

4. Блекмор Дж. Статистика электронов в полупроводниках. М., 1969.
 5. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979.
 6. Добрего В. П., Ермолаев О. П. // ФТП. 1977. Т. 11. Вып. 10. С. 1897.
 7. Добрего В. П., Ермолаев О. П., Ткачев В. Д. // Physica status solidi (a). 1977. V. 44. № 2. P. 435.

Поступила в редакцию 10.04.95.

УДК 621.382.2.029.65.

В. И. ШАЛАТОНИН

МЕХАНИЗМ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ХАОТИЧЕСКИХ КВЧ КОЛЕБАНИЙ В ДИОДАХ ГАННА

Possible mechanism of complicated nonlinear generation dynamics in transferred-electron device oscillators, leading to simultaneous generation of chaotic extremely high-frequency signal and periodic sequence in high-frequency band, is shown theoretically and experimentally.

В настоящей работе в развитие [1—3] приведены результаты экспериментов и численного моделирования динамики установления автоколебаний в диодах Ганна (ДГ) диапазона крайне высоких частот (КВЧ). Сделана попытка объяснить механизм нелинейного взаимодействия колебаний, приводящий к полученным натурным и численным результатам.

Эксперименты проводились с волноводным генератором Ганна сечением $5,2 \times 2,6$ мм на основе дискового резонатора с использованием ДГ 3А741 [4]. Подстройка мощности и частоты производилась с помощью подвижного короткозамыкающего поршня. Установлено, что при $U_p < U_0 < U_b$ (U_p — пороговое напряжение ДГ, U_b — напряжение включения, т. е. перехода в одночастотный режим генерации) на выходе генератора формируются шумоподобные колебания в диапазоне 30—45 ГГц, модулированные по амплитуде высокочастотными (ВЧ) периодическими импульсными автоколебаниями (1—20 МГц) с длительностью импульсов 10—25 нс. Переход в одночастотный режим при увеличении U_0 до значения U_b ($U_b - 2,5 U_p$) иногда предварялся формированием из шумового КВЧ спектра нескольких спектральных линий в этом же диапазоне, разнесенных по частоте на ΔF . Одновременно с этим изменялась и ВЧ компонента спектра: сигнал на выходе детекторной секции приближался по форме к гармоническому с частотой ΔF .

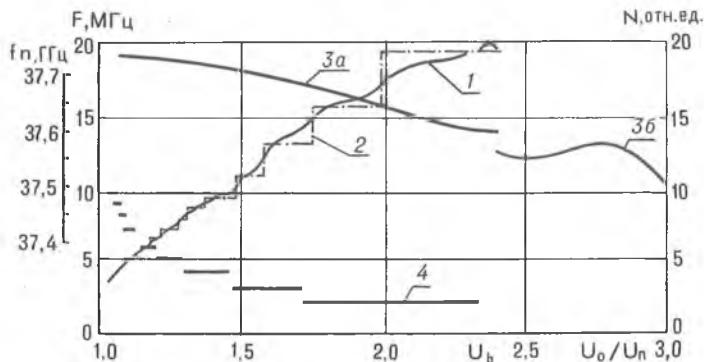


Рис. 1. Динамика автоколебательных процессов в генераторе КВЧ на диоде Ганна:

1, 3, 4 — эксперимент; 2 — расчет

Увеличение напряжения питания от величины U_p и выше сопровождалось ростом частоты повторения импульсов, изменением их формы и длительности, уменьшением количества спектральных составляющих. При этом изменялась и форма огибающей шумоподобного спектра КВЧ сигнала с постепенным уменьшением его ширины. Зависимость, характеризующая увеличение частоты импульсов, содержит ряд наклонных «ступенек» с резко увеличенной скоростью возрастания частоты между ними (рис. 1, кривая 1). Одновременно изменяется и количество N спектральных составляющих (рис. 1, кривая 4), образуя зависимость,

качественно сходную с расчетными кривыми, характеризующими субгармонические бифуркации периода колебаний тока через диод [1, 2]. При $U_0 > U_b$ низкочастотные колебания исчезают, а на месте шумового КВЧ спектра появляется единственная спектральная составляющая, частота которой изменяется в соответствии с экспериментальной кривой на рис. 1 (кривая 3,б).

