

01;06;09

## **Взаимосвязь сопротивления диодов Ганна в слабых электрических полях с характеристиками генераторов на их основе**

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

Саратовский государственный университет

Поступило в Редакцию 3 июня 1997 г.

В окончательной редакции 9 января 1998 г.

Впервые проведено теоретическое описание ранее экспериментально установленной закономерности, определяющей взаимосвязь сопротивления полупроводниковой структуры в слабых электрических полях с характеристиками генераторов на диодах Ганна. Установленная экспериментально закономерность представляет значительную практическую ценность, так как с ее использованием оказывается возможным по легко измеряемым параметрам диодов на постоянном токе прогнозировать основные характеристики диодных СВЧ-генераторов.

Известно, что в генераторах на диодах Ганна наблюдается существенное различие генерируемой мощности, долговременной нестабильности мощности и частоты при использовании диодов Ганна одного и того же типа в одной и той же конструкции генератора и при одном и том же источнике питания. Было установлено [1], что это различие связано с разбросом параметров диодов по сопротивлению в слабых электрических полях, который, в свою очередь, может быть обусловлен неконтролируемыми факторами технологического процесса создания диодных структур. Из результатов экспериментальных исследований следует также, что стремление повысить уровень выходной мощности

генераторов на диодах Ганна путем использования низкоомных диодов ведет к существенному увеличению долговременной неустойчивости мощности и частоты генераторов. Установленная экспериментально закономерность представляет значительную практическую ценность, так как оказывается возможным по легко измеряемым параметрам диодов на постоянном токе прогнозировать основные характеристики диодных СВЧ-генераторов. Однако теоретическое описание взаимосвязи сопротивления полупроводниковой структуры в слабых электрических полях с характеристиками генераторов на диодах Ганна отсутствовало, что затрудняло понимание обуславливающих ее физических причин.

С целью выяснения такой взаимосвязи физические процессы в диоде Ганна анализировались на основе совместного с системой уравнений Кирхгофа [2] решения нестационарного уравнения теплового баланса, представленного в виде [3]:

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

где  $T$  и  $T_0$  — температура кристалла диода и окружающей среды соответственно,  $R_T$  — полное тепловое сопротивление прибора,  $C_m$  — теплоемкость полупроводникового кристалла. При расчете использовалась типичная вольт-амперная характеристика  $i(U, T)$  диода Ганна [4], которая аппроксимировалась выражением вида [2,5]:

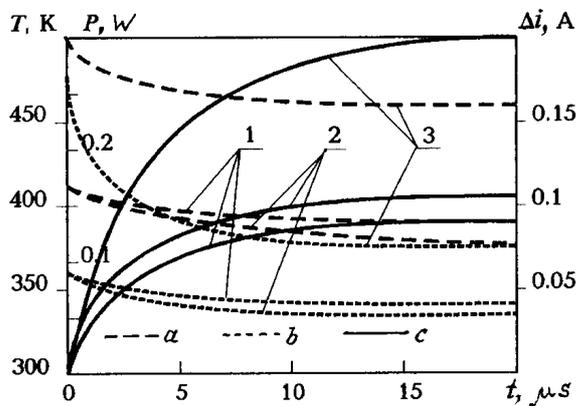
$$i = R_0^{-1} \frac{d}{\mu(T)} \cdot \frac{\mu(T)(U + D)/d + V_s(T)[(U + D)/U_n]^4}{1 + [(U + D)/U_n]^4},$$

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  $U > U_n$ ,

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

$$V_s(T) = V_0 / [T(1 - 53 \cdot 10^{-4} \cdot T)].$$

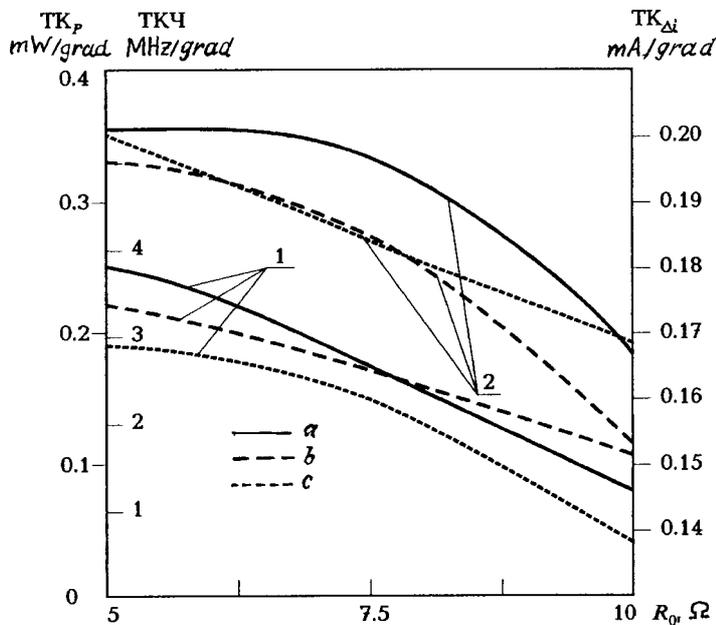
На основе вышеприведенной модели были проведены расчеты переходного процесса установления стационарного режима работы генератора на диоде Ганна с учетом его саморазогрева. На рис. 1



**Рис. 1.** Зависимости генерируемой мощности (*a*), изменения постоянного тока в цепи питания диода Ганна (*b*), температуры диода (*c*) от времени  $t$  после включения постоянного смещения для диодов с различными значениями сопротивления  $R_0$  и теплового сопротивления  $R_T$ . 1 —  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $R_T = 100 \text{ grad/W}$ , 2 —  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $R_T = 150 \text{ grad/W}$ , 3 —  $R_0 = 5 \Omega$ ,  $R_T = 100 \text{ grad/W}$ .

представлены зависимости генерируемой мощности  $P$ , величины изменения постоянного тока  $\Delta i$  в цепи питания диода Ганна, температуры кристалла диода  $T$  от времени  $t$  после включения постоянного смещения для диодов с различными значениями сопротивления  $R_0$  и теплового сопротивления  $R_T$ . Как следует из результатов расчета, приведенных на рис. 