



ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ХАРАКТЕРА ИМПЕДАНСА ДИОДОВ ГАННА НА РАБОТУ СВЧ ГЕНЕРАТОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Д.А.Усанов, С.Б.Вениг, С.С.Горбатов, А.А.Семенов

Теоретически и экспериментально исследована нелинейная динамика процессов в СВЧ генераторах на диодах Ганна. Показана возможность возникновения хаотических колебаний при напряжениях смещения, в несколько раз превышающих пороговое. Исследован режим многочастотной генерации в диодах Ганна, объяснено появление в рабочей полосе частот спектральных компонент, не связанных целочисленными соотношениями между собой. Экспериментально обнаружен и исследован эффект синхронизации мод при воздействии на генератор внешним сигналом на частоте субгармоники высокой кратности одной из составляющих спектра. Установлена возможность существования явления гистерезиса в синхронизированном СВЧ генераторе на диоде Ганна как на верхнем, так и на нижнем частотном краю полосы синхронизации, что позволяет сделать заключение о том, что при различных режимах работы нелинейная составляющая реактивности диода, зависящая от амплитуды сигнала, может иметь не только индуктивный, но и емкостной характер. Исследована динамика изменения формы огибающей выходного сигнала при работе генератора в режиме биений, показана возможность использования такого режима в качестве эффективного метода амплитудной модуляции.

Известно, что импеданс диода Ганна имеет ярко выраженный нелинейный характер [1]. При этом степень нелинейности диода существенно зависит от его режима питания, элементов конструктивного исполнения, типа электродинамической системы, в которую он помещен, частоты и других факторов [2 - 5]. Поэтому для адекватного качественного описания режимов работы генераторов на диодах Ганна желательно использовать эквивалентные схемы, по возможности наиболее полно отражающие влияние этих перечисленных факторов.

1. Эквивалентная схема и математическая модель генератора на диоде Ганна

Эквивалентная схема генератора на диоде Ганна может быть представлена в виде, изображенном на рис. 1. В ее состав входят элементы внешнего по отношению к диоду СВЧ контура, состоящего из сопротивления нагрузки R_n , индуктивности L_n и емкости C_n . Через элемент связи L_n внешний контур подключается к диоду, представленному в виде соединенных параллельно нелинейных сопротивления $r(U_1)$ и емкости $C_f(U_1)$ активной структуры [6] с подключенными к ним элементами, отражающими сопротивление потерь R_s ,

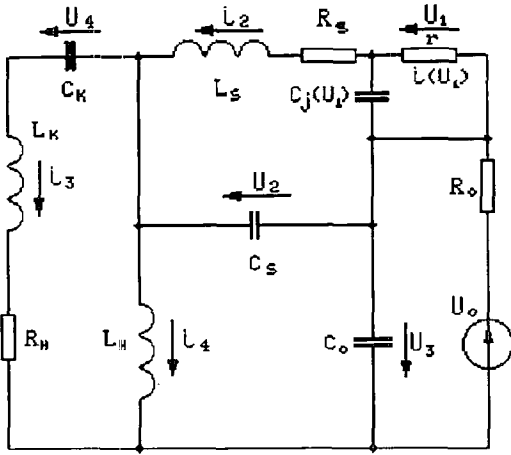


Рис. 1. Эквивалентная схема генератора на диоде Ганна

емкость C_s и индуктивность L_s корпуса диода. R_0, C_0 - сопротивление и емкость цепи питания. Нелинейная емкость диода $C_j(U_1)$ может быть представлена в виде [1]

$$C_j(U_1) = C_0 - \beta U_1^2, \quad (1)$$

где β - постоянный коэффициент, C_0 - независимая от напряжения U_1 на активном элементе диода составляющая емкости.

Система дифференциальных уравнений для напряжений и токов, составленная методом переменных состояния и представляющая собой математическую модель генератора на диоде Ганна, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dU_1}{dt} &= \frac{1}{C_j(U_1)} (i_2 - i(U_1)), & \frac{dU_2}{dt} &= \frac{1}{C_s} (i_2 - i_3 - i_4), \\ \frac{dU_3}{dt} &= \frac{1}{C_0} \left(\frac{U_0 - U_3}{R_0} + i_3 + i_4 \right), & \frac{dU_4}{dt} &= \frac{i_4}{C_k}, \\ \frac{di_2}{dt} &= \frac{1}{L_s} (U_2 - U_1 - i_2 R_s), & \frac{di_3}{dt} &= \frac{1}{L_k} (U_3 - U_2 - U_4 - i_3 R_n), \\ & & \frac{di_4}{dt} &= \frac{1}{L_n} (U_2 - U_3), \end{aligned} \quad (2)$$

где U_0 - напряжение смещения, U_1 - напряжение на эпитаксиальной структуре, U_2 - напряжение на выводах корпуса диода. Нелинейная зависимость тока через активный элемент i_1 от действующего на нем напряжения U_1 [7] аппроксимировалась выражением

$$i(U_1) = Sqn(\mu_0(U_1 + D)/L + V_s[(U_1 + D)/U_n]^4)/(1 + [(U_1 + D)/U_n]^4),$$

