

ВЛИЯНИЕ САМОРАЗОГРЕВА ДИОДОВ ГАННА НА СПЕКТР ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ГЕНЕРАТОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, А. В. Бабаян

Впервые на основе совместного с системой уравнений Кирхгофа решения нестационарного уравнения теплового баланса проанализированы закономерности изменения спектра выходного сигнала генератора на диоде Ганна для различных напряжений питания. Режим генерации при напряжениях питания, близких к пороговому, описан как сложный динамический процесс, обладающий выраженной структурой. Установлено, что при саморазогреве кристалла диода Ганна в зависимости от напряжения питания возможно наблюдение либо регуляризации колебаний, либо переход от периодического к квазипериодическому колебательному процессу и его хаотизации.

Введение

Известно, что полупроводниковые приборы СВЧ-диапазона на диодах Ганна, наряду с отрицательной проводимостью в широком диапазоне сверхвысоких частот, могут характеризоваться низкочастотной отрицательной проводимостью [1, 2]. Это приводит к возникновению одновременно с СВЧ-генерацией низкочастотных колебаний в цепи питания диода Ганна [3-5]. При определенных условиях в генераторах на диодах Ганна возможно появление субгармонических колебаний [6] и хаотизации низкочастотных колебаний [7].

Одним из современных методов, позволяющих провести анализ многочастотных режимов работы полупроводниковых генераторов при

реальных параметрах активного элемента и СВЧ-схемы, в которую он включен, является метод численного моделирования с использованием эквивалентной схемы, параметры нелинейных элементов которой зависят как от величины постоянного смещения, так и от мгновенных значений токов и напряжений [8]. При проведении такого анализа необходимо учитывать, что по сравнению с приборами вакуумной электроники зависимость параметров твердотельных приборов СВЧ от температуры проявляется гораздо более существенным образом, что обусловлено сильно выраженной зависимостью от температуры свойств полупроводниковых материалов.

Как правило, зависимость основных характеристик полупроводниковых генераторов от температуры учитывается лишь в связи с изменением температуры окружающей среды [9, 10], при этом пренебрегают влиянием саморазогрева полупроводниковых приборов, связанным с потреблением мощности от источника питания, что справедливо лишь при моделировании СВЧ-генераторов на полупроводниковых элементах, потребляющих незначительную мощность от источника питания (менее 10^{-3} Вт), например на туннельных диодах. При моделировании генераторов на диодах Ганна следует учитывать, что потребляемая ими мощность достигает 2-3 Вт и, вследствие конечности теплового сопротивления прибора, происходит существенный саморазогрев полупроводникового кристалла, приводящий к значительному изменению свойств активного полупроводникового элемента.

В связи с этим в настоящей работе проведено численное моделирование работы генератора на диоде Ганна в режиме генерации с учетом эффекта саморазогрева полупроводникового кристалла.

1. Модель, используемая при расчете

Теоретический анализ работы генератора на диоде Ганна основывался на математическом описании процессов в многоконтурной эквивалентной схеме [11], представленной на рис. 1, элементы которой моделируют полупроводниковую структуру диода Ганна в виде параллельно соединенных емкости C_3 и активного нелинейного сопротивления, определяемого по ВАХ диода $i(U)$, элементы корпуса диода L_3 , C_4 , СВЧ-резонатор в виде последовательного C_2 , L_2 и параллельного L_1 , Y_1 , C_1 контуров, низкочастотную (НЧ) часть схемы, состоящую из последовательного L_7 , C_6 и параллельного C_7 , R_5 , L_6 контуров, дросселя L_5 в цепи питания, шунтирующей емкости C_5 , индуктивности связи L_4 диода с НЧ-схемой и источника напряжения ε . Эквивалентная схема описывалась системой из четырнадцати дифференциальных уравнений, составленных с использованием законов Кирхгофа.

Процесс саморазогрева диода Ганна анализировался на основе совместного с системой уравнений Кирхгофа решения нестационарного уравнения теплового баланса, представленного в виде [12, 13, 14]:

$$C_m \frac{dT}{dt} = i(U_{cf}, T)U - \frac{T - T_0}{R_T},$$

где T и T_0 - температура кристалла диода и окружающей среды, R_T - полное тепловое сопротивление прибора, определяющее величину абсолютного изменения температуры кристалла диода на единицу рассеиваемой мощности, C_m - теплоемкость полупроводникового кристалла.

