



ХАОТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В СВЧ- И НЧ-ЦЕПЯХ ГЕНЕРАТОРА НА ДИОДЕ ГАННА

Д.А. Усанов, С.Б. Вениг, С.С. Горбатов, Э.В. Труфакин

Представлены результаты экспериментального и теоретического исследований особенностей работы СВЧ-генератора на диоде Ганна, в котором цепь обратной связи содержит инерционную нелинейность в виде соединения детектора и фазосдвигающей цепи. Показано, что в низкочастотном контуре такого генератора могут возникать хаотические колебания. При возбуждении хаотических колебаний в цепи обратной связи происходит уширение спектральной линии СВЧ-излучения, причем ее ширина существенно меньше величины частотной полосы хаотической генерации в цепи обратной связи.

В генераторах на диодах Ганна в связи с широкополосностью отрицательного сопротивления диодов возможно одновременное возбуждение колебаний в СВЧ и сравнительно более низкочастотном (НЧ) диапазонах [1–5]. В частности, может быть реализована цепь обратной связи, в которой используется низкочастотная огибающая протектированного выходного СВЧ-сигнала, поступающая с детектора, установленного в СВЧ-тракте, через фазосдвигающие элементы на диод Ганна. Практическая ценность таких устройств подчеркивалась в работе [2]. Наличие СВЧ-тракта, детектора и фазосдвигающих элементов, соединение которых образует инерционную нелинейность, позволяет предположить, что в этом случае в низкочастотном контуре СВЧ-генератора на диоде Ганна могут возникать хаотические колебания, так же как это происходит в низкочастотных генераторах, описанных в [6]. Представляет интерес исследование динамики возникновения хаотических колебаний в НЧ- и СВЧ-цепях такого генератора, в частности, соотношение частотных полос шумовой генерации в этих цепях.

Для проведения экспериментальных исследований был использован СВЧ-генератор на диоде Ганна (рис. 1, а), представляющий собой отрезок прямоугоньного металлического волновода 1 с короткозамыкающим поршнем 2, в котором в разрыве стержневого держателя, являющегося продолжением центрального проводника коаксиала, установлен диод Ганна 3. С помощью другого стержневого держателя в отрезке волновода был расположен также детекторный диод 4, сигнал с которого поступал в цепь обратной связи 5. Цепь обратной связи включала в себя разделительные емкости 6, 7, эмиттерные повторители, используемые для согласования сопротивлений, фазовращатель, изменяющий фазу сигнала в пределах 0–1800 и не изменяющий амплитуды колебаний на выходе, усилитель с переменным коэффициентом усиления. Диод Ганна подключался к источнику питания 8.

В ходе экспериментальных исследований зависимостей амплитуды и частоты выходного сигнала СВЧ-генератора от напряжения питания и положения короткозамыкающего поршня при отключенной обратной связи были определены устойчивые (рис. 2, а, б) и неустойчивые (рис. 2, в) режимы работы генератора, а также условия, при которых в цепи питания возбуждаются низкочастотные колебания. Наблюдаемое при отключенной обратной связи возникновение шумовой генерации в СВЧ-генераторе может быть объяснено усилением тепловых и дробовых шумов в диоде Ганна, а также флуктуаций напряжения смещения. Следует отметить, что шумовой режим колебаний как в СВЧ-цепи, так и в цепи питания, наблюдался при одних и тех же настройках генератора в некотором диапазоне значений напряжения смещения на диоде Ганна, причем возникновение и исчезновение шумовой генерации на границах диапазона напряжений смещения происходило скачкообразно.