где U_n - пороговое напряжение, μ_0 - подвижность носителей заряда, V_s - дрейфовая скорость, соответствующая насыщению характеристики при больших напряжениях поля, L - протяженность эпитаксиальной структуры, S - площадь поперечного сечения диода, n - концентрация ионизированных доноров, q - заряд электрона, $D = 0$ при $U_1 < U_n$, $D = \text{const}$ при $U_1 > U_n$. Гистерезисный характер динамической вольт-амперной характеристики учитывался различными значениями порогового напряжения при возрастании и уменьшении потенциала U_1 . Расчеты, проведенные в [7], свидетельствуют о возможности применения данной аппроксимации вольт-амперной характеристики диода в качестве динамической на частотах до 10 ГГц.

Представленная модель позволяет провести анализ работы генератора на временном языке без ограничений на форму колебаний и на отношение запасенной и расходуемой за период колебаний энергии [8].

2. Результаты численного моделирования

При проведении численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (2) были выбраны следующие значения параметров эквивалентной схемы: $C_s = 0.06$ пФ, $C_k = 1$ пФ, $C_o = 10$ пФ, $L_s = 1$ нГн, $L_n = 1.5$ нГн, $L_k = 2$ нГн, $R_n = 50$ Ом, $R_o = 10$ Ом.

Заданные значения параметров внешней СВЧ цепи L_n , L_k , C_k и R_n , соответствуют часто применяемой на практике коаксиально-волноводной конструкции СВЧ-генератора на диоде Ганна [9], а параметры диода соответствуют аналогичным характеристикам выпускаемых промышленностью диодов Ганна трехсантиметрового диапазона длин волн.

Результаты численного исследования поведения системы (2) при заданных параметрах эквивалентной схемы свидетельствуют о том, что при напряжениях смещения $U_0 \approx 8 \pm 0.05$ В колебания имеют близкий к гармоническому характер. При U_0 из интервала 9÷9.5 В колебательный процесс приобретает релаксационный характер (рис. 2, а), при $9.5 \text{ В} < U_0 < 10 \text{ В}$ наблюдаются колебания (рис. 2, б), соответствующие режиму многочастотной генерации [10].

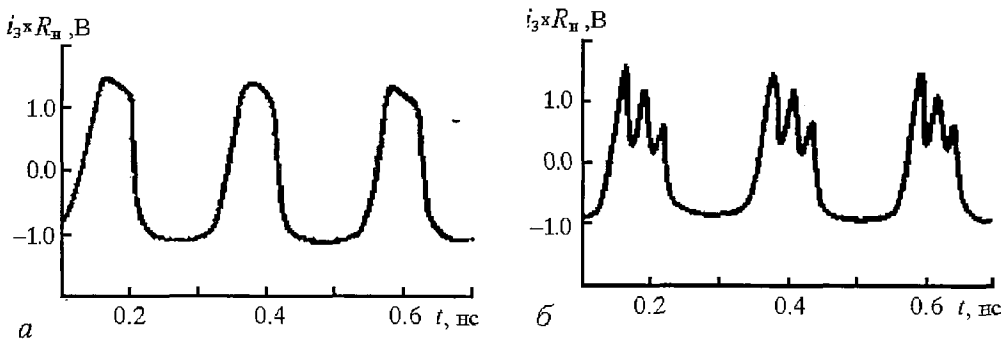


Рис. 2. Временные зависимости напряжения СВЧ: а - при $U_0 = 9.5$ В; б - при $U_0 = 10$ В

В интервале значений U_0 от 10.1 до 10.3 В был отмечен сложный динамический режим (рис. 3, б), по характеру напоминающий хаотический, причем в окрестности значения 10.1 В наблюдались колебания, соответствующие режиму перемежающейся хаотизации (рис. 3, а).

Определение сложного динамического режима как хаотического было сделано на основе следующих критериев: длительное отсутствие периодичности, сечение фазовой плоскостью представляло собой заполненный траекториями объем, указанный режим возникал в результате перехода через перемежаемость (периодичность колебаний нарушалась аperiodическими всплесками).