Нелинейная зависимость мгновенных значений активной составляющей тока i , протекающего через полупроводниковую структуру, от мгновенных значений напряжения U на ней [15] аппроксимировалась выражением вида [11]:

$$i(U) = R_0^{-1} \frac{d}{\mu(T)} \cdot \frac{\mu(T) \frac{(U+D)}{d} + V_S(T) \left[\frac{U+D}{U_n} \right]^4}{1 + \left[\frac{U+D}{U_n} \right]^4},$$

где $R_0 = [qn_0\mu(T)S/d]^{-1}$ - сопротивление полупроводниковой структуры в слабых электрических полях, n_0 - концентрация полностью ионизованных доноров, S и d - эффективные площадь поперечного сечения и длина диода соответственно, $D=0$ при $U \leq U_n$, $D=2$ при $U > U_n$. Учитывалось, что саморазогрев кристалла приводит к изменению вольт-амперной характеристики диода [10]. При этом зависимости $\mu(T)$ и $V_S(T)$ аппроксимировались соотношениями вида:

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot 300/T$$

и

$$V_S(T) = V_0 / \left[T \left(1 - 5.3 \cdot 10^{-4} \cdot T \right) \right]$$

соответственно.

Расчеты, проведенные в [15], свидетельствуют о возможности применения приведенной выше зависимости $i(U)$ в качестве динамической вольт-амперной характеристики диода Ганна на частотах до 10-12 ГГц. Возможность успешного использования динамических ВАХ для описания режимов работы СВЧ-генераторов на диодах Ганна иллюстрируется результатами, приведенными в [6,8,11].

В результате численного моделирования рассчитывался процесс установления колебаний в генераторе на диоде Ганна с учетом эффекта саморазогрева на основе анализа зависимости от времени тока в нагрузке $i_e(t)$. В качестве параметров, определяющих время установления стационарного режима работы генератора на диоде Ганна и его основные характеристики, были выбраны легко измеряемое на практике сопротивление диода Ганна R_0 в слабых электрических полях, тепловое сопротивление прибора R_T и температура окружающей среды. При численном моделировании учитывалось, что причинами, вызывающими изменение сопротивления R_0 могут быть изменение концентрации носителей заряда n_0 , их подвижности μ или геометрических размеров полупроводниковой структуры.

После установления стационарного режима работы генератора с использованием разложения зависимости $i_e(t)$ в ряд Фурье рассчитывались гармонические и субгармонические составляющие тока в нагрузке, определялись их амплитуды и рассчитывались мощности гармоник и субгармоник с использованием соотношений:

$$P_{ke} = \frac{i_{ke}^2}{2Y_1},$$

где $i_{ke} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ - амплитуда гармонических и субгармонических составляющих тока,

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T i_e(t) \cos(k\omega t) dt,$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T i_e(t) \sin(k\omega t) dt,$$

$k = 1, 2, 3, \dots$

$T=2\pi/\omega$ - период колебаний на частоте основной субгармоники после установления стационарного режима колебаний, или на частоте основной гармоники при отсутствии в спектре субгармонических составляющих.

3. Результаты расчета.

Численное моделирование показало, что в режиме одночастотной генерации (мощность второй гармоники на уровне ниже -50 дБ), достигаемом выбором параметров элементов эквивалентной схемы C_2 и L_4 , определяющих связь диода Ганна, соответственно, с СВЧ-схемой и низкочастотным контуром в цепи питания, и режимом питания диода Ганна по постоянному току, учет саморазогрева диода приводит к существенному изменению частоты и мощности генерации.

На рис. 2 представлены зависимости приведенной выходной мощности генератора P/P_0 на диоде Ганна от величины теплового сопротивления R_T . На этом же рисунке приведена зависимость температуры кристалла диода T от величины R_T в режиме стационарной генерации. Как следует из полученных результатов, увеличение теплового сопротивления прибора уменьшает выходную мощность, что связано с уменьшением отрицательного сопротивления диода Ганна с ростом температуры кристалла. При этом частота генерации увеличивается, что связано с использовавшимся набором параметров пассивных элементов СВЧ-схемы генератора.

С целью выяснения влияния саморазогрева кристалла на спектральный состав выходного сигнала были рассчитаны зависимости относительной

мощности второй гармоники A_{2f_0}/A_{f_0} от величины теплового сопротивления прибора (рис. 3), где A_{f_0} - мощность сигнала на основной частоте. Расчеты показали, что увеличение теплового сопротивления прибора, до реально имеющих место на практике значений, приводит к заметному уменьшению величины высших гармоник в спектре выходного сигнала. Следует отметить, что такая зависимость мощности высших гармоник от степени разогрева полупроводникового кристалла позволяет объяснить наблюдавшийся экспериментально факт повышения "чистоты" спектра выходного сигнала генераторов на диодах Ганна после установления стационарного теплового режима работы.

Исследования взаимосвязи сопротивления диодов Ганна R_0 в слабых электрических полях со спектром выходного сигнала позволили установить, что использование диодов Ганна с малыми значениями R_0 в конструкции с $R_T < 175$ град/Вт приводит к увеличению относительной мощности второй гармоники (рис.4), и к уменьшению в конструкциях с $R_T > 175$ град/Вт.