При включении обратной связи оказалось, что можно найти такие положения диода и короткозамыкающего поршня и такие значения коэффициента усиления и сдвига фазы в цепи обратной связи, при которых изменение напряжения смещения приводит к

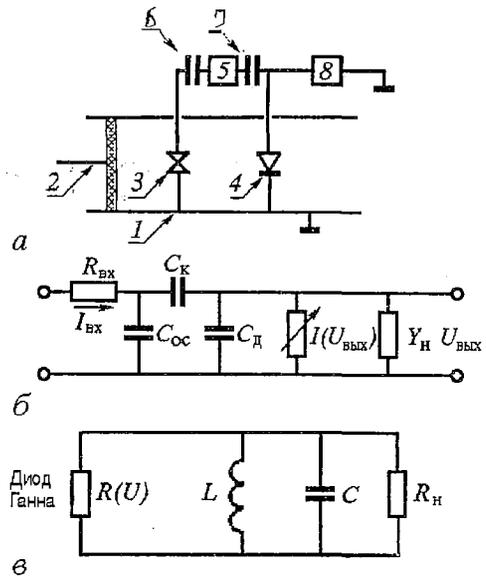


Рис. 1. Конструкция СВЧ-генератора на диоде Ганна (а) и его эквивалентные НЧ (б) и СВЧ (в) схемы: 1 – отрезок прямоугольного волновода; 2 – короткозамыкающий поршень; 3 – диод Ганна; 4 – детекторный диод; 5 – цепь обратной связи, представляющая собой последовательное соединение эмиттерных повторителей на входе и выходе, фазовращателя и усилителя; 6, 7 – разделительные конденсаторы; 8 – источник питания

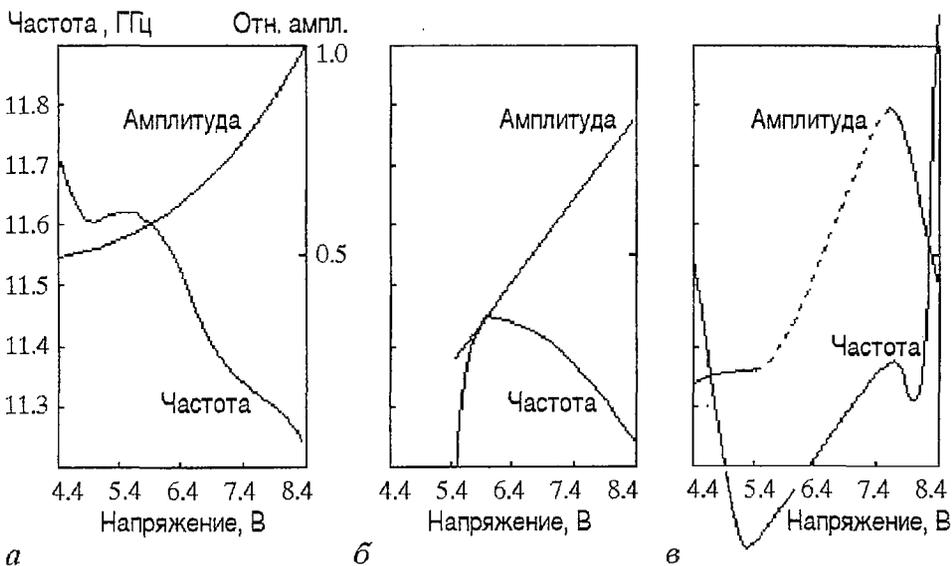


Рис. 2. Зависимость амплитуды и частоты выходного сигнала СВЧ-генератора на диоде Ганна от величины напряжения смещения на диоде, когда короткозамыкающий поршень расположен: а – на расстоянии $\lambda_b/4$ от плоскости включения диода Ганна (λ_b – длина волны в волноводе для средней частоты рабочего диапазона); б – на расстоянии 3.5 мм от отсчетной плоскости; в – на расстоянии 7.5 мм от отсчетной плоскости

