma_W &= \left(\frac{E_r}{E_r - E_t} \right)_{V=V_0} \alpha_W, & \gamma_V &= \left(\frac{E_r}{E_r - E_t} \right)_{V=V_0} \alpha_V, \\ \gamma_N &= \left(\frac{E_r}{E_r - E_t} \right)_{V=V_0} \alpha_N. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь функция $I_d(V)$ описывает нижнюю ветвь вольт-амперной характеристики диода, значения производных и функций напряжения смещения V берутся в рабочей точке V_0 .

Соотношения (5) позволяют выразить относительные флуктуации как амплитуды $\varepsilon_d(t) = \delta I_m(t) + \delta \tau_d(t) - \delta \tau(t)$, так и частоты $\nu_d(t) = -\delta \tau(t)$ первой гармоники тока возбуждения (1) через первичные источники δW , δV и δN . В рассматриваемом режиме выходной сигнал генератора представляет собой преобразованное линейной резонансной системой колебание (1). Поэтому его относительные флуктуации (амплитуды $\varepsilon(t)$ и частоты $\nu(t)$) связаны с $\varepsilon_d(t)$ и $\nu_d(t)$ известным преобразованием

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \varepsilon_d(t) + \frac{2Q\eta}{1 + \eta^2} \nu_d(t), \\ \nu(t) &= \nu_d(t), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\eta = 2Q \frac{\omega_1 - \omega_0}{\omega_1}$ — относительная расстройка между резонансной частотой контура ω_1 и средней частотой автоколебания ω_0 , Q — добротность контура.

Обычно генератор, работающий в пролетном режиме, имеет низкодобротный контур, точно настроенный на частоту тока возбуждения. В этом случае в (7) можно пренебречь преобразованием частотных флуктуаций тока в амплитудные флуктуации выходного колебания, т. е. флуктуации выходного сигнала генератора практически совпадают с флуктуациями первой гармоники тока возбуждения. Таким образом, спектральные плотности мощности флуктуаций $\varepsilon(t)$ и $\nu(t)$ имеют вид

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon^2 \rangle_F &= (\gamma_V + \beta_V)^2 \langle \delta V^2 \rangle_F + (\gamma_N + \beta_N)^2 \langle \delta N^2 \rangle_F + (\gamma_W + \beta_W - 1)^2 \langle \delta W^2 \rangle_F, \\ \langle \nu^2 \rangle_F &= \alpha_V^2 \langle \delta V^2 \rangle_F + \alpha_N^2 \langle \delta N^2 \rangle_F + (\alpha_W - 1)^2 \langle \delta W^2 \rangle_F. \end{aligned} \quad (8)$$

Отметим, что, как следует из (5), (8), флуктуации скорости носителей в рабочей области вклада в амплитудные флуктуации не дают: вызываемые ими изменения времени пролета с точки зрения амплитуды первой гармоники возбуждения скомпенсированы в каждый период точно такими же изменениями ширины импульса тока диода.

Таким образом, основными механизмами преобразования первичных источников шума во флуктуации амплитуды являются модуляция ширины домена и модуляция величины поля вне домена.

Что касается частотных флуктуаций, то здесь основным механизмом является модуляция скорости движения домена. Кроме того, флуктуации эффективной длины рабочей области вносят вклад как в амплитудные, так и частотные флуктуации автоколебания путем непосредственной модуляции времени пролета домена.

4. Внешним параметром, от которого существенным образом зависят характеристики автоколебания, в пролетном режиме является напряжение смещения V_0 на диоде Ганна. Поэтому представляет интерес исследование характера изменения мощности амплитудно-частотных флуктуаций с изменением величины V_0 . Основываясь на анализе зависимости величин модуляционных чувствительностей (6) от смещения, можно сделать некоторые выводы относительно деформации спектров амплитудных и частотных флуктуаций автоколебания (8) с изменением постоянного смещения, приложенного к диоду. Этот эффект обусловлен лишь изменением относительного вклада каждого из первичных источников флуктуаций, так как мощность последних полагается не зависящей от напряжения смещения (см. (2) — (4)).

Для расчета зависимостей модуляционных чувствительностей от величины напряжения смещения использовалась аппроксимация характеристики $V_D(E_T)$ для домена большой амплитуды (см., например, гл. 3 в [9]), с достаточной степенью точности пригодная в пролетном режиме (при этом $V_0 > V_t$ и $N_0 W_0 \geq 10^{12} \text{ см}^{-2}$), а также соответствующая аппроксимация динамической ветви вольт-амперной характеристики диода. Результаты такого расчета приведены на рис. 1.