Использование предложенной модели позволило оценить влияние температуры окружающей среды на спектр выходного сигнала генератора при различных сопротивлениях полупроводниковой структуры и значениях теплового сопротивления прибора. Как следует из результатов расчета, приведенных на рис. 4, увеличение температуры окружающей среды при реальных значениях теплового сопротивления прибора приводит к уменьшению A_{2f_0}/A_{f_0} во всем исследуемом диапазоне изменения сопротивления диода. При этом изменение A_{2f_0}/A_{f_0} при учета саморазогрева составляло примерно 0.2 дБ/град, что более чем в 10 раз превышает изменение этой величины при отсутствии саморазогрева кристалла диода.

Наиболее ярко хаотизация выходного сигнала генератора на диоде Ганна проявляется при напряжениях питания, близких к пороговому значению [1]. Это явление многими авторами связывается с механизмом случайного зарождения домена в диоде Ганна [1]. При реализации наиболее характерного для современных диодов Ганна режима работы со стационарным анодным доменом [16] этот механизм отсутствует.

В результате численного моделирования было установлено, что выбором параметров элементов связи C_2 и L_4 при напряжениях питания близких к пороговому значению возможна реализация сложных динамических режимов работы генератора на диоде Ганна, при которых спектры выходных сигналов A_f содержат большой набор спектральных составляющих в низкочастотной области, не связанных целочисленными соотношениями между собой и с частотой спектральной компоненты максимальной мощности (рис.5а). При этом наблюдается неравномерное заполнение фазовыми траекториями областей локализации этих составляющих на фазовой плоскости (рис.5б). Для сложных динамических режимов, возникающих при напряжениях питания много больших порогового, периодичность колебаний нарушалась аperiodическими всплесками [6], а колебательный процесс, как это следует из зависимости мгновенных значений тока i , протекающего через диод, от времени (рис.5в) образуется последовательностью колебаний различной длительности с различными декрементами затухания.

Таким образом, наблюдающийся экспериментально режим генерации при напряжениях питания близких к пороговому может быть описан как сложный динамический процесс, обладающий выраженной структурой. Расчеты показывают, что при использовании конструкций генераторов на диодах Ганна,

обладающих значительной величиной теплового сопротивления, наблюдается существенный саморазогрев кристалла диода, приводящий либо к регуляризации, либо, напротив, к срыву колебательного процесса при напряжениях питания, близких к пороговому. Иными словами, улучшая или ухудшая теплоотвод, можно либо способствовать хаотизации сигнала генератора на диоде Ганна, либо регуляризовать его.

При напряжениях питания, несколько превышающих пороговое значение выбором параметров элементов связи C_2 и L_4 может быть реализован режим, при котором наряду с гармониками в спектре выходного сигнала A_f присутствуют субгармоники основного сигнала $f_0/6$ и кратные ей субгармоники $2f_0/6$, $3f_0/6$ и т.д. На рис. 6а, 6б и 6в представлены рассчитанные без учета саморазогрева диода спектр выходного сигнала, фазовый портрет колебаний тока в диоде Ганна и зависимость мгновенных значений тока от времени при возникновении субгармоники основного сигнала $f_0/6$ и кратных ей. Спектральный состав выходного сигнала при выбранных параметрах эквивалентной схемы оказался достаточно устойчивым по отношению к малым изменениям напряжения питания. В диапазоне изменения напряжения питания от 3.5 В до 4.5 В не наблюдалось изменения кратности основной частоты выходного сигнала по отношению к частоте субгармоники. При напряжениях питания больших 4.5 В субгармоники в спектре выходного сигнала исчезали.

Учет теплового сопротивление прибора вызывает изменение спектра выходного сигнала, характер которого определяется величиной сопротивления диода Ганна R_0 в слабых электрических полях. На рис. 6г представлен спектр выходного сигнала, рассчитанный при значениях теплового сопротивления $R_T=100$ град/Вт и сопротивлении кристалла диода $R_0=10$ Ом. Анализ

полученных результатов свидетельствует о том, что саморазогрев диода приводит к уменьшению амплитуд низкочастотных составляющих в спектре выходного сигнала. Приведенные на рис.6д и 6е фазовый портрет колебаний тока в диоде Ганна и зависимость мгновенных значений тока от времени свидетельствуют о том, что наряду с уменьшением амплитуд субгармонических составляющих в спектре выходного сигнала при саморазогреве диода может наблюдаться переход от периодического к квазипериодическому колебательному процессу и его последующая хаотизация.

Как следует из результатов расчета, приведенных на рис. 7, при достаточно высоком сопротивлении диода $R_0=10$ Ом увеличение теплового сопротивления R_T приводит к монотонному уменьшению мощности субгармоники $A_{f_0/6}$ с частотой $f_0/6$. При использовании диодов с $R_0=7.5$ Ом увеличение R_T вызывает немонотонное изменение мощности субгармоник в спектре выходного сигнала. Расчеты показывают также, что в зависимости от величины теплового сопротивления прибора мощность субгармонических составляющих выходного сигнала с ростом сопротивления кристалла диода может как возрастать, так и уменьшаться. Однако при значениях $R_T \approx 100$ град/Вт, реально имеющих место на практике, увеличение R_0 приводит к уменьшению мощности субгармоник.