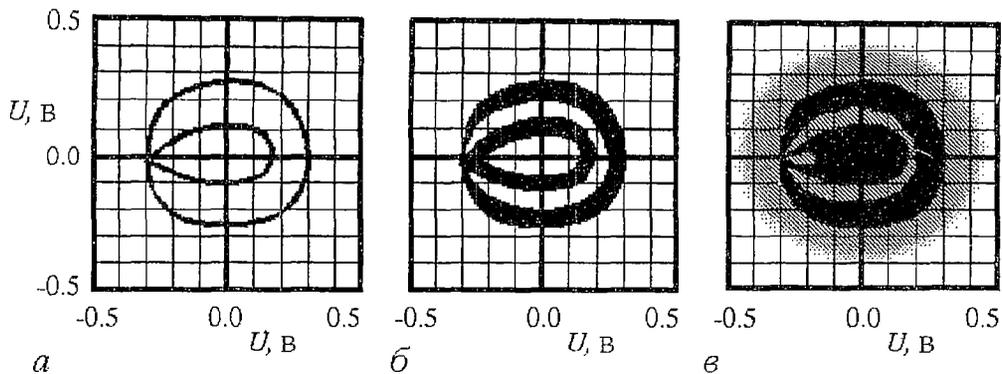


Рис. 3. Проекция фазового портрета колебаний в цепи обратной связи при различных напряжениях смещения на диоде Ганна: *а* – 7.5 В, *б* – 8.0 В, *в* – 8.5 В

постепенному увеличению числа составляющих спектра низкочастотного сигнала и последующему возникновению шумовой генерации в цепи обратной связи. Динамика перехода к хаосу хорошо иллюстрируется представленными на рис. 3 проекциями фазовых портретов низкочастотных колебаний в цепи обратной связи для различных напряжений смещения. Возникновение шумовых колебаний в цепи обратной связи приводит в этом случае к уширению спектральной линии СВЧ-излучения. Причем, в ходе исследований было обнаружено, что при напряжении питания на диоде Ганна 8.5 В в цепи обратной связи возникают шумовые колебания в полосе частот порядка 5 МГц, а спектральная линия основной частоты СВЧ-сигнала имеет значительно меньшую ширину, то есть коэффициент передачи частотной полосы шума из низкочастотной цепи в сверхвысокочастотную не равен единице. Так, в диапазоне напряжений питания на диоде Ганна 7.5–8.5 В ширина спектральной линии основной частоты СВЧ-излучения (10.5 ГГц), изменяется от 200 кГц до 1 МГц (рис. 4) при изменении частотной полосы шума от 200 кГц до 5 МГц.

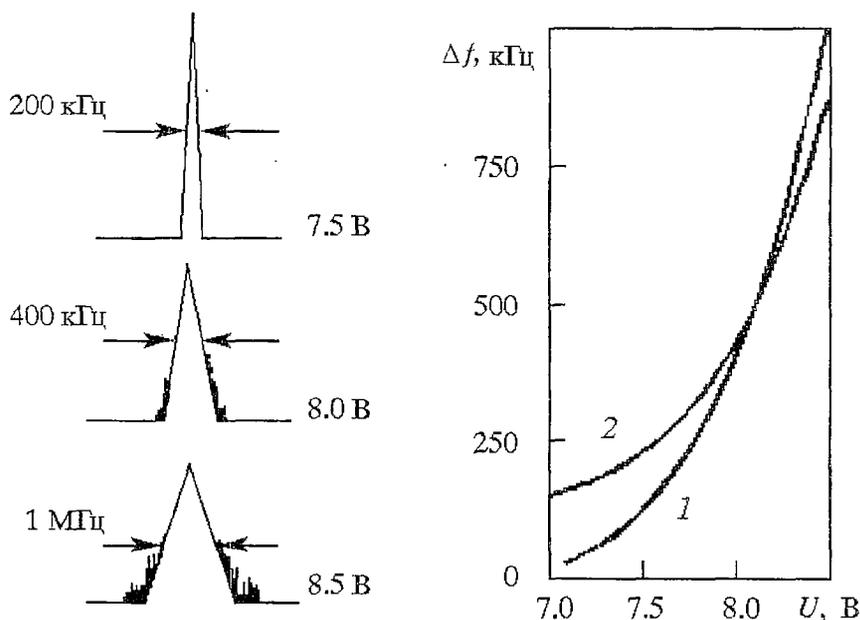


Рис. 4. Зависимости спектра выходного сигнала и ширины спектральной линии от величины напряжения смещения на диоде Ганна: *1* – эксперимент, *2* – расчет