Тем самым можно считать теоретически подтвержденной возможность возникновения хаотических колебаний в многоконтурной системе, содержащей

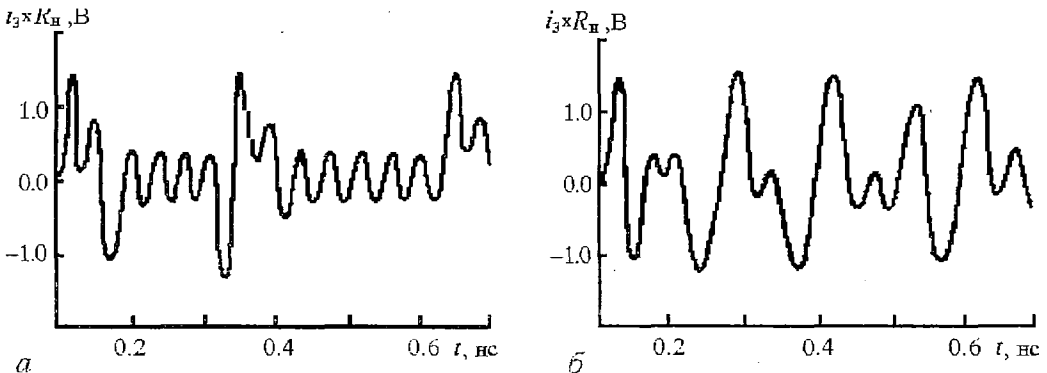


Рис. 3. Временные зависимости напряжения СВЧ: а - при $U_0 = 10.1$ В; б - при $U_0 = 10.3$ В

диод Ганна, при напряжениях смещения не только близких к пороговому [11], но и в несколько раз его превышающих.

При выборе параметров эквивалентной схемы C_k, C_0, L_s, L_k равными $C_k=0.5$ пФ, $C_0 = 20$ пФ, $L_s = 1.8$ нГн, $L_k = 1$ нГн и прежних остальных параметрах режим многочастотной генерации наблюдался в более широком диапазоне значений напряжения смещения.

Анализ спектрального состава сигнала показывает, что в рассматриваемой схеме при выбранных значениях ее параметров и напряжении смещения $U_0 \approx 7 \pm \pm 0.2$ В спектр сигнала близок к одночастотному. При увеличении напряжения смещения наблюдается сложный динамический режим многочастотной генерации, отличающийся тем, что спектральные компоненты в рабочей полосе частот волноводной линии передачи (8÷12 ГГц) не связаны целочисленными соотношениями между собой. При значениях напряжения смещения $U_0 > 10$ В в спектре появлялась субгармоническая компонента СВЧ сигнала с частотой $f_0/2$.

Спектральный состав напряжения СВЧ на нагрузке, полученный в результате численного анализа системы уравнений (2) при различных напряжениях смещения изображен на рис. 4 и 5.

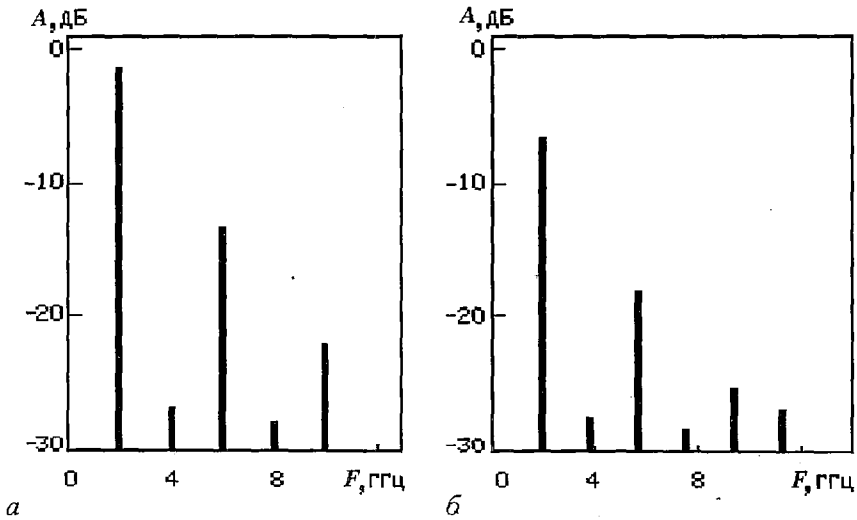


Рис. 4. Спектральный состав сигнала: *a* - при $U_0 = 7.5$ В; *б* - при $U_0 = 8$ В

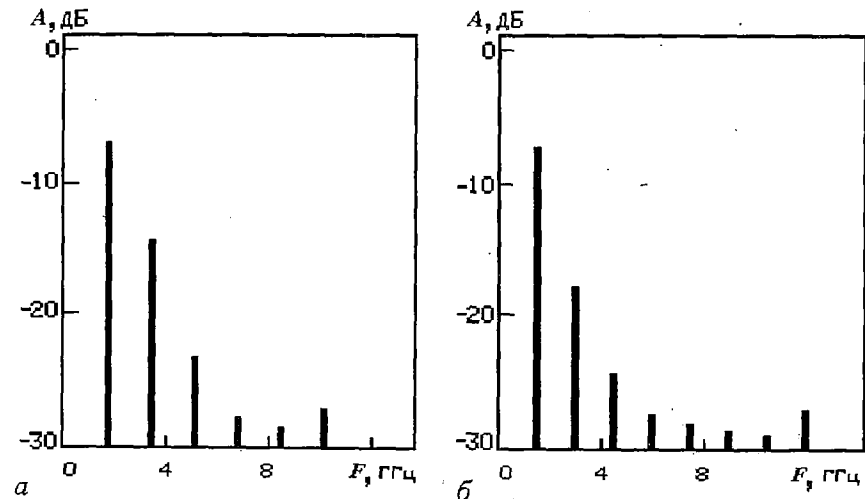


Рис. 5. Спектральный состав сигнала: *a* - при $U_0 = 10$ В; *б* - при $U_0 = 11$ В

