

УДК 621.382.2

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ СВЧ ПРОВОДИМОСТИ ДИОДОВ ГАННА

А. С. Карасев, В. И. Шевченко

Описана методика и установка для измерения низкочастотных флуктуаций СВЧ проводимости активных двухполюсников и приведены результаты экспериментального исследования спектральных плотностей и корреляции флуктуаций активной и реактивной компонент проводимости диодов Ганна трехсантиметрового диапазона длин волн в зависимости от напряжения смещения на диоде и амплитуды СВЧ сигнала.

Генераторы и усилители на диодах Ганна широко используются в радиосистемах с нормируемым уровнем шума. В связи с этим вопрос о флуктуационных характеристиках устройств на ДГ и о факторах, определяющих уровень флуктуаций выходного колебания, представляет значительный практический и принципиальный интерес. Как известно, низкочастотные флуктуации выходного колебания автогенераторов определяются, в первую очередь, низкочастотными флуктуационными процессами в активном элементе генератора. Изучению этих процессов, в частности флуктуаций тока диода, посвящено большое количество работ, однако вопрос о факторах, определяющих низкочастотные флуктуации выходного колебания ГДГ и взаимосвязи низкочастотных флуктуационных процессов в диоде и флуктуаций колебания, не нашел окончательного решения ввиду нелинейности СВЧ процессов и многообразия физических механизмов флуктуаций в ДГ. Решению этих вопросов может способствовать изучение низкочастотных флуктуаций СВЧ проводимости активного элемента. Данные об уровне низкочастотных флуктуаций СВЧ проводимости активного двухполюсника могут позволить рассчитывать флуктуации амплитуды и частоты автоколебаний генераторов. Такой подход использован при теоретическом анализе в работах [1, 2]. Однако в литературе полностью отсутствуют работы, в которых содержались бы экспериментальные данные об уровне флуктуаций СВЧ проводимости активных двухполюсников.

В настоящей работе описана методика экспериментального исследования спектральных плотностей и корреляции флуктуаций активной и реактивной компонент СВЧ проводимости активных двухполюсников и приведены результаты экспериментального исследования флуктуаций проводимости ДГ трехсантиметрового диапазона длин волн.

Методика экспериментального исследования. Измерения проводились способом, предложенным в [3]. Исследуемый диод включался параллельно в линию передачи, и измерялись флуктуации амплитуды и фазы колебаний прошедших и отраженных от диода с последующим расчетом искомых величин. Если волновая проводимость линии Y_0 , СВЧ проводимость диода $Y = G + jB$ и выполняется такое соотношение между проводимостями Y и Y_0 , что система является устойчивой и автоколебания отсутствуют, то спектральные плотности флуктуаций действительной составляющей СВЧ проводимости $S_G(F)$, флуктуаций реактивной компоненты $S_B(F)$ и коэффициента корреляции между ними $\rho(F)$ связаны с энергетическими спектрами флуктуаций амплитуды отраженной волны $S_{|U|_{отр}}(F)$, прошедшей волны $S_{|U|_{пр}}(F)$ и спек-

рами флуктуаций фаз прошедшей $S_{\varphi_{\text{пр}}}(\bar{F})$ и отраженной $S_{\varphi_{\text{отр}}}(F)$ волн следующими соотношениями [3]:

$$\begin{aligned} S_{|U|_{\text{отр}}}(F) &= a_{11}S_G(F) + a_{12}S_B(F) + a_{13}\sqrt{S_G S_B} \rho(F), \\ S_{|U|_{\text{пр}}}(F) &= a_{21}S_G(F) + a_{22}S_B(F) + a_{23}\sqrt{S_G S_B} \rho(F), \\ S_{\varphi_{\text{отр}}}(F) &= a_{31}S_G(F) + a_{32}S_B(F) + a_{33}\sqrt{S_G S_B} \rho(F), \\ S_{\varphi_{\text{пр}}}(F) &= a_{41}S_G(F) + a_{42}S_B(F) + a_{43}\sqrt{S_G S_B} \rho(F). \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициенты в правой части (1) даются выражениями

$$\begin{aligned} a_{11} &= a_{32} = [G - (2Y_0 + G)|\Gamma|^2]^2 / |Y|^4, \\ a_{12} &= a_{31} = [B(1 - |\Gamma|^2)]^2 / |Y|^4, \\ a_{13} &= -a_{33} = B(1 - |\Gamma|^2)[G - (2Y_0 + G)|\Gamma|^2] / |Y|^2, \\ a_{21} &= a_{42} = [(2Y_0 + G)|\Gamma|^2]^2 / |Y|^4, \\ a_{22} &= a_{41} = B^2|\Gamma|^4 / |Y|^4, \\ a_{23} &= -a_{43} = B(2Y_0 + G)|\Gamma|^4 / |Y|^4, \end{aligned}$$