Заключение

Таким образом, теоретически на основе совместного с системой уравнений Кирхгофа решения нестационарного уравнения теплового баланса

проанализированы закономерности изменения спектра выходного сигнала генератора на диоде Ганна для различных напряжений питания.

Наблюдающийся экспериментально в диодах Ганна режим генерации при напряжениях питания, близких к пороговому, может быть characterized как сложный динамический процесс, обладающий выраженной структурой.

Установлено, что в зависимости от напряжения питания саморазогрев кристалла диода может вызывать либо переход от периодического к квазипериодическому колебательному процессу и его хаотизацию.

Показано, что в зависимости от теплового сопротивления прибора увеличение электрического сопротивления диода Ганна в слабых электрических полях может приводить как к увеличению, так и к уменьшению амплитуд отдельных субгармонических и гармонических составляющих в спектре выходного сигнала генератора.

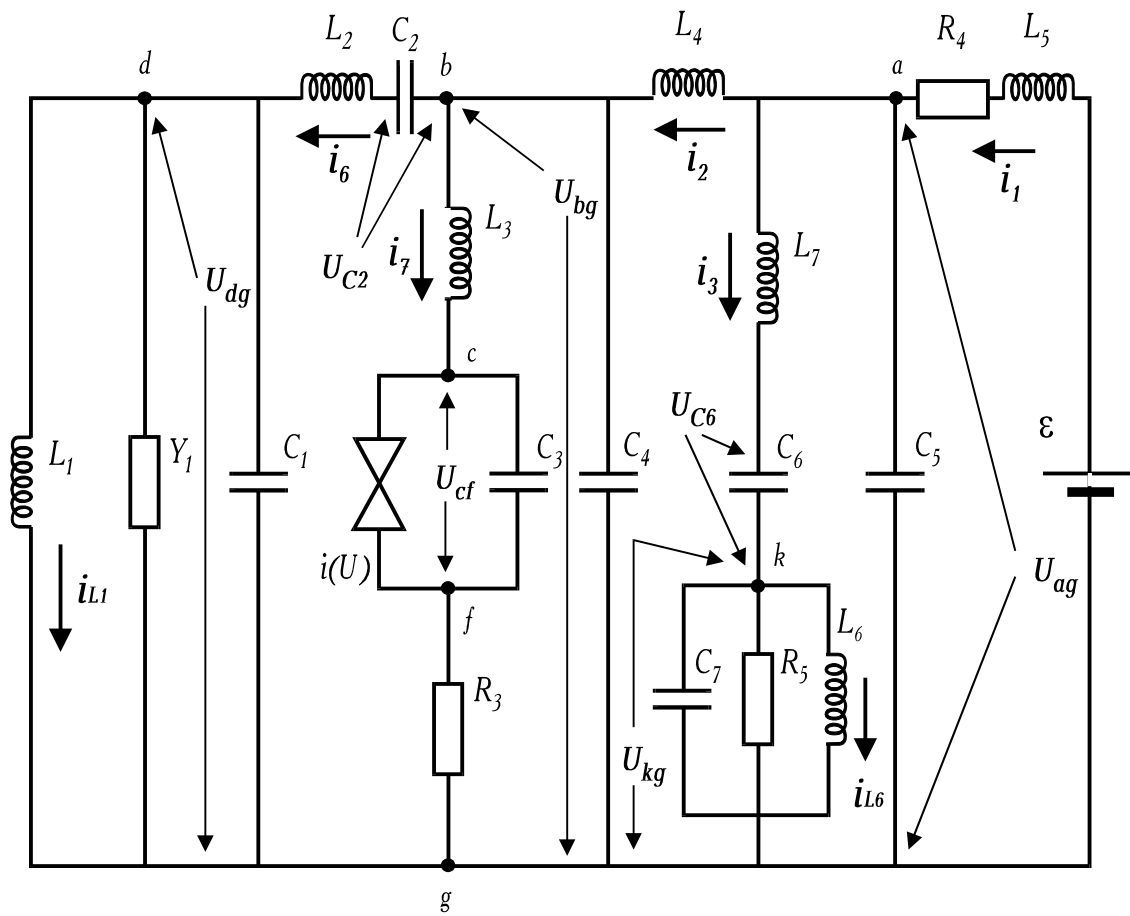


Рис. 1.

Эквивалентная схема генератора на диоде Ганна.