3. Экспериментальное исследование изменения колебательных режимов в СВЧ генераторах на диодах Ганна

Обнаруженный в результате численного исследования режим многочастотной генерации в колебательной системе, включающей диод Ганна, при котором составляющие спектра выходного сигнала не связаны целочисленными соотношениями между собой, был исследован нами экспериментально. Такой режим наблюдался в однотипных коаксиально-волноводных конструкциях СВЧ генераторов в различных диапазонах длин волн: от трехсантиметрового до восьмимиллиметрового.

В эксперименте исследовалось влияние внешних сигналов высокой и низкой частоты на характеристики спектра выходного сигнала СВЧ генератора, работающего в режиме многомодовой генерации. При воздействии на генератор внешним сигналом с частотой, близкой к одной из частот спектра, генератор переходил в режим синхронизации. Качественно иная картина наблюдалась при подаче внешнего сигнала на частоте далекой субгармоники одной из составляющих спектра [12]. Синхронизирующий сигнал мощностью 400 мВт и частотой из интервала 500÷600 МГц подавался в цепь смещения активного элемента генератора, работающего в диапазоне частот 11÷18 ГГц, через

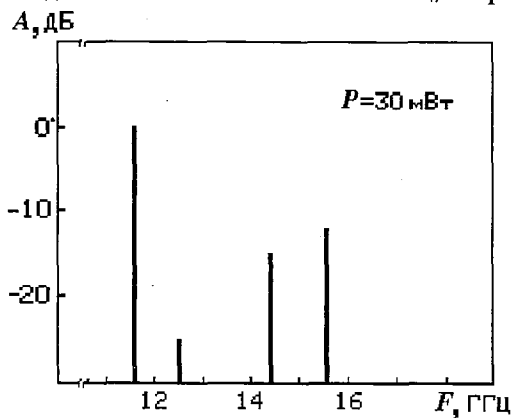


Рис. 6. Выходной спектр генератора в отсутствие синхронизирующего сигнала

разделительную емкость. Многомодовый режим генерации наблюдался в интервале напряжений смещения 7.5÷÷8.5 В. В отсутствие внешнего сигнала составляющие спектра выходного сигнала не обладали целочисленной кратностью. Спектр выходного сигнала в этом режиме представлен на рис. 6. При подаче внешнего сигнала спектр генерации диода Ганна изменялся как по частотам, так и по амплитудам его составляющих, а при переходе в режим синхронизации субгармоникой каждая мода в спектре выходного сигнала занимала положение, соответствующее по частоте ближайшей к ней гармонике синхронизирующего сигнала. Частота внешнего сигнала выбиралась равной частоте субгармоники одной из мод в интервале от двадцать пятой до тридцать первой. Выходной спектр диодного генератора при различных частотах синхронизирующего сигнала показан на рис. 7.

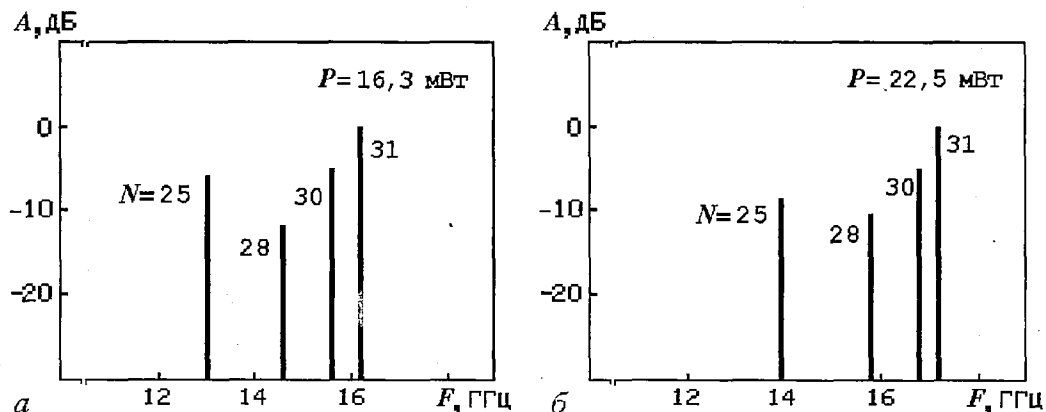


Рис. 7. Выходной спектр генератора при различных частотах синхронизирующего сигнала: а - при частоте 520 МГц; б - при частоте 560 МГц; N - номер гармоник синхронизированного сигнала

Приведенные результаты эксперимента свидетельствуют о проявлении эффекта синхронизации мод в СВЧ генераторе на диоде Ганна [12].