Приведенные результаты позволяют высказать некоторые соображения о механизме нелинейных процессов в ганновских структурах при генерации колебаний. Прежде всего необходимо учесть, что в отличие, например, от транзисторов или туннельных диодов в ДГ при $U_0 > U_n$ происходит усиление флуктуаций заряда вблизи катода, которое нарушает начальное пространственное распределение концентрации электронов и приводит к волнам объемного заряда, периодически проходящим

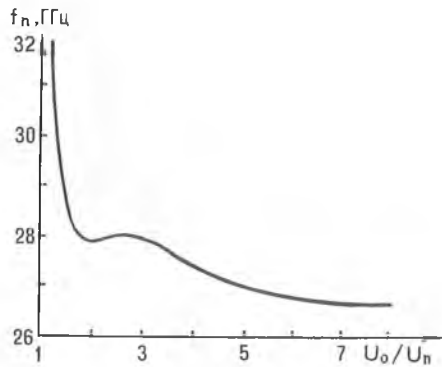


Рис. 2. Изменение пролетной частоты диода Ганна от напряжения смещения

вдоль диода и вызывающим колебания тока во внешней цепи. Частота f_n этих собственных (пролетных) колебаний ДГ изменяется в соответствии с расчетной кривой на рис. 2. Другой частотой, определяющей характер нелинейных процессов, является резонансная мода f_p объемного СВЧ резонатора, в который включен ДГ. Некоторое изменение этой частоты при вариации U_0 может происходить за счет соответствующего изменения «горячей» емкости полупроводниковой структуры, включенной в резонансный контур.

Известно, что при воздействии на диссипативную систему периодической силы поддержание периодического движения зависит от устойчивого притока энергии, которая компенсирует потери. Поэтому периодически изменяющаяся сила может совершить работу только в том случае, если объект, на который она действует, имеет в своем движении Фурье-компоненту той же частоты, что и сила. Работа может совершаться и при синхронизации на субгармонической частоте. Можно предположить, что основной причиной появления субгармонических бифуркаций и связанных с ними явлений являются уравнивающие автоколебательные процессы, происходящие при включении ДГ с пролетной частотой f_n в резонансный СВЧ контур, имеющий основную моду колебаний с частотой f_p , неравной f_n . При этом зашумление КВЧ сигнала определяется вероятнее всего флуктуационными эффектами, связанными в основном с сильной зависимостью величины пролетной частоты от различного рода флуктуаций и прежде всего от пульсаций напряжения источника питания ДГ.

Численное моделирование показывает, что в результате нелинейных взаимодействий при $U_n < U_0 < U_b$ возникают КВЧ автоколебания с линейчатым спектром, содержащим от 2 до 40 и более отдельных составляющих с одинаковым разномом по частоте ΔF друг от друга [1]. Суть автоколебательного процесса заключается в том, что среди этих составляющих обязательно формируются две компоненты, одна из которых близка или совпадает с частотой f_p , а другая — с частотой f_n . Это равносильно тому, что

$$f_n \sim n \cdot F_1 \text{ и } f_p \sim m \cdot F_1, \quad (1)$$

где m, n — целые числа, а $F_1 = \Delta F$ — субгармоника для f_n, f_p . Эта частота является основной частотой эквидистантного спектра периодической импульсной последовательности и обычно находится в пределах от единиц до десятков мегагерц. С возрастанием U_0 от U_n и выше число отдельных составляющих КВЧ спектра уменьшается, а ΔF увеличивается по закону, описанному выше. При этом среди отдельных составляющих спектра всегда есть f_n и f_p , соотношение между уровнями которых постепенно изменяется в пользу f_p . При $U_0 \sim U_b$ субгармонические бифур-

кации прекращаются и в спектре тока через диод основной частотой становится f_p .