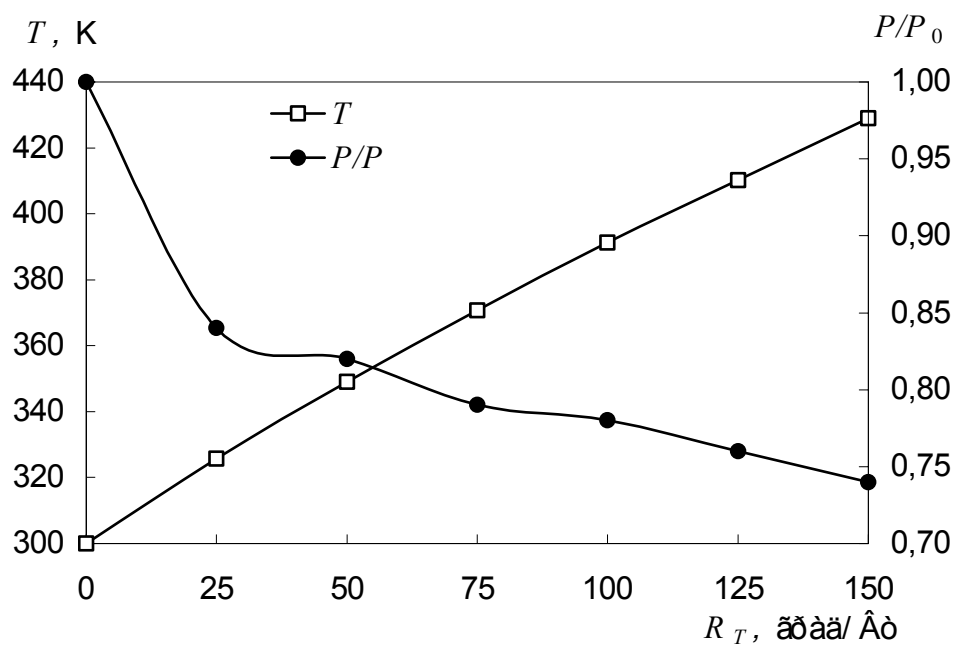


Рис. 2.

Зависимости температуры кристалла диода Ганна и выходной мощности генератора от величины теплового сопротивления R_T . $\varepsilon=8 \text{ В}$, $C_2=0.3 \text{ пФ}$, $L_4=0.01 \text{ нГн}$.

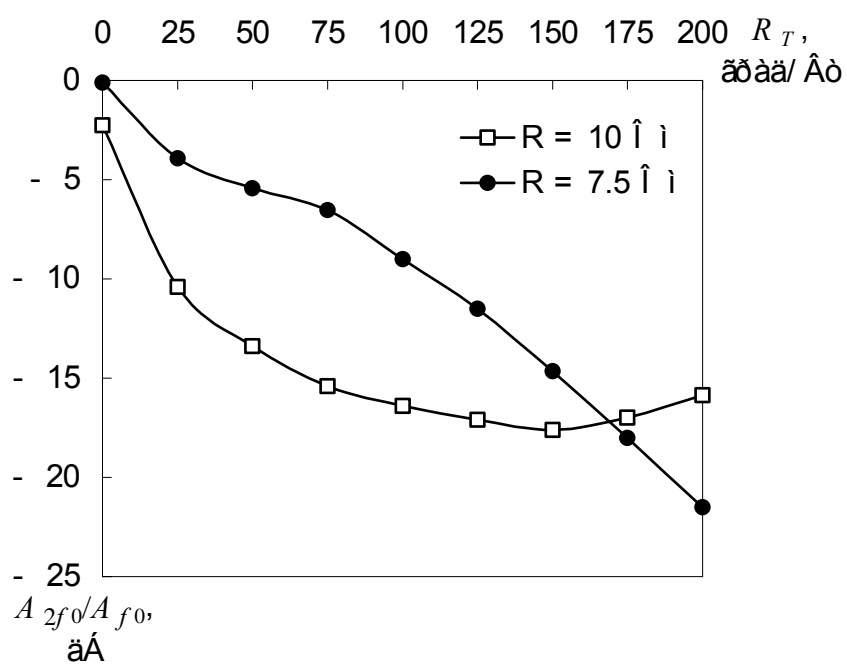


Рис. 3.

Зависимости относительной мощности второй гармоники выходного сигнала от величины теплового сопротивления прибора R_T для различных значений R_0 . $\varepsilon=6$ В, $C_2=0.03$ пФ, $L_4=0.1$ нГн.

