



## ЭФФЕКТ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД В СВЧ-ГЕНЕРАТОРЕ НА ДИОДЕ ГАННА, РАБОТАЮЩЕМ В МНОГОЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ

*С.Б. Вениг, А.А. Семенов, Д.А. Усанов, Т.Г. Захарова*

С помощью математической модели СВЧ-генератора на диоде Ганна, основанной на эквивалентной схеме, в которой учтены особенности включения коаксиального держателя диода и разделение резонансной и выходной цепей, описаны известные экспериментальные закономерности, в том числе эффекты многочастотной генерации и синхронизации мод. Полученные результаты расчета хорошо коррелируют с экспериментальными данными.

### Введение

Известно, что твердотельные СВЧ-генераторы на диодах Ганна способны демонстрировать широкий диапазон колебательных режимов: от периодических и сложнопериодических до квазипериодических и хаотических [1–3]. В частности, было обнаружено, что СВЧ-генераторы на диодах Ганна могут работать в многочастотном режиме, при котором спектральные компоненты не связаны целочисленными соотношениями между собой [2]. При подаче синхронизирующего сигнала на такой генератор в нем возникает эффект синхронизации мод, заключающийся в том, что в спектре выходного сигнала каждая мода занимает положение, характерное для ближайшей в ней гармоники синхронизирующей частоты [4]. Этот режим работы СВЧ-генератора на диоде Ганна был обнаружен экспериментально, и его теоретического описания проведено не было.

Представляет интерес создание модели, описывающей обнаруженные экспериментальные эффекты и объясняющей физические причины их возникновения. Сложность теоретического описания колебательных режимов в подобных устройствах состоит в том, что необходимо учитывать влияние на импеданс диодов Ганна режима питания, типа электродинамической системы, в которую помещен диод, конструктивного исполнения элементов генератора и других факторов [1]. Математическое моделирование режимов работы твердотельного генератора на диоде Ганна оказывается возможным в результате численного интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих эквивалентную схему генератора, при заданных начальных условиях.

В настоящей работе представлены результаты компьютерного моделирования сложных колебательных процессов в СВЧ-генераторе на диоде Ганна, в том числе с учетом воздействия на генератор внешнего синхронизирующего сигнала.

## Модель СВЧ-генератора

В качестве объекта моделирования был выбран СВЧ-генератор волноводно-коаксиальной конструкции (рис. 1), часто применяемый на практике [5], который представляет собой отрезок прямоугольного металлического волновода 1 с короткозамыкающим поршнем 2, который используется для перестройки частоты генератора. Диод 3 устанавливается в разрыве стержневого держателя 4, являющегося продолжением центрального проводника коаксиала 5. Внешний проводник коаксиальной линии изолирован от волновода диэлектрической прокладкой 6. Напряжение смещения от источника питания подается на диод через фильтр низкой частоты 8 по центральному проводнику коаксиала, который выполняет не только роль проводника в цепи питания, но и осуществляет связь активного элемента с резонатором. Роль резонатора выполняет отрезок волновода, заключенный между диодом и короткозамыкающим поршнем. Отрезок волновода, подключенный к держателю с диодом с другой стороны, и следующая за ним волноведущая линия исполняют роль нагрузки.

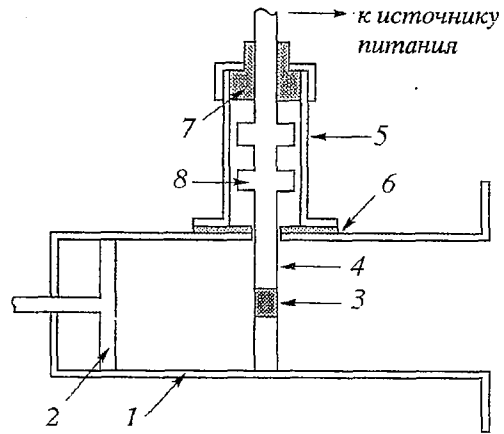


Рис. 1. Конструкция СВЧ-генератора на диоде Ганна: 1 – отрезок прямоугольного металлического волновода, 2 – короткозамыкающий поршень, 3 – диод Ганна, 4 – стержневой держатель, 5 – коаксиальная линия, 6, 7 – диэлектрические прокладки, 8 – фильтр НЧ