Общепринято [13-14], что в выражении для реактивности диодов Ганна (1) величина коэффициента β либо пренебрежимо мала, либо положительна, то есть считают, что зависящая от амплитуды СВЧ сигнала нелинейная составляющая реактивности имеет индуктивный характер. Знак коэффициента β определяет характер зависимости резонансной частоты генератора от амплитуды воздействующего на него сигнала. Сдвиг резонансной частоты по отношению к частоте свободных автоколебаний приводит к асимметрии амплитудно-частотной характеристики синхронизированного генератора, выражающейся в отклонении ее максимума в область положительных или отрицательных значений расстройки. Существование такого наклона амплитудно-частотной характеристики обуславливает возникновение гистерезисного эффекта при входе в режим синхронизации и выходе из него. Традиционные представления о характере зависимости реактивной проводимости от амплитуды сигнала позволяют, таким образом, сделать вывод, что в синхронизированных генераторах на диодах Ганна гистерезис либо не наблюдается (при малых βU_1^2), либо должен наблюдаться в области положительных значений расстройки, то есть при частотах внешнего сигнала, превышающих частоту собственной генерации [13].

Для выявления особенностей работы синхронизированного СВЧ генератора на диоде Ганна, связанных с нелинейным характером его реактивности, были проведены экспериментальные исследования при различных значениях напряжения питания, частоты собственной генерации и мощности сигнала синхронизации в диапазоне частот 30-32 ГГц.

В процессе исследований было обнаружено, что гистерезис при входе в режим синхронизации и выходе из него не наблюдается, если спектр собственного сигнала СВЧ генератора на диоде Ганна имеет одномодовый характер, либо амплитуда основной частоты превышает остальные на 10-15 дБ. Типичная экспериментальная зависимость мощности выходного сигнала от величины расстройки в отсутствие гистерезиса представлена на рис. 8. Мощность синхронизирующего сигнала в этом случае не превышала 30 мкВт.

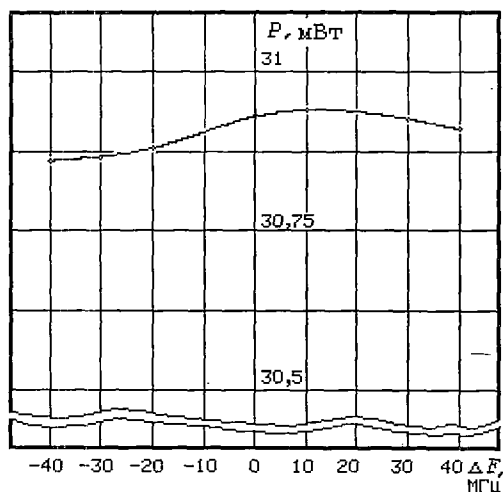


Рис. 8. Зависимость мощности выходного сигнала от величины расстройки в отсутствие гистерезисных явлений

При мощностях синхросигнала 100 и 150 мкВт на границах полосы синхронизации наблюдались гистерезисные явления. Причем гистерезис при входе и выходе из режима синхронизации был отмечен как в области положительных (рис. 9, а), так и в области отрицательных значений расстройки (рис. 9, б). Генератор работал при этом в различных режимах, спектр его сигнала в обоих случаях имел многомодовый характер. Представленные на рисунках зависимости мощности выходного сигнала синхронизированного генератора от величины расстройки получены при различных положениях настроечных элементов генератора, значениях напряжения смещения и частотах собственной генерации.

Результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности возникновения явления гистерезиса в синхронизированном СВЧ генераторе на диоде Ганна, как на верхнем, так и на нижнем частотном краю полосы синхронизации. Такой характер гистерезисных явлений позволяет