Как видно из рисунка, с ростом V_0 модуляционные чувствительности α_W , α_V , α_N и β_W уменьшаются по абсолютной величине. При больших V_0 уменьшение $|\alpha_V|$ и $|\alpha_N|$ происходит по закону $V_0^{-1/2}$, $|\beta_W| \sim V_0^{-1}$ и $\alpha_W \sim V_0^{-3/2}$. В то же время величина β_V стремится к конечному значению, равному $-0,5$, а β_N везде остается практически постоянной. Характер данных зависимостей для диодов с другими параметрами качественно не отличается от ситуации, изображенной на рис. 1.

Отметим, что параметр γ_V , описывающий модуляцию амплитуды импульсов тока возбуждения, с удалением от порога возбуждения V_t так же быстро уменьшается, поскольку динамическая ветвь вольт-амперной характеристики диода быстро насыщается. Поведение коэффициентов γ_W и γ_N обусловлено соответствующим изменением α_W и α_N (см. (6)). Таким образом, на основании уравнений (8) приходим к выводу о том, что с возрастанием напряжения смещения на диоде уровень амплитудных флуктуаций вначале уменьшается, однако процесс уменьшения быстро насыщается и далее уровень флуктуаций остается практически постоянным. В то же время поведение частотных флуктуаций зависит от соотношения мощностей первичных источников шума.

Если преобладающими являются флуктуации δN или δV , то происходит снижение уровня частотных флуктуаций. Напротив, если доминируют флуктуации δW , то понижение частотных флуктуаций не наблюдается, наоборот, они могут даже несколько увеличиться. Это происходит вследствие того, что флуктуации эффективной длины рабочей области диода преобразуются во флуктуации частоты двумя путями. Во-первых, это непосредственная модуляция времени пролета домена вследствие изменения расстояния, проходимого им от точки зарождения до точки гашения, а во-вторых, противоположное по знаку изменение скорости движения домена. При реальных значениях параметров дио-

дов преобладает эффект непосредственной модуляции времени пролета домена, не зависящий от величины напряжения смещения.

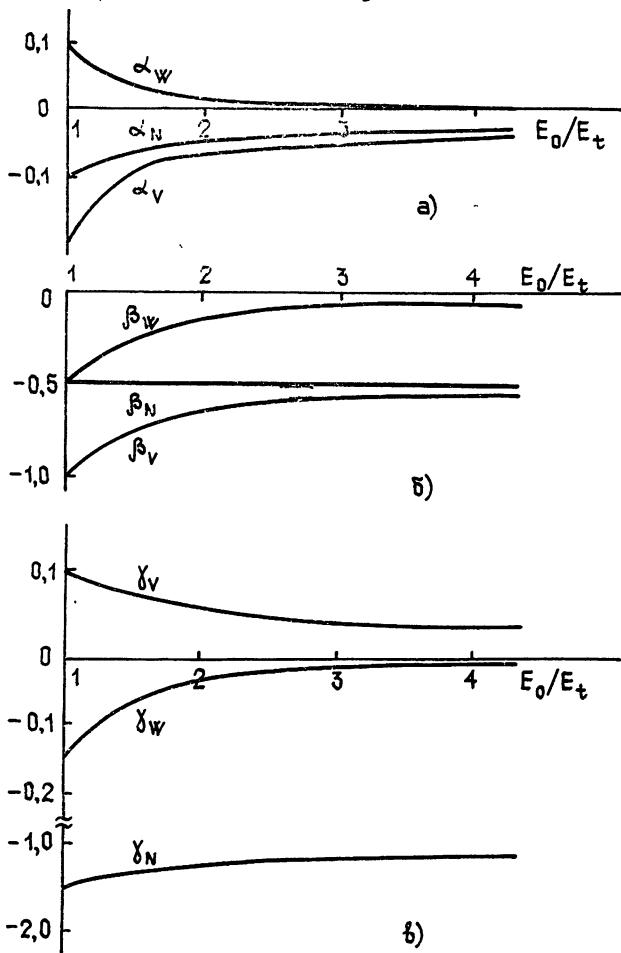


Рис. 1.

5. Перейдем к численным оценкам. С этой целью рассмотрим диод диапазона 10 см со следующими геометрическими размерами и параметрами полупроводникового материала:

$$W_0 = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ см}, \quad A = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2, \quad N_0 = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3},$$

$$D_n = 10^{-20} \text{ см}^2/\text{с}, \quad a = 5 \cdot 10^{-8} \text{ см} \text{ и } N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Отсюда определим спектры (2) и (3):

$$\langle \delta W^2 \rangle_F = 5,8 \cdot 10^{-16}/F^2 [\Gamma \text{ц}^{-1}] \text{ и } \langle \delta N^2 \rangle_F = 1,8 \cdot 10^{-14}/F [\Gamma \text{ц}^{-1}].$$

При использовании в качестве источника питания аккумулятора или стабилизированного выпрямителя $\langle \delta V^2 \rangle_F = 10^{-14}/F [\Gamma \text{ц}^{-1}]$.