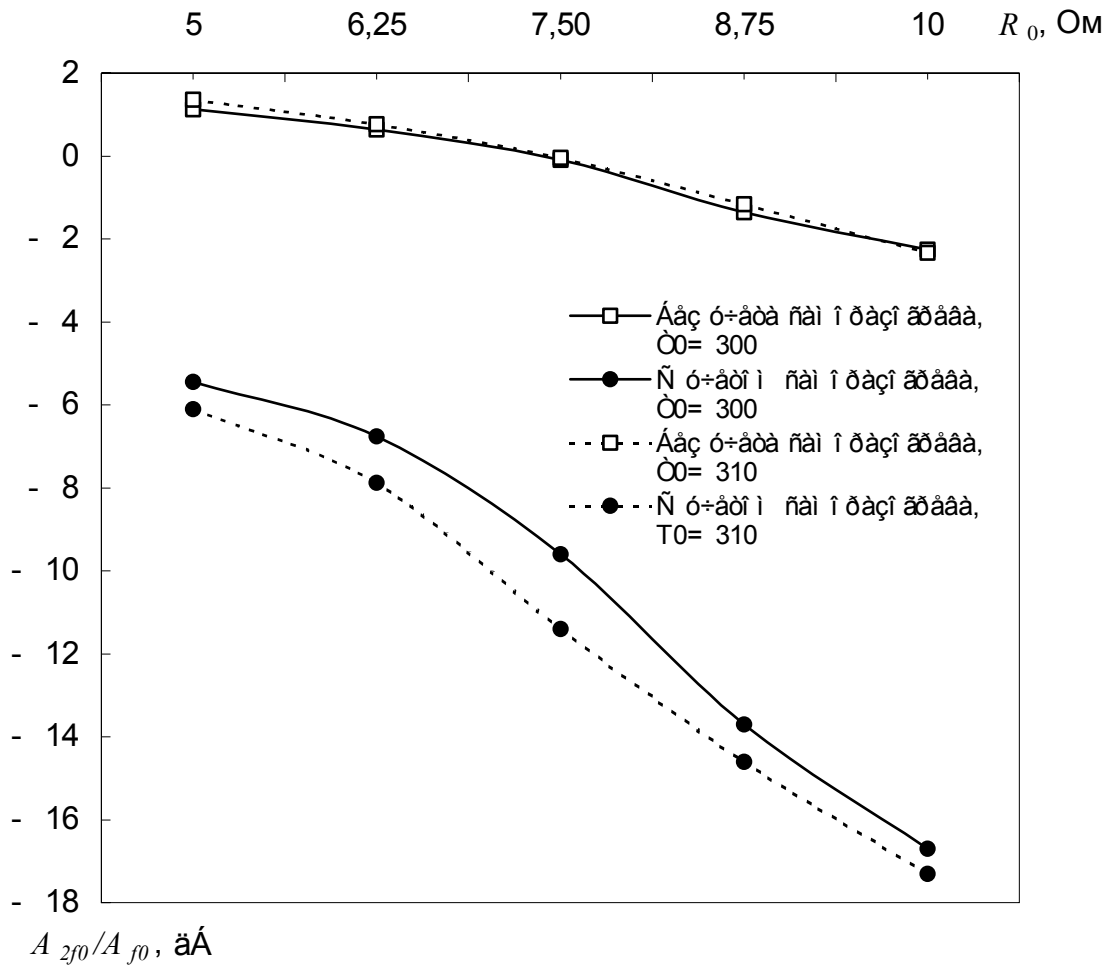


Рис. 4.

Зависимости относительной мощности второй гармоники от сопротивления диода R_0 с учетом ($R_T=100$ град/Вт) и без учета саморазогрева кристалла диода Ганна для различных температур окружающей среды T