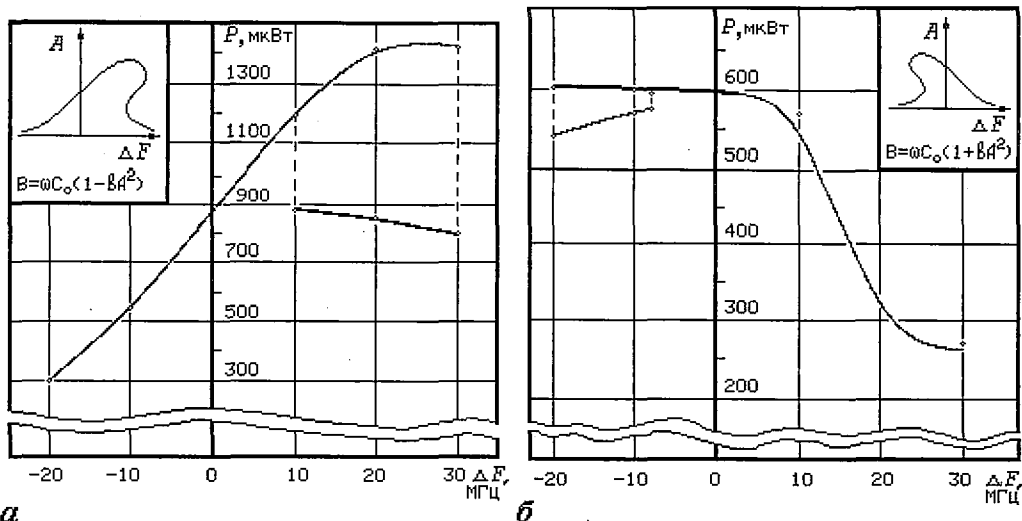


Рис. 9. Зависимость мощности выходного сигнала от величины расстройки: а - частота собственной генерации $F_0 = 30.47$ ГГц, напряжение смещения $U_0 = 2.8$ В; б - $F_0 = 30.63$ ГГц, $U_0 = 2.7$ В

сделать вывод о том, что при различных режимах работы диода Ганна в СВЧ генераторе нелинейная составляющая его реактивности, зависящая от амплитуды сигнала, имеет разные знаки, то есть может обладать не только индуктивным, но и емкостным характером.

Для амплитудной модуляции выходной мощности СВЧ генераторов на диодах Ганна используют полупроводниковые СВЧ модуляторы на $p-i-n$ -диодах, а также управляющие элементы, вводимые в цепь питания генератора. Эти известные способы управления не всегда удовлетворяют требованиям практики, в особенности при переходе в коротковолновую область СВЧ диапазона, где резко возрастает мощность управления и увеличиваются трудности по достижению высоких частот модуляции. В связи с этим представляет интерес исследование других возможных способов модуляции выходного сигнала генераторов на диодах Ганна. В частности, модуляция выходного сигнала должна возникать в режиме биений при воздействии на диод внешнего СВЧ сигнала с частотой, близкой к собственной частоте генерации. Для проверки возможности существования режима модуляции такого типа и его конкретных особенностей было проведено исследование зависимости характеристик выходного сигнала генератора на диоде Ганна от частоты и амплитуды внешнего СВЧ сигнала.

Для качественного анализа характера изменения амплитуды выходного сигнала во времени удобно использовать представление этого сигнала в виде суммы гармонических составляющих [15]

$$U(t) = \sum_n A_0 q^n \cos[\omega_0 t + n(\Delta\omega t + \varphi_0)], \quad (4)$$

где A_0 - амплитуда сигнала собственной генерации с частотой ω_0 , $\Delta\omega_0$ - расстройка, φ_0 - сдвиг фазы между соседними составляющими, $q \leq 1$ - знаменатель геометрической прогрессии, по которой убывают амплитуды комбинационных составляющих с ростом номера n , $n = 0, 1, 2, \dots$. Выражение для суммарного сигнала при $n \rightarrow \infty$ и с учетом известных соотношений для тригонометрических рядов, коэффициент которых убывает по закону геометрической прогрессии, можно переписать в следующем виде:

$$U(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \Psi(t)],$$

где

$$A(t) = \frac{A_0}{(1 - 2q \cos(\Delta\omega t + \varphi_0) + q^2)^{1/2}}, \quad (5)$$

$$\Psi(t) = \arctg \left(\frac{q \sin(\Delta\omega t + \varphi_0)}{1 - q \cos(\Delta\omega t + \varphi_0)} \right). \quad (6)$$

Таким образом, амплитуда высокочастотного выходного сигнала изменяется во времени периодически с частотой, равной по величине значению расстройки $\Delta\omega$. Амплитуда низкочастотной огибающей, согласно (5), определяется соотношением

$$A = 0.5(A_{max} + A_{min}) = A_0 q / (1 - q^2). \quad (7)$$

Так как амплитуды комбинационных составляющих изменяются при изменении величины расстройки и мощности внешнего сигнала, то знаменатель геометрической прогрессии q и, следовательно, амплитуда низкочастотной огибающей должны существенно зависеть от этих параметров. Причем, как следует из (7), амплитуда огибающей выходного сигнала должна увеличиваться с ростом значения величины q . Из представленных на рис. 10 экспериментальных результатов следует, что при изменении величин расстройки и мощности внешнего сигнала амплитуда огибающей выходного сигнала может изменяться более чем на порядок.