где

$$\Gamma = -Y / (2Y_0 + Y).$$

Структурная схема измерительной установки показана на рис. 1. Установка позволяет измерять значение проводимости диода $Y = G + jB$,

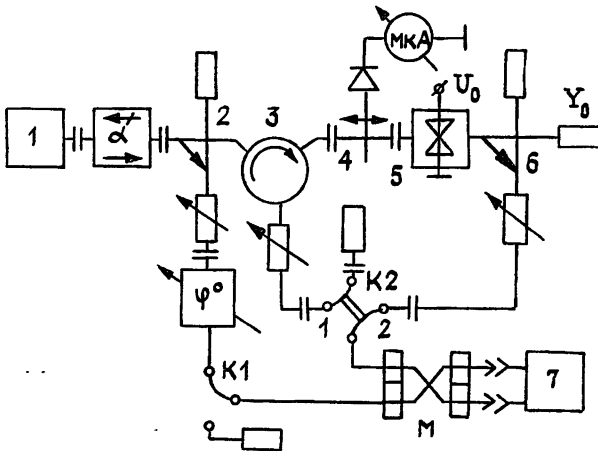


Рис. 1.

а также спектры флуктуаций амплитуды отраженной и прошедшей волн и спектр флуктуаций фазы отраженной волны. Сигнал задающего генератора 1 через направленный ответвитель 2, циркулятор 3 и измерительную линию 4 поступает на измерительную камеру проходного типа 5, в которую включен исследуемый диод. На выходе камеры имеется направленный ответвитель 6 и согласованная нагрузка Y_0 . Сигнал отраженной волны (прошедшей в положении 2 ключа K2) поступает на корреляционный измеритель 7 спектра амплитудных флуктуаций [4]. Для измерения спектра флуктуаций фазы отраженной волны использовался фазовый детектор на трехдецибелном мосте M (ключ K1 замкнут). опорным сигналом является сигнал падающей волны с направленного ответвителя 2. Исследуемый диод включен в камеру проходного типа, представляющую собой отрезок волновода уменьшенной высоты $b = 1,8$ мм, равной высоте керамики корпуса диода. На

концах измерительной камеры имеются экспоненциальные согласующие переходы к волноводу стандартного сечения. Диод находится на расстоянии примерно $a/4$ от боковой стенки волновода. Уменьшение высоты волновода и смещение диода к боковой стенке позволяют добиться отсутствия самовозбуждения при любом напряжении смещения диода за счет увеличения волновой проводимости линии, нагружающей диод.

Чувствительность установки определялась уровнем флуктуаций амплитуды задающего генератора и шумами детекторов и составляла 150 дБ/Гц на частоте анализа 10 кГц, и имеет зависимость от частоты по закону $1/F$. Измерения проводимости диода $Y = G + jB$ выполнялись с помощью измерительной линии.

Экспериментальные результаты. Исследованы диоды трехсантиметрового диапазона длин волн, изготовленные из $n^+ - n^0 - n$ -структур с длиной активной области $l = 12$ мкм и концентрацией примеси $n = 9 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$. Полупроводниковый кристалл был установлен в малогабаритном корпусе, имеющем паразитную емкость керамики $C_k \approx 0,1$ пФ и индуктивность ввода $L \approx 0,3$ нГн. Частота резонанса корпуса была много выше рабочей частоты, равной 10 ГГц.