С учетом сделанных предположений, а также полагая $V_0/V_t \geq 1,03$, получаем следующее выражение для спектра относительных амплитудных флуктуаций (при $F > 1 \text{ Гц}$): $\langle \varepsilon^2 \rangle_F = 6 \cdot 10^{-14}/F [\Gamma \text{ц}^{-1}]$. Этот уровень определяется в основном флуктуациями концентрации δN . Флуктуации напряжения смещения δV могут стать определяющими, если их мощность будет не менее чем на порядок превосходить принятый в настоящих оценках уровень, т. е. при $\langle \delta V^2 \rangle_F \geq 10^{-13}/F$.

Спектр относительных флуктуаций частоты $\langle \nu^2 \rangle_F$ (см. рис. 2) на

частотах отстройки свыше 10 Гц определяется примерно в равной степени как флуктуациями концентрации, так и флуктуациями смещения. На более низких частотах может оказаться заметным влияние флуктуаций эффективной длины рабочей области диода δW .

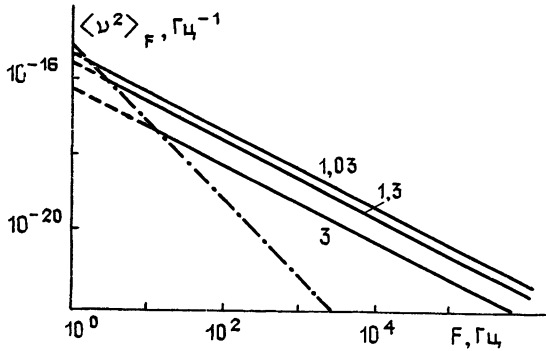


Рис. 2. Спектр относительных флуктуаций частоты. Цифры около кривых указывают на величину отношения V_0/V_f . Штрихпунктиром указан вклад флуктуаций δW .

Приведенные здесь численные оценки носят весьма приближенный характер, однако в совокупности с предложенным выше качественным анализом они позволяют выявить основные закономерности в деформации спектров амплитудно-частотных флуктуаций с изменением смещения. Следует также отметить, что предложенная в настоящей работе методика может быть применена для анализа флуктуаций ганновских генераторов, работающих и в других режимах (в частности, в режиме с гашением домена), а рассмотренная модель флуктуационных процессов в приборе применима при анализе широкого класса твердотельных СВЧ устройств (см., например, [10]).

Авторы признательны В. В. Череднику за полезное обсуждение ряда вопросов теории эффекта Ганна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Faulkner E. A., Mead M. L.—Electron. Lett., 1968, 4, № 11, p. 226.
2. Sweet A. A.—Proc. IEEE, 1972, 60, № 8, p. 999.
3. Haus A, Statz H., Pucel R. A.—IEEE Trans., 1973, ED-20, № 4, p. 368.
4. Butcher P. N., Fawcett W.—Brit. J. Appl Phys, 1966, 17, № 11, p. 1425.
5. Gunn J. B.—IBM J. Res. Dev., 1966, 10, № 4, p. 310.
6. Малахов А. Н., Якимов А. В.—Радиотехника и электроника, 1974, 19, № 11, с. 2436.
7. Якимов А. В.—Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 2, с. 238.
8. Малахов А. Н. Флуктуации в автоколебательных системах.—М.: Наука, 1968.
9. Левинштейн М. Е., Пожела Ю. К., Шур М. С. Эффект Ганна.—М.: Сов. радио, 1975.
10. Зайцев В. В., Орлов В. Б., Якимов А. В.—Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 5, с. 585.

Горьковский государственный университет

Поступила в редакцию
15 октября 1979 г.

FLICKER FLUCTUATIONS IN GUNN OSCILLATOR

V. V. Zaitsev, V. B. Orlov, A. V. Yakimov

The amplitude and frequency $1/f$ noise in Gunn oscillator operating in a transit mode is considered. As the sources of the noise the instability of the bias voltage and the flicker fluctuations of the doping level and of the operating region width are taken into account. Expressions have been derived for amplitude-frequency noise spectra of the output signal. Dependence of the noise level on the value of the bias voltage is analysed and some numerical estimations are given.