Следует отметить, что в зависимости от величин расстройки и мощности внешнего сигнала изменяется не только амплитуда низкочастотной огибающей, но и ее форма. Действительно, из анализа выражения для зависимости амплитуды низкочастотной огибающей от времени (5) следует, что при значениях $q \approx 1$ форма огибающей представляет собой периодическую последовательность импульсов, длительность которых уменьшается с ростом величины q . В случае же, если $q \ll 1$, в знаменателе выражения (5) можно пренебречь слагаемым второго порядка малости, и это выражение можно переписать в виде

$$A(t) \approx A_0 + q A_0 \cos(\Delta\omega t + \varphi_0), \quad (8)$$

то есть при малых значениях q форма огибающей близка к гармонической. Такое изменение формы огибающей наблюдалось экспериментально. Представленные на рис. 11 зависимости амплитуды огибающей выходного сигнала от времени при

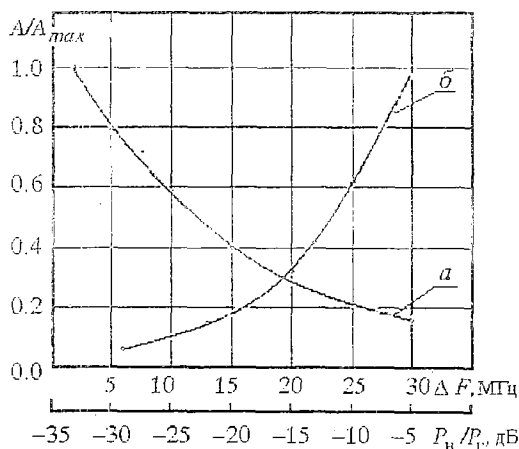


Рис. 10. Зависимости амплитуды низкочастотной огибающей от величины расстройки и мощности внешнего сигнала: *a* - зависимость от величины расстройки при значении отношения мощностей внешнего сигнала и сигнала генератора $P_v/P_r = -10$ дБ; *б* - зависимость от мощности внешнего сигнала при величине расстройки 10 МГц

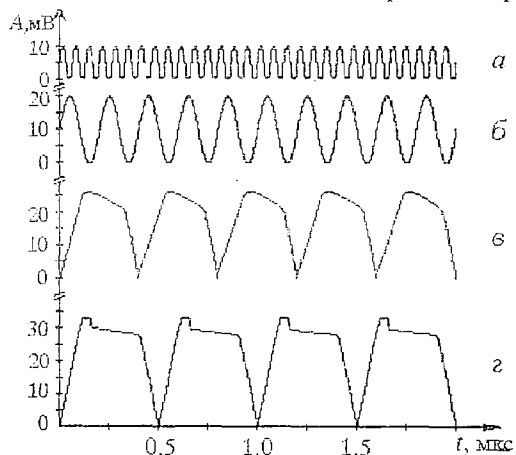


Рис. 11. Форма низкочастотной огибающей выходного сигнала при величинах расстройки: *a* - 30 МГц, *б* - 10 МГц, *в* - 5 МГц, *г* - 2 МГц. Отношение мощностей внешнего сигнала и сигнала генератора $P_v/P_r = -10$ дБ

фиксированной мощности внешнего сигнала иллюстрируют изменение ее формы от гармонической до импульсной. Максимальная частота модуляции определяется величиной расстройки между частотами сигнала генератора и внешнего сигнала, при которой возникает режим биений.

Измерения показали, что при изменении величины отношения мощностей внешнего сигнала и основного генератора от -40 дБ до -5 дБ частота огибающей гармонического вида изменялась от 3.5 МГц до 130 МГц, а в виде импульсной последовательности - от 1 МГц до 10 МГц.

Таким образом, из результатов проведенных исследований следует, что при воздействии гармонического внешнего сигнала на СВЧ генератор на диоде Ганна возникающий режим биений может быть использован как эффективный метод амплитудной модуляции выходного СВЧ сигнала.

Установленные особенности проявления нелинейных свойств диодов Ганна могут представлять интерес при конструировании СВЧ генераторов на их основе и физическом анализе режимов их работы.

Библиографический список

1. Левинштейн М.Е., Пожела Ю.К., Шур М.С. Эффект Ганна. М.: Сов. радио, 1975.
2. Кэррол Дж. СВЧ-генераторы на горячих электронах. М.: Мир, 1972.
3. Новые методы полупроводниковой СВЧ-электроники. Эффект Ганна и его применение / Под ред. В.И.Стафеева; Пер. с англ. под ред. Ю.И.Рогозина, В.П.Сандаевского. М.: Мир, 1968.
4. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Семенов А.А. Изменение вида вольт-амперной характеристики диода Ганна в зависимости от режима его работы на СВЧ // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1991. Т.34, № 5. С.107.
5. Perlman B., Upadhyaula C., Siekanowicz W. Microwave Properties and Applications of Negative Conductance Transferred Electron Devices // Proc. IEEE. 1971. Vol.59, № 8. P.1229.
6. Т. Мидзуна. Представление ганновских диодов в виде параллельно соединенных нелинейной активной проводимости и нелинейной емкости // ТИИЭР. 1972. Т.61, № 1. С.159.
7. Murayama K., Ohmi T. Static Negative Resistance in Highly Doped Gunn Diodes and Application to Switching and Amplification // Japan. J. Appl. Phys. 1973. Vol.12, № 12. P. 1931.
8. Хотулицев Ю.Л., Тамарчак Д.Я. Синхронизированные генераторы и автодины на полупроводниковых приборах. М.: Радио и связь, 1982.
9. Синхронизированный на субгармонике сверхвысокочастотный генератор на диоде Ганна / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, С.Б. Вениг и др. // ПТЭ. 1993. № 3. С.136.
10. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Семенов А.А. Особенности многочастотной генерации СВЧ диодов Ганна // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1993. Т.36, № 3. С.64.
11. Бочаров Е.П., Коростелев Г.Н., Хрипунов М.В. К модели стохастической автогенерации в генераторах на диодах Ганна // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1987. Т.30, № 1. С.96.
12. Синхронизация мод в СВЧ генераторах на диодах Ганна / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, С.Б. Вениг, А.А. Семенов // Письма в ЖТФ. 1992. Т.18, вып.10. С.26.
13. Андреев В.С. К теории синхронизации автогенераторов на приборах с отрицательным сопротивлением // Радиотехника. 1975. Т.30, № 2. С.43.
14. Радиотехнические устройства СВЧ на синхронизированных генераторах / Н.Н. Фомин, В.С. Андреев, Э.С. Воробейчиков и др.; Под ред. Н.Н. Фомина. М.: Радио и связь, 1991. С. 192.