Эквивалентную блок-схему диодного генератора такой конструкции можно представить следующим образом: источник питания через цепь питания соединен с диодом Ганна и элементом связи. Последний обеспечивает связь активного элемента с резонансным контуром и нагрузкой. Такое представление отличается от известных [1,2] тем, что разделены резонансная и нагрузочная цепи и дополнительно учтены особенности включения диода в волновод с помощью коаксиального элемента связи.

Эквивалентная схема генератора для этого случая с обозначениями токов и напряжений представлена на рис. 2. В ее состав входят источник питания (напряжения)  $E_0$ , подключенный через сопротивление  $R_b$  и блокировочную емкость  $C_b$  к диоду Ганна. Диод представлен в виде соединенных параллельно нелинейного сопротивления  $R_j$  и емкости  $C_j$  активной структуры с подключенными к ним элементами, отражающими сопротивление потерь в контактах  $R_s$ , емкость  $C_s$  и индуктивность  $L_s$  корпуса диода. Элемент связи  $L_c$  через разделительные емкости  $C_c$  подсоединен к последовательному резонансному контуру  $R_k, L_k, C_k$  и сопротивлению нагрузки внешней цепи  $R_n$ . Разделение резонансной и нагрузочной цепей позволило ввести в эквивалентную схему источник синхронизирующего сигнала  $E_c$ . Нелинейное сопротивление диода в описываемой модели задавалась его вольт-амперной характеристикой [6]:

$$i(U) = enS[\mu(U+D)/L + V_s[(U+D)/V_p]^4]/(1 + [(U+D)/V_p]^4),$$

где  $e$  – заряд электрона;  $n=10^{15}$  см<sup>3</sup> – концентрация электронов;  $S=10^{-4}$  см<sup>2</sup> – площадь структуры;  $L=10$  мкм – длина структуры;  $\mu=6000$  см<sup>2</sup>/(В·с) – подвижность носителей заряда;  $V_s=8.5 \cdot 10^6$  см/с – скорость носителей заряда;  $V_p=4$  В,  $D=2$  В – коэффициенты с размерностью напряжения.

Система дифференциальных уравнений для напряжений и токов в рассматриваемой эквивалентной схеме, составленная методом переменных

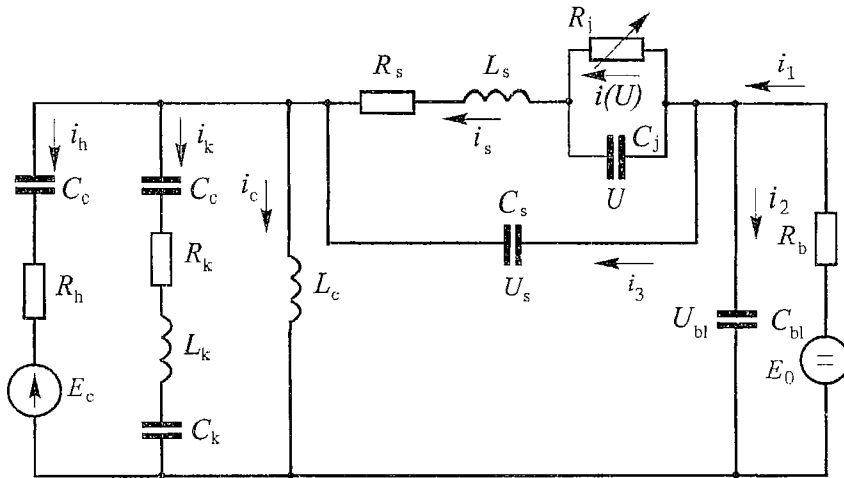


Рис. 2. Эквивалентная схема СВЧ-генератора на диоде Ганна

состояния и представляющая собой математическую модель генератора на диоде Ганна, имеет в этом случае следующий вид:

$$dU/d\tau = [i_s - i(U)]/(\omega C_j), \quad dU_s/d\tau = [J_0 - i_s]/(\omega C_s), \quad dU_{bl}/d\tau = [(E_0 - U_{bl})/R_b - J_0]/(\omega C_{bl}),$$

$$di_s/d\tau = [U_s - U - i_s R_s]/(\omega L_s), \quad di_c/d\tau = [U_{bl} - U_s]/(\omega L_c), \quad di_k/d\tau = V,$$

$$dV/d\tau = [J_0/\omega + i_s]/(\omega C_s) - \omega L_k i_k - R_h V]/(\omega L_k), \quad di_h/d\tau = [\omega dE_c/d\tau + i_s/C_s - i_k/C_c + J_0]/(\omega R_h).$$

где  $J_0 = i_c + i_k + i_h$ ,  $\tau = \omega t$ .

При проведении интегрирования системы дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты четвертого порядка для эквивалентной схемы были выбраны следующие значения параметров:

- диода Ганна  $R_s = 1$  Ом – сопротивление выводов,  $C_s = 2 \cdot 10^{-11}$  Ф – емкость корпуса,  $L_s = 5 \cdot 10^{-10}$  Гн – индуктивность выводов,  $C_j = 8 \cdot 10^{-13}$  Ф – емкость диода;
- схемы питания  $E_0 = 1 \div 10$  В,  $R_b = 3$  Ом,  $C_{bl} = 10^{-10} \div 10^{-6}$  Ф;
- резонансного контура  $R_k = 50$  Ом,  $C_k = 5 \cdot 10^{-12}$  Ф,  $L_k = 10^{-9}$  Гн;
- нагрузки и цепи связи  $R_h = 50$  Ом,  $C_c = 10^{-12} \cdot 10^{-10}$  Ф,  $L_c = 2 \cdot 10^{-9}$  Гн;
- синхронизирующего сигнала  $E_c = 0 \div 5$  В – амплитуда,  $f_c = 10^8 \div 10^{11}$  Гц – частота.

### Результаты численного моделирования

Результаты численного исследования эквивалентной схемы при заданных параметрах и отключенном источнике синхронизирующего сигнала свидетельствуют о том, что в рассматриваемой модели могут быть реализованы различные режимы работы, хорошо известные на практике. В частности, при значениях величин емкостей  $C_c > 5.54 \cdot 10^{-12}$  Ф и  $C_{bl} > 10^{-9}$  Ф наблюдаются одночастотные колебания, при этом временная зависимость колебаний на нагрузке совпадает по форме с колебаниями на диоде Ганна и имеет гармонический вид. Уменьшение блокировочной емкости  $C_{bl}$  при фиксированных остальных параметрах приводит к возбуждению низкочастотных колебаний ( $\sim 1 \div 10$  МГц) в цепи питания диода. В зависимости от значений напряжения питания  $E_0$ , величин  $C_{bl}$ ,  $R_b$  и  $C_c$  возможна реализация сложных динамических режимов работы.

Если для значений емкости  $C_{bl}$ , при которых происходит подавление колебаний в цепи питания диода, уменьшать значение емкости  $C_c$ , то при ее

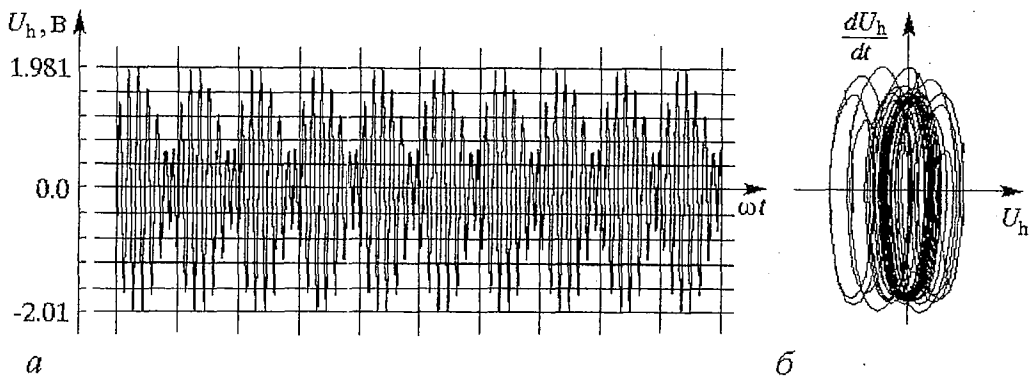


Рис. 3. Временная реализация (а) и проекция фазового портрета (б) колебаний в режиме многочастотной генерации