Для оценки ширины спектральной линии основной частоты СВЧ-излучения был проведен теоретический анализ работы СВЧ-генератора на диоде Ганна с низкочастотной обратной связью с представлением его в виде эквивалентных схем и с использованием метода медленно меняющихся амплитуд. Анализ системы уравнений, описывающих низкочастотную цепь СВЧ-генератора, позволяет определить область частот, в которой возникает сложный динамический режим колебаний, и оценить амплитуду таких колебаний. В результате совместного решения уравнений для СВЧ-контура генератора и уравнения Фоккера – Планка с учетом амплитуды низкочастотных колебаний можно определить ширину спектральной линии СВЧ-излучения.

Низкочастотная цепь генераторного устройства, схематически изображенного на рис. 1, а, может быть представлена в виде эквивалентной схемы (рис. 1, б), где $I(U_{\text{вых}})$ – вольт-амперная характеристика диода Ганна, $Y_{\text{н}}$ – проводимость нагрузки, $C_{\text{ос}}$ – емкость цепи обратной связи, $C_{\text{к}}$ – конструктивная емкость, $C_{\text{д}}$ – емкость диода Ганна, $R_{\text{вх}}$ – входное сопротивление. Если применить метод узловых потенциалов к данной эквивалентной схеме, то нетрудно показать, что ей соответствует система уравнений

$$\begin{cases} (-Y_{\text{ос}} + Y_{\text{к}})U_{\text{вх}} - Y_{\text{к}}U_{\text{вых}} = I_{\text{вх}}, \\ Y_{\text{к}}U_{\text{вх}} - (Y_{\text{д}} + Y_{\text{н}} + Y_{\text{к}} - S)U_{\text{вых}} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где S – крутизна вольт-амперной характеристики диода Ганна, $Y_{\text{к}} = j\omega C_{\text{к}}$, $Y_{\text{ос}} = j\omega C_{\text{ос}}$ – проводимости конструктивных элементов и емкостей цепи обратной связи. Комплексный коэффициент передачи для такой схемы можно определить из второго уравнения системы (1)

$$\Phi(j\omega) = -U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = -Y_{\text{к}}/(Y_{\text{д}} + Y_{\text{н}} + Y_{\text{к}} - S).$$

Для определения коэффициента $\Phi(j\omega)\beta(j\omega)$, представляющего собой коэффициент передачи обратной связи, характеризующий величину напряжения, поступающего с выхода на вход через цепь обратной связи, разорвем цепь обратной связи и, считая, что при отключенном диоде к $R_{\text{вх}}$ приложено напряжение SU_1 , найдем величину напряжения U_0 на другом конце цепи обратной связи. Тогда

$$\Phi(j\omega)\beta(j\omega) = U_0/U_1, \quad (2)$$

а так как при разрыве обратной связи $Y_{\text{ос}}$ и $Y_{\text{д}}$ становятся равными нулю, и входное напряжение равно SU_1 , то система уравнений (1) принимает вид

$$\begin{cases} (Y_{\text{к}} + Y_{\text{н}})U_0 - Y_{\text{к}}U_1 = 0, \\ Y_{\text{к}}U_0 - (Y_{\text{н}} + Y_{\text{к}})U_1 = SU_1. \end{cases} \quad (3)$$

Решая систему уравнений (3), можно найти соотношение между напряжениями на входе и выходе цепи обратной связи

$$U_0 = -SU_1 Y_{\text{к}}/\Delta_0, \text{ откуда } U_0/U_1 = -SY_{\text{к}}/\Delta_0. \quad (4)$$