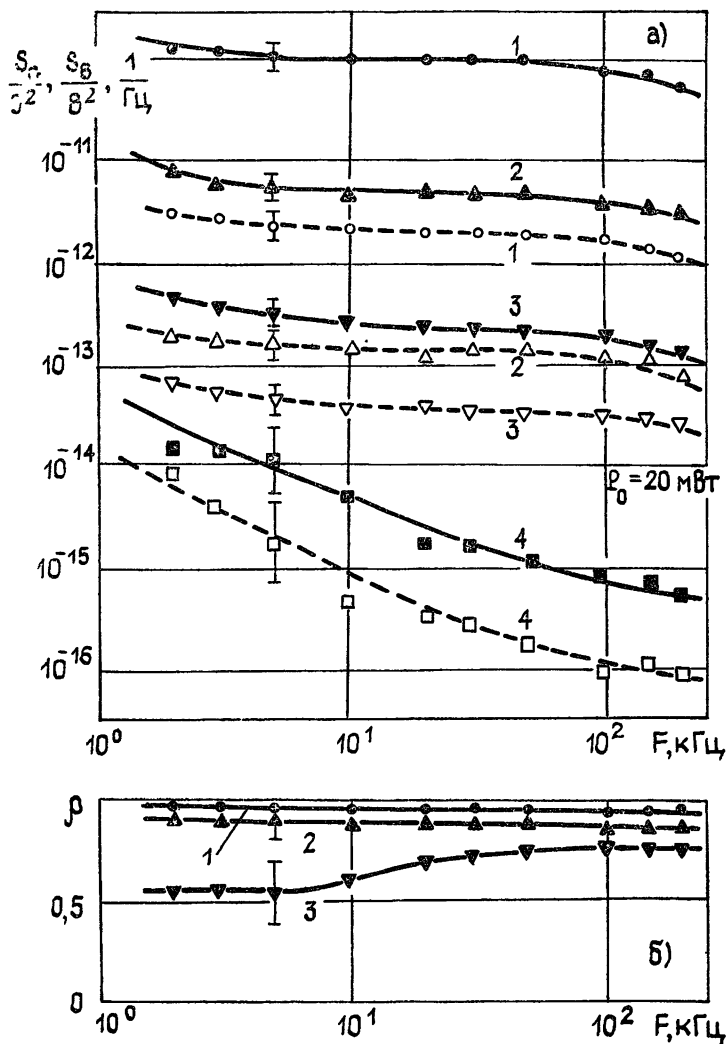


Рис. 2.

Как показали измерения, уровень флуктуаций проводимости существенно зависит от напряжения смещения на диоде U_0 и амплитуды

СВЧ сигнала. На рис. 2а,б показаны спектры $S_G(F)$ (сплошные линии), $S_B(F)$ (штриховые) и $\rho(F)$, измеренные при различном напряжении смещения в режиме малых амплитуд СВЧ сигнала (амплитуда менее 1В). Кривые 1 — $U_0=8$ В; 2 — $U_0=10$ В; 3 — $U_0=11,3$ В; 4 — $U_0=12$ В. Уровень флуктуаций проводимости максимален при напряжении смещения несколько выше порогового и уменьшается с ростом напряжения питания. В исследованном диапазоне частот при смещении незначительно выше порогового спектральная плотность флуктуаций слабо зависит от частоты, что позволяет предположить, что в этом режиме флуктуации проводимости вызываются сверхвысокочастотными флуктуационными процессами, в частности междолинным шумом [5], имеющим максимум интенсивности при полях, близких к критическому. При этом наблюдается глубокая корреляция между флуктуациями активной и реактивной компонент проводимости. При увеличении напряжения смещения уровень флуктуаций падает и проявляются частотно-зависящие спектральные составляющие. Это связано с изменением распределения электрического поля по длине диода.

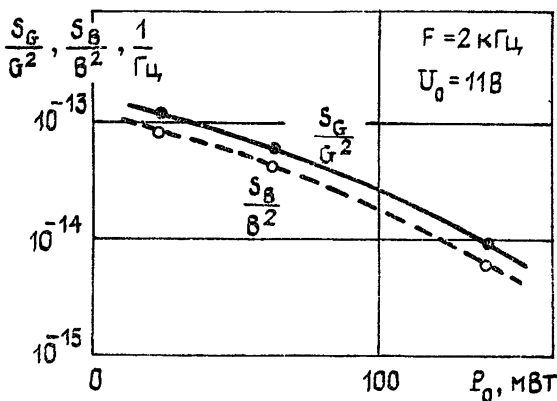


Рис. 3.

Измерения коэффициента корреляции при $U_0=12$ В не дали надежных результатов из-за недостаточно высокой чувствительности измерительной установки. Аналогичное воздействие на уровень флуктуаций и спектральную плотность оказывает амплитуда СВЧ сигнала.