значениях менее  $5.54 \cdot 10^{-12}$  Ф в схеме наблюдаются многочастотные квазипериодические колебания. Для такого режима работы при соответствующих параметрах эквивалентной схемы характерно существование независимых колебаний на частотах менее 1 ГГц в контуре коаксиального держателя, включающем элемент связи  $L_c$  и емкость  $C_c$ , и более высокочастотных колебаний в резонаторе. Временная реализация и проекция фазового портрета таких колебаний на нагрузку при напряжении источника питания  $E_0=6$  В и значении емкости  $C_c=5 \cdot 10^{-12}$  Ф представлены на рис. 3. Особенностью такого режима колебания является то, что через элементы связи в резонансном контуре, помимо основных колебаний, возбуждаются гармоники низкочастотных колебаний контура коаксиального держателя, причем 10-я и 11-я гармоники имеют амплитуды, близкие к амплитуде основной низкочастотной составляющей и в несколько раз превышающие амплитуды остальных гармонических составляющих. Такой режим работы СВЧ-генератора на диоде Ганна рассматриваемой конструкции, с учетом частотной полосы пропускания металлического волновода, объясняет известный экспериментальный факт существования в спектре выходного сигнала составляющих, не связанных целочисленными соотношениями, и подтверждает предположения о природе наблюдаемой многочастотной генерации, сделанные в работе [2].

Введение в расчёт внешнего сигнала ( $E_c > 0$ ) с частотой, близкой либо к основной частоте генерации, либо к частоте колебаний в контуре коаксиального держателя, позволило исследовать следующие режимы.

При расстройке частоты внешнего сигнала  $\Delta f > 200$  МГц от основной частоты генерации  $f_0=7$  ГГц, при работе схемы в режиме одночастотных колебаний реализуется режим биений. В этом случае спектр выходного сигнала имеет набор комбинационных составляющих, что, в частности, наблюдалось экспериментально и описано в работе [7], а характер временных зависимостей колебаний свидетельствует о том, что основной высокочастотный сигнал модулируется колебаниями низкой частоты. Причем вид огибающей этих колебаний зависит как от расстройки частоты внешнего сигнала, так и от его амплитуды, что подтверждает выводы приведенного в [7] качественного анализа подобного режима работы и предположение о возможности его использования для обеспечения амплитудной модуляции выходного сигнала СВЧ-генератора на диоде Ганна. При величине расстройки  $\Delta f < 200$  МГц схема работает в режиме синхронизации внешним сигналом.

Для частот синхросигнала, близких к собственной частоте колебаний в контуре коаксиального держателя и на порядок меньших частоты колебаний генератора, результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что наблюдается реализация режима синхронизации на субгармонике высокой кратности (более 10). Реализация такого режима синхронизации в СВЧ-

генераторе на диоде Ганна рассматриваемой конструкции наблюдалась экспериментально [8]. Эффективность синхронизации на субгармонике обусловлена рассмотренным выше механизмом взаимодействия между контуром коаксиального держателя и резонатором.

Для случая многочастотной генерации при подаче внешнего сигнала с частотой  $f_c$ , близкой к частоте колебаний в контуре коаксиального держателя, наблюдается захват основной частоты генератора синхронизирующим сигналом. При этом сигналы с частотами колебаний, в отсутствие синхросигнала не связанными целочисленными соотношениями, захватываются наиболее близко расположенными гармоникам синхросигнала. Причем с увеличением амплитуды синхросигнала  $E_c$  расширяется полоса синхронизации. Так, для внешнего сигнала с частотой 0.7 ГГц и амплитудой 5 В полоса синхронизации составляет 400 МГц.