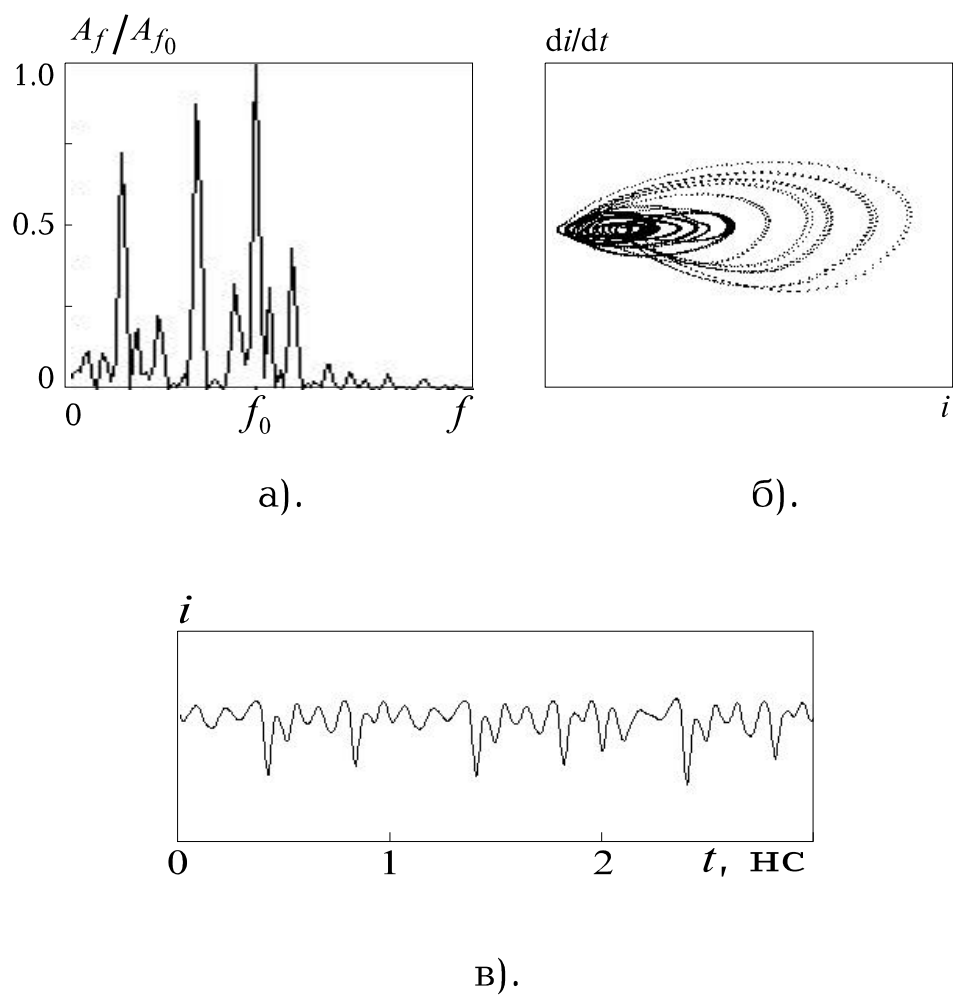


Рис. 5.

Спектр выходного сигнала (а), фазовый портрет колебаний (б) и зависимость мгновенных значений тока, протекающего через диод Ганна, от времени (в) при напряжениях питания, близких к пороговому. $\varepsilon=3.425$ В, $C_2=0.3$ пФ, $L_4=0.5$ нГн.

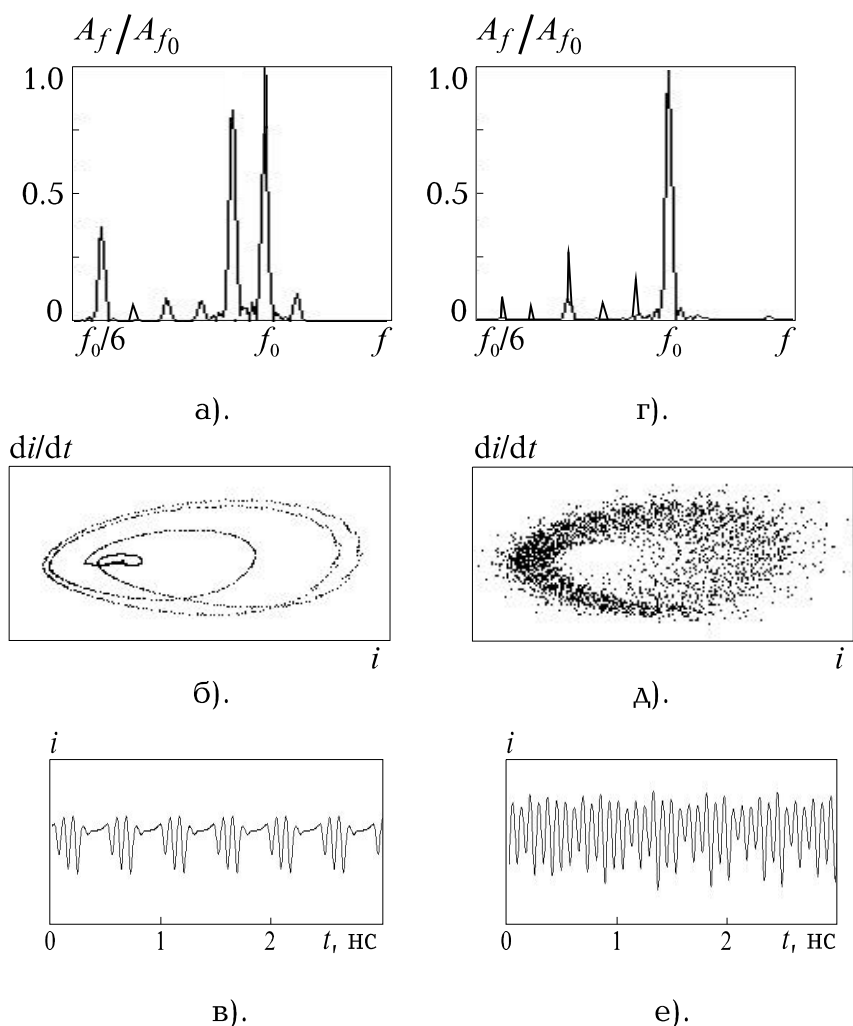


Рис. 6.

Спектры выходного сигнала (а, г), фазовые портреты колебаний (б, д) и зависимости мгновенных значений тока, протекающего через диод Ганна, от времени (в, е) при наличии в спектре выходного сигнала субгармоники $f_0/6$ и кратных ей субгармоник без учета (а, б, в) и с учетом (г, д, е) саморазогрева кристалла. $\varepsilon=3.725$ В, $C_2=0.3$ пФ, $L_4=0.01$ нГн.