Используя (2), (4) и выражение для определителя системы (3) Δ_0 , можно получить выражение для коэффициента передачи обратной связи

$$\Phi(j\omega)\beta(j\omega) = -SY_{\text{к}}/[Y_{\text{к}}^2 - (Y_{\text{к}} + Y_{\text{н}})^2] = SY_{\text{к}}/(Y_{\text{н}}^2 + 2Y_{\text{н}}Y_{\text{к}}). \quad (5)$$

Если учесть, что $Y_{\text{к}} = j\omega C_{\text{к}}$, ввести обобщенную расстройку контура

$$\alpha = 2C_{\text{к}}R_{\text{н}}\omega_{\text{рез}}(\omega/\omega_{\text{рез}} - 1),$$

где $\omega_{рез}$ – резонансная частота контура, и переписать проводимость нагрузки в виде

$$Y_{II} = Y = (1+j\alpha)/R_{II},$$

то выражение (5) для коэффициента передачи цепи обратной связи можно представить следующим образом:

$$\Phi(j\omega)\beta(j\omega) = j\omega S C_k / \{ [(1+j\alpha)/R_{II}]^2 + 2[(1+j\alpha)/R_{II}]j\omega C_k \}.$$

Обозначим $q = \omega C_k R_{II}$ и выделим из комплексного выражения $\Phi(j\omega)\beta(j\omega) = a + jb$ действительную и мнимую части

$$a = -2(\alpha+q)SqR_{II} / \{ (1-2\alpha q - \alpha^2)^2 + 4(\alpha+q)^2 \},$$

$$b = 2(1-2\alpha q - \alpha^2)SqR_{II} / \{ (1-2\alpha q - \alpha^2)^2 + 4(\alpha+q)^2 \}.$$

Мнимая часть равна нулю при $\alpha^2 + 2\alpha q - 1 = 0$, то есть при $\alpha = -q \pm (q^2 + 1)^{1/2}$. Подставляя в выражение для $\Phi(j\omega)\beta(j\omega)$ значение частоты, соответствующее $b=0$, находим значение a , при котором система близка к самовозбуждению,

$$a = SqR_{II} / [2(\alpha+q)].$$

Чтобы оценить устойчивость системы в соответствии с критерием Найквиста, комплексный коэффициент усиления в системе с обратной связью обычно представляют в виде

$$\Phi_0(j\omega) = \Phi(j\omega) / [1 - \Phi(j\omega)\beta(j\omega)],$$

где $\Phi(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи при разомкнутой цепи обратной связи.

Согласно критерию Найквиста, система устойчива, если годограф произведения $\Phi(j\omega)\beta(j\omega)$ не охватывает точку (1,0). Для выполнения условий абсолютной устойчивости необходимо [7], чтобы

$$\text{Re}[\Phi(j\omega)\beta(j\omega)] < 1.$$

В этом случае границу области устойчивости определяет выражение

$$SqR_{II} / [2(\alpha+q)] = 1.$$

Используя это условие, нетрудно убедиться, что возбуждение колебаний происходит на частоте

$$\omega = 2\alpha / [C_k R_{II} (SR_{II} - 2)].$$

Следует отметить, что система (1) позволяет проанализировать зависимость частоты, на которой возникает неустойчивость, как от величины переходной емкости C_{oc} ветви обратной связи, так и от коэффициента усиления усилителя в цепи обратной связи, и оценить амплитуду колебаний.

Частота самовозбуждения цепи обратной связи определяется значениями C_{oc} , C_k , которые велики по сравнению с собственной емкостью диода Ганна, поэтому неустойчивость возникает в области низких частот по отношению к частоте генерации СВЧ.

Рассмотрим теперь СВЧ-контур генератора на диоде Ганна, который можно представить в виде эквивалентной схемы, приведенной на рис. 1, в. Нетрудно показать, что для этой эквивалентной схемы имеет место следующее нелинейное уравнение:

$$\ddot{U} - \omega_0^2 U = [1/(R_n C)] \dot{U} [1 - R_n (a_1 + a_2 U^2/2)], \quad (6)$$

где $\omega_0^2 = 1/LC$, R_n – сопротивление внешней СВЧ-схемы, а выражение $(a_1 + a_2 U^2/2)$ определяет нелинейную проводимость диода Ганна. Введем безразмерную переменную $t' = \omega_0 t$ и обозначим $\mu = 1/\omega CR_n$, $P = 1 - R_n a_1$. В этом случае уравнение (6) принимает вид

$$\ddot{x} + x = \mu \dot{x} (P - R_n a_2 x^2/2). \quad (7)$$

Малое значение параметра μ позволяет использовать для решения уравнения (7) теорию возмущений. В первом приближении теории возмущений решение уравнения (7) отличается от решения для гармонического осциллятора

$$x = r \sin(t' + \varphi),$$

где амплитуду и фазу можно считать постоянными в связи с тем, что r и φ оказываются «медленными» функциями времени [8], а именно, зависящими от t' через так называемое «медленное» время $\Theta = \mu t'$

$$x = r(\Theta) \sin(t' + \varphi(\Theta)). \quad (8)$$

Вычисляя с точностью до первого порядка по μ производные по t' рассматриваемого уравнения (8), получаем

$$\dot{x} = \mu [\dot{r} \sin(t' + \varphi) + r \dot{\varphi} \cos(t' + \varphi)] + r \cos(t' + \varphi), \quad (9)$$

$$\ddot{x} + x = 2\mu [\dot{r} \cos(t' + \varphi) - r \dot{\varphi} \sin(t' + \varphi)].$$

Обозначим $F(x, \dot{x}) = (P - R_n a_2 x^2/2)$. Очевидно, что функция F , зависящая от периодических по $u = t' + \varphi$ функций, сама периодична по u с периодом 2π и может быть поэтому разложена в ряд Фурье

$$F(r \sin u, r \cos u) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin nu + b_n \cos nu),$$

$$\left. \begin{array}{l} a_n(r) \\ b_n(r) \end{array} \right\} = 1/(2\pi) \int_{-\pi}^{\pi} F(r \sin u, r \cos u) \left. \begin{array}{l} \sin nu \\ \cos nu \end{array} \right\} du.$$

Малое значение параметра μ позволяет предположить, что форма колебаний будет мало отличаться от синусоидальной, и из всего ряда Фурье существенный вклад будут вносить только члены, осциллирующие по t' с основной безразмерной частотой, то есть с $n=1$. Таким образом, уравнение (9) принимает вид

$$2\mu [\dot{r} \cos(t' + \varphi) + r \dot{\varphi} \sin(t' + \varphi)] = a_1(r) \sin(t' + \varphi) + b_1(r) \cos(t' + \varphi).$$

Требую, чтобы это уравнение тождественно удовлетворялось по t' , то есть, собирая члены с $\sin(t' + \varphi)$, $\cos(t' + \varphi)$ и приравнявая нулю соответствующие коэффициенты, имеем два уравнения для r и φ как функций «медленного» времени $\Theta = \mu t'$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{r} = R(r), \\ r \dot{\varphi} = \Phi(r), \end{array} \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} R(r) \\ \Phi(r) \end{array} \right\} = -1/2 \left\{ \begin{array}{l} b_1(r) \\ a_1(r) \end{array} = -1/(2\pi) \int_{-\pi}^{\pi} F(r \sin u, r \cos u) \begin{array}{l} \cos u \\ \sin u \end{array} \right\} du.$$

При подстановке $x=r \sin u$ в выражение для F получаем

$$\dot{x}(P - R_{\text{н}} a_2 x^2/2) = r \cos u (P - R_{\text{н}} a_2 r^2 \sin^2 u/2) = r \cos u (P - R_{\text{н}} a_2 r^2/4).$$

Следовательно $a_1=0$, $b_1=r(P - R_{\text{н}} a_2 r^2/4)$, то есть

$$\Phi(r) = 0, \quad R(r) = r(P - R_{\text{н}} a_2 r^2/4)/2.$$

Таким образом, получаем уравнения

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{r} = (r/2)(P - R_{\text{н}} a_2 r^2/4), \\ \dot{\varphi} = 0. \end{array} \right. \quad (10)$$

Возможные состояния равновесия в этом случае: $r=0$ и при $P>0$ $r=2[P/(R_{\text{н}} a_2)]^{1/2}$.

Из анализа решения (10) следует, что при $P<0$ состояние равновесия $r=0$ устойчиво, а при $P>0$ – неустойчиво, но устойчив предельный цикл с $r=2[P/(R_{\text{н}} a_2)]^{1/2}$. Ширину спектральной линии можно оценить, рассчитав величину наименее вероятнейшего отклонения изображающей точки от предельного цикла. Воспользуемся для этого уравнением Фоккера – Планка, которое имеет следующий вид

$$\partial v/\partial t = -\partial/\partial r(Rv) - (1/r)\partial/\partial \varphi(\Phi v) + (B/2)\{\partial/\partial r[r\partial/\partial r(v/r)] + (1/r^2)\partial^2 v/\partial \varphi^2\}, \quad (11)$$

где $v=v(t, r, \varphi|t_0, r_0, \varphi_0)$ – плотность вероятности перехода. В качестве R и Φ в уравнение (11) следует подставить правые части динамических уравнений (10), то есть положить $R=r(P - R_{\text{н}} a_2 r^2/2)/2$, $\Phi=0$. Тогда уравнение (11) примет вид

$$\partial v/\partial t = -\partial/\partial r(Rv) + (B/2)\{\partial/\partial r[r\partial/\partial r(v/r)] + (1/r^2)\partial^2 v/\partial \varphi^2\}.$$

Для стационарного решения $w(r, \varphi)$ имеем

$$d/dr[Rw - (B/2)r d/dr(w/r)] = 0.$$

Интегрируя вторично выражение, стоящее в скобках, получаем выражение

$$w = C r \exp(2/B \int_0^r R dr).$$

Величина C определяется из условия нормировки

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\infty} w dr = 1.$$

Подставив в эти выражения R , получаем искомое стационарное распределение

$$w(r, \varphi) dr d\varphi = \{\exp[-(P - R_{\text{н}} a_2 r^2/2)^{1/2}/(4B)] / [\pi(\pi B)^{1/2}(1 + \operatorname{erf}(P/(2B^{1/2})))]\} r dr d\varphi.$$

При $P > 0$ наименее вероятнейшим значением r будет

$$r_m = [P/2 + (P^2/4 + B)^{1/2}]^{1/2}.$$

С использованием системы (10) и выражения для наименее вероятнейшего значения r_m , в котором неизвестная величина B определялась из данных эксперимента и результатов решения системы (1), была проведена теоретическая оценка изменения ширины спектральной линии СВЧ-генерации в зависимости от

напряжения смещения на диоде Ганна. При расчетах были использованы значения параметров эквивалентных схем, характерные для исследовавшейся схемы генератора и использованного типа диода, определявшиеся экспериментально: $C_{oc}=1\div 3\cdot 10^3$ пФ, $C_k=100$ пФ, $C_n=0.8$ пФ, $L=100$ нГн, $R_n=50$ Ом. Данные расчета приведены на рис. 4,б и свидетельствуют о достаточно хорошем совпадении теоретических расчетов и экспериментальных данных.

Таким образом, в СВЧ-генераторе на диоде Ганна, в котором цепь обратной связи содержит инерционную нелинейность в виде соединения детектора и фазосдвигающей цепи, в низкочастотном контуре могут возникать хаотические колебания. При возбуждении хаотических колебаний в цепи обратной связи происходит уширение спектральной линии СВЧ-излучения, причем ее ширина существенно меньше величины частотной полосы хаотической генерации в цепи обратной связи.

Библиографический список

1. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Скрипаль А.В. Особенности низкочастотной генерации в диодах Ганна // РЭ. 1981. Т. 24, № 10. С. 67.
2. Усанов Д.А., Авдеев А.А. Использование эффекта автодинного детектирования в генераторах на диодах Ганна для двухпараметрового измерения диэлектриков // Дефектоскопия. 1995. № 4. С. 42.
3. Романюк В.А., Шарифов Т.М. Подавление паразитных НЧ-колебаний в генераторах Ганна // Радиотехника. 1977. Т. 32, № 12. С. 74.
4. Острейковский А.М. Особенности низкочастотной неустойчивости генераторов Ганна // Радиотехника. 1989. № 6. С. 19.
5. Усанов Д.А., Коротин Б.Н. Устройство для измерения толщины металлических пленок, нанесенных на диэлектрическую основу // Приборы и техника эксперимента. 1985. № 1. С. 254.
6. Анищенко В.С. Сложные колебания в простых системах. М.: Наука, 1990.
7. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука, 1968.
8. Капранов М.В., Кулешов В.Н., Уткин Г.М. Теория колебаний в радиотехнике. М.: Наука, 1984.

Саратовский государственный
университет

Поступила в редакцию 19.03.99

CHAOTIC OSCILLATIONS IN MICROWAVE AND LOW-FREQUENCY CIRCUITS OF THE GUNN DIODE GENERATOR

D.A. Usanov, S.B. Wenig, S.S. Gorbatov, E.V. Trufakin

The results of experimental and theoretical researches of operation features of the Gunn diode microwave generator, in which the feedback circuit contains inertial non-linearity as a connection of the detector and phase-shifting circuit, are presented. It is shown, that there can be chaotic oscillations in a low-frequency circuit of such generator. When the chaotic oscillations in a feedback circuit are excited, spectral line of microwave radiation is widened, and its width is less than frequency band magnitude of a chaotic generation in a feedback circuit.



Усанов Дмитрий Александрович родился в 1943 году в Менделеевске (Татария). Окончил Саратовский госуниверситет (1965). Кандидат физико-математических наук (1972), доктор физико-математических наук (1989), с 1990 года – профессор кафедры физики твердого тела, с 1985 года по настоящее время – заведующий кафедрой физики твердого тела, с 1989 года – проректор по НИР СГУ. Автор большого числа статей и изобретений по твердотельной электронике и радиофизике. Заслуженный деятель науки РФ, академик МАН ВШ, член IEEE.



Вениг Сергей Борисович – родился в 1957 году в Саратове. После окончания Саратовского государственного университета (1979) работал инженером ОКБ ПО «Тантал». С 1981 года работает в СГУ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1988) по специальности «радиофизика, включая квантовую радиофизику», доцент кафедры физики твердого тела СГУ. Область научных интересов, по направлениям которой опубликовано более 50 научных работ, – физика полупроводников, твердотельная электроника и радиофизика.

E-mail: WenigSB@info.sgu.ru



Горбатов Сергей Сергеевич – родился в 1946 году в Энгельсе Саратовской области. После окончания СГУ (1973) работал на предприятиях электронной промышленности и в НИИ механики и физики при СГУ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в СГУ (1991) по радиофизике. В настоящее время является докторантом СГУ. Область научных интересов – теория колебаний и волн, радиофизика, нелинейная динамика и полупроводниковая электроника СВЧ. Автор многочисленных статей по указанным выше направлениям.



Труфакин Эдуард Владимирович – родился в 1975 году в городе Бельцы, окончил Саратовский государственный университет (1998). После окончания СГУ учится в очной аспирантуре на кафедре физики твердого тела. Область научных интересов – твердотельная электроника и нелинейная динамика.