### Выводы

Таким образом, математическая модель СВЧ–генератора на диоде Ганна, основанная на эквивалентной схеме, в которой учтены особенности включения коаксиального держателя диода и разделение резонансной и выходной цепей, позволяет описать известные экспериментально закономерности, в том числе эффекты многочастотной генерации и синхронизации мод. Полученные результаты расчёта хорошо коррелируют с известными экспериментальными данными, что свидетельствует о верности выбранной модели и корректности сделанных допущений.

### Библиографический список

1. 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 // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 5. С. 355.
2. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Семенов А.А. Особенности многочастотной генерации СВЧ диодов Ганна // РЭ. 1993. Т. 36, № 3. С. 64.
3. Бочаров Е.П., Коростелев Г.Н., Хрипунов М.В. К модели стохастической автогенерации в генераторах на диодах Ганна // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 1. С. 96.
4. Синхронизация мод в СВЧ–генераторах на диодах Ганна / Д.А.Усанов, С.Б.Вениг, С.С.Горбатов, А.А.Семенов // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18, № 10. С. 26.
5. Давыдова Н.С., Данюшевский Ю.З. Диодные генераторы и усилители СВЧ. М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
6. 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.
7. Модуляция выходного сигнала генератора на диоде Ганна воздействием на него внешнего СВЧ–сигнала / Д.А. Усанов, С.Б.Вениг, С.С. Горбатов, А.А.Семенов // Изв. вузов. Радиофизика. 1995. Т. 38, № 9. С. 982.
8. Синхронизованный на субгармонике сверхвысокочастотный генератор на диоде Ганна / С.С. Горбатов, Д.А. Усанов, С.Б.Вениг и др. // Приборы и техника эксперимента. 1993. № 3. С. 136.

## LOCKED MODES EFFECT IN A MICROWAVE GUNN DIODE OSCILLATOR, WORKING IN A MULTIFREQUENCY MODE

*S.B. Wenig, A.A. Semenov, D.A. Usanov, T.G. Zacharova*

With the help of a mathematical model of a microwave Gunn diode oscillator grounded on the equivalent network, in which one the features of actuation of the diode coaxial keeper and the separation of resonant and output circuits are taken into account, known experimental regularity, including effects of a multiple oscillation and modes synchronization are described. The obtained calculation results well correlate with experimental data.



*Вениг Сергей Борисович* – родился в 1957 году в Саратове, окончил Саратовский государственный университет (1979). Кандидат физико-математических наук (1988), доктор физико-математических наук по специальностям радиофизика и физика полупроводников (1999), доцент кафедры физики твердого тела. Область научных интересов, по направлениям которой опубликовано около 60 научных работ – физика полупроводников, твердотельная электроника, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике, радиофизика,



*Семенов Андрей Андреевич* – родился в 1965 году в Саратове, окончил физический факультет Саратовского государственного университета в 1987 году. Окончил Саратовский государственный университет (1987), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности радиофизика, включая квантовую радиофизику (1994), с 1998 года – докторант кафедры физики твердого тела. Область научных интересов – твердотельная электроника, микросхемотехника, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике, радиофизика.



*Усанов Дмитрий Александрович* родился в 1943 году в Менделеевске (Татария). Окончил Саратовский госуниверситет (1965). Кандидат физико-математических наук (1972), доктор физико-математических наук (с 1989), с 1990 – профессор кафедры физики твердого тела. Область научных интересов – твердотельная электроника СВЧ, радиоволновые и оптические методы контроля, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике. Академик МАН ВШ, заслуженный деятель науки РФ. Автор многих статей, патентов и изобретений по указанным выше направлениям.



*Захарова Татьяна Григорьевна* – окончила механико-математический факультет Саратовского государственного университета (1977), в настоящее время работает старшим преподавателем кафедры системного анализа СГУ. Область научных интересов – теория функций и приближений, вычислительные методы решения дифференциальных уравнений.