Таким образом, результаты численного моделирования объясняют экспериментальные данные, касающиеся усложнения спектра КВЧ сигнала, его линейчатости в некоторых случаях, и указывают на причину появления одновременно с КВЧ колебаниями периодической импульсной ВЧ последовательности, фиксируемой обычно в цепи питания ДГ. В тоже время для выяснения причины хаотичности КВЧ автоколебаний требуется, очевидно, рассмотрение новых факторов, не учитываемых в математической модели.

На наш взгляд, основная причина заключается в особенностях изменения пролетной частоты ДГ в зависимости от U_0 (см. рис. 2). Скорость изменения f_p при U_0 , незначительно превышающем U_n , чрезвычайно велика и даже при $U_0/U_n \sim 1,5$ она более 7,5 МГц/мВ. Поэтому флуктуационные эффекты, и в частности пульсации напряжения U_0 смещения, составляющие для используемого в эксперименте источника питания примерно 1 мВ, вызывают значительные флуктуации пролетной частоты. Эти флуктуации могут превышать частоту ΔF разности КВЧ спектральных составляющих друг от друга, полученную без учета флуктуационных эффектов. Эти процессы, вероятно, и ответственны за зашумление КВЧ автоколебаний. При этом важно, что соответствующая этим колебаниям низкочастотная импульсная последовательность с частотами спектральных составляющих $F_1, 2F_1, 3F_1, \dots$ практически не будет зашумлена. Это следует из соотношений (1).

Действительно, предположим, что f_p изменяется в результате флуктуаций на $\pm \Delta f$. Тогда имеем, что $f_p \pm \Delta f \sim n(F_1 \pm \Delta f/n)$, т. е. флуктуации соответствующих ВЧ составляющих уменьшаются в n раз. Экспериментальные данные показывают, что n меняется от нескольких тысяч при малых U_0 (т. е. при больших флуктуациях пролетной частоты) до нескольких сотен при $U_0 \sim (2-2,5)U_n$ (т. е. при значительно меньших флуктуациях f_p). При этом флуктуации F_1 имеют порядок $\Delta F_1/F_1 \sim 10^{-4}$. Ступенчатый характер зависимости, характеризующей увеличение частоты импульсной последовательности при возрастании U_0 (см. рис. 1, кривая 1), связан с изменением пролетной частоты и фактически в измененном виде представляет собой ее аппроксимацию.

Вклад в форму этой кривой вносит и относительно небольшое изменение частоты f_p с ростом U_0 , а также процессы захватывания частоты высокочастотным КВЧ контуром. Наличие «ступенек» объясняется относительно малым изменением частоты f_p , т. е. фактически средней частоты шумового спектра КВЧ сигнала (см. рис. 1, кривая 3,а). Поэтому из (1) следует, что, если правомочны наши предположения, то должно выполняться условие $m \cdot F_1 \sim \text{const}$. Исходя из этого условия и результатов эксперимента можно получить эмпирическую зависимость: $F_1 \sim 78/m$, где $m = 4, 5, \dots$, а F_1 — частота в МГц. Значения частоты «ступенек», полученные в соответствии с этим выражением (см. рис. 1, кривая 2), хорошо совпадают с экспериментальной зависимостью (см. рис. 1, кривая 1).

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили установить условия и механизм нелинейных взаимодействий в ДГ, приводящий к генерации сложных шумоподобных колебаний в диапазоне КВЧ, модулированных регулярной ВЧ импульсной последовательностью.

Работа финансировалась Фондом фундаментальных исследований Беларуси.

1. Муравьев В. В., Шалатонин В. И. // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1993. № 6. С. 61.

2. Shalatonin V. I., Knyazeva L. P. // Third annual Seminar «Nonlinear phenomena in complex systems». Polatsk. February 14—16. 1994. V. 2. P. 406.

3. Шалатонин В. И. // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1994. № 10. С. 12.

4. Васильев Н. А., Лукаш В. С., Муравьев В. В., Шалатонин В. И. // Там же. 1985. № 10. С. 42.

Поступила в редакцию 21.11.94.