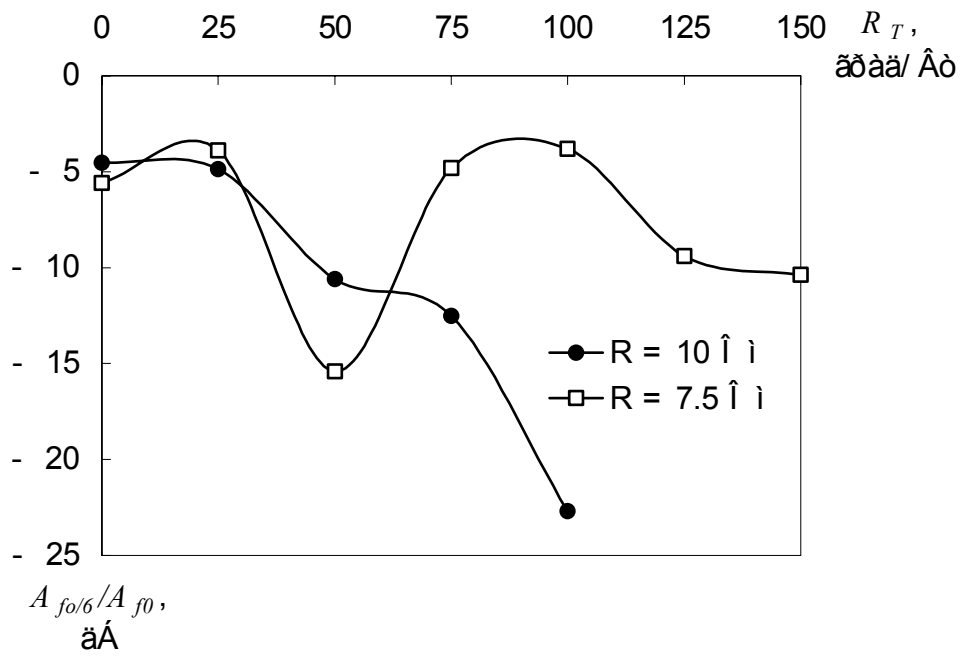


Рис. 7.

Зависимости относительной мощности субгармоники с частотой $f_0/6$ от величины теплового сопротивления R_T для различных значений R_0 .

Библиографический список

1. Левинштейн М. Е., Пожела Ю. К., Шур М. С. Эффект Ганна. М.: Сов. радио.- 1975. 288 с.
2. Царапкин Д. П. Генераторы СВЧ на диодах Ганна. М.: Радио и Связь.- 1981. 112 с.
3. Tsai W. C., Rosenbaum F. I. Bias circuit oscillations in Gunn devices // IEEE Trans. Electron Dev. 1969. Vol. ED-16. №2.-P.196-202.
4. Романюк В. А., Шарифов Т. М. Паразитные колебания в СВЧ-генераторах на активных двухполюсниках // Радиотехника.-1977.-Т.32. №5.-С.57-63.
5. Усанов Д. А., Горбатов С. С., Скрипаль А. В. Особенности низкочастотной генерации СВЧ диодов Ганна // Изв. ВУЗов. Сер. Радиоэлектроника.-1981.- Т.24. №10.-С.67-69.
6. Усанов Д. А., Вениг С. Б., Горбатов С. С., Семенов А. А. Влияние нелинейности характеристик импеданса диодов Ганна на работу СВЧ-генераторов на их основе // Изв. ВУЗов. Сер. Прикладная нелинейная динамика.-1994.-Т.2. №5.-С.35-45.
7. Кальянов Э. В. Стохастизация низкочастотных колебаний генераторов на МЭП-диоде // Радиотехника и электроника.-1984.-Т.29. №1.-С. 83-87.
8. Микроэлектронные устройства СВЧ / Г. И. Веселов, Е. М. Егоров, Ю. Н. Алехин и др. М.: Высш. шк.-1988. 200 с.
9. Шур М. С. Современные приборы на основе арсенида галлия / Пер. с англ. М.: Мир.-1991.-632 с.
10. Bulman P. J., Hobson G. S., Taylor B. C. Transferred electron devices. London, New York: Academic Press,-1972. 402 p.

-
11. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев А. А., Бабаян А. В. Эффект автодинного детектирования в генераторе на диоде Ганна с низкочастотным колебательным контуром в цепи питания // Радиотехника и электроника.-1996.-Т.46. №12.-С.1497-1500.
 12. Билько М. И., Томашевский А. К, Шаров П. П, Баймуратов Е. А. Измерение мощности на СВЧ. М.: Сов.радио,-1976. 168 с.
 13. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Бабаян А. В. Взаимосвязь сопротивления диода Ганна в слабых электрических полях с термостабильностью и выходной мощностью генераторов на их основе // Изв. ВУЗов. Сер. Электроника.-1997. №5.- С.31-36.
 14. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Бабаян А.В. Взаимосвязь сопротивления диодов Ганна в слабых электрических полях с характеристиками генераторов на их основе // Письма в ЖТФ.-1998.-Т.24, №10. - С.1-7.
 15. 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.1931-1940.
 16. Полупроводниковые приборы в схемах СВЧ / под ред. М.Хауэрса, Д.Моргана; Пер. с англ. под ред. В.С.Эткина.-М.:Мир, 1979.-444 с.