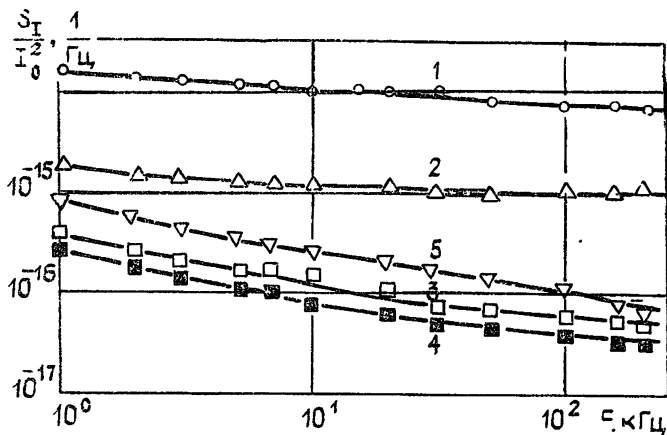


Рис. 4.

Увеличение амплитуды приводит к значительному уменьшению флуктуаций проводимости (рис. 3). Указанному на рис. 3 диапазону изменения мощности соответствует изменение амплитуды СВЧ напряжения на диоде от 0,9 В до 2,5 В. Заметим, что этот эффект проявляется уже при амплитудах гораздо меньших, чем амплитуды, соответствующие нормальному рабочему режиму генератора [6].

Спектры флуктуаций тока диода при различном напряжении смещения показаны на рис. 4. Кривая 1 — $U_0=6$ В; 2 — $U_0=8$ В; 3 — $U_0=10$ В; 4 — $U_0=12$ В; 5 — $U_0=4$ В. Кривая 5 снята в допороговом режиме. При напряжении выше порогового характер изменения спектральной плотности флуктуаций тока в зависимости от напряжения смещения соответствует изменению спектральной плотности флуктуаций проводимости (рис. 2а). Имеющиеся в литературе теоретические данные о флуктуациях СВЧ проводимости недостаточны для получения надежных количественных оценок, в связи с чем возможно лишь качественное сопоставление полученных результатов. Согласно [2] флуктуации проводимости, обусловленные флуктуациями концентрации носителей в «прикатодной» области и «протелной» области, определяются преимущественно флуктуациями в «прикатодной» области. Спектральные плотности флуктуаций проводимости и тока связаны соотношениями $S_G/G^2 = (a_t^2/c_0^2) \cdot (S_I/I_0^2)$, $S_V/B^2 = (b_t^2/c_0^2) \cdot (S_I/I_0^2)$, где коэффициенты преобразования имеют значения: $a_t = -0,26$; $b_t = 0,33$; $c_0 = 0,92$. Отсюда следует подобие спектров флуктуаций тока и активной и реактивной компонент проводимости, что и наблюдается экспериментально. Однако количественного совпадения не наблюдается. Относительные флуктуации реактивной компоненты проводимости S_V/B^2 оказываются примерно на порядок меньше, чем активной S_G/G^2 , тогда как оценки по [2] приводят к заключению о примерном равенстве интенсивности флуктуаций активной и реактивной компонент.

Впервые получены экспериментальные данные об уровне флуктуаций СВЧ проводимости диодов Ганна. Обнаружена сильная зависимость флуктуаций от напряжения смещения и амплитуды СВЧ сигнала. Имеющиеся в литературе теоретические представления не могут полностью объяснить наблюдаемые экспериментальные зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корнилов С. А., Шулёпов С. Н. // Тезисы докл. IV Всесоюзной конф. Флуктуационные явления в физических системах. — Пушкино, 1985. С. 31.
2. Мещеряков А. В., Румянцев С. Л. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1984. № 11. С. 19.
3. А. с. № 1203442 / А. С. Карасев. — Опул. в Б. И. 1986. № 1. С. 195.
4. Корнилов С. А. // Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ. 1977. Вып. 8(471). С. 57.
5. Бочков В. В., Карасев А. С., Киреев О. А. // Тезисы докл. IV Всесоюзной конф. Флуктуационные явления в физических системах. — Пушкино, 1985. С. 24.
6. Карасев А. С., Шевченко В. И. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1987. № 7. С. 18.

Ленинградский политехнический институт

Поступила в редакцию
24 ноября 1986 г.,
после доработки
30 декабря 1987 г.

LOW FREQUENCY FLUCTUATIONS OF MICROWAVE ADMITTANCE OF GUNN DIODES

A. S. Karasev, V. I. Shevchenko

A method has been developed for measurement of low frequency fluctuations of microwave admittance of the active two-ports. Experimental data are reported for spectral density and correlation coefficient of fluctuations of conductivity and susceptance of Gunn diodes as a function of the bias voltage and microwave power.