15. Арман М. О выходном спектре несинхронно возбуждаемых генераторов // ТИИЭР. 1969. Т.57, № 5. С. 56.

Саратовский государственный
университет
Научно-исследовательский
институт механики и физики СГУ
Отраслевая научно-исследовательская
лаборатория НИЧ СГУ

Поступила в редакцию 19.09.94
после переработки 4.11.94

THE INFLUENCE OF GUNN DIODE NONLINEAR IMPEDANCE ON MICROWAVE OSCILLATORS OPERATION

D.A.Usanov, S.B.Venig, S.S.Gorbatov, A.A.Semenov

Theoretical and experimental investigations of nonlinear Gunn diode microwave oscillators behavior were carried out. Possibility of chaotic oscillation appearance with increasing applied voltage in the voltage region high above the threshold is shown. Gunn diode multifrequency operation mode is investigated and the existence of spectral modes non-connected with integer relations in operation frequency band is explained. Locked mode effect is experimentally discovered and investigated in microwave oscillator influenced by external signal with high ratio subharmonic frequency. The existence of hysteresis phenomenon in locked Gunn diode microwave oscillator both on upper and lower frequency boundary of locking band is determined. This fact proves out that in various operation modes the dependence of nonlinear component of diode reactance on microwave signal amplitude demonstrates not only inductive but a capacitive nature. The dynamics of output signal low-frequency component alteration in Gunn diode beats operation mode is investigated. The experiments characterize this kind of operation mode as an efficient modulation method.



Usanov Дмитрий Александрович - родился в 1943 году в Менделеевске (республика Татария), окончил Саратовский госуниверситет в 1965 году, куда после нескольких лет службы на предприятии электронной промышленности поступил на работу и где работает по настоящее время.

Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в 1972 году в области физики полупроводников и диэлектриков и доктора физико-математических наук в 1989 году в области радиофизики, включая квантовую радиофизику. Профессор СГУ. Область научных интересов - твердотельная СВЧ электроника, радиоволновые и оптические методы контроля, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике СВЧ. Автор многих статей, патентов и изобретений по указанным выше направлениям.



Venig Сергей Борисович - родился в 1957 году в Саратове, окончил Саратовский государственный университет в 1979 году. После окончания работал инженером ОКБ ПО «Тантал». С 1981 года, после перевода в очную аспирантуру, работает в СГУ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в СГУ (1988) по специальности «радиофизика, включая квантовую радиофизику», доцент СГУ. Область научных интересов, по направлениям которой опубликовано более 30 научных работ, - физика полупроводников, твердотельная электроника и радиофизика.



Горбатов Сергей Сергеевич - родился в 1940 году в Энгельсском Саратовской области, окончил Саратовский государственный университет в 1973 году. После окончания СГУ работал на предприятиях электронной промышленности и в НИИ механики и физике при СГУ, где и работает по настоящее время в должности научного сотрудника. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в СГУ (1991) в области радиофизики. Область научных интересов - теория колебаний и волн, радиофизика, нелинейная динамика и полупроводниковая электроника СВЧ. Автор многочисленных статей по направлениям, указанным выше.



Семенов Андрей Андреевич - родился в 1965 году в Саратове, окончил физический факультет Саратовского государственного университета в 1987 году. В 1991 году окончил очную аспирантуру при СГУ. С 1991 года по настоящее время работает в должности научного сотрудника ОНИЛ НИЧ СГУ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в СГУ (1994) по специальностям «радиофизика» и «физика полупроводников и диэлектриков». Область научных интересов - твердотельная электроника, физика полупроводников и радиофизика. По указанным направлениям опубликовал ряд статей в центральных и отраслевых научно-технических журналах. Неоднократный участник научно-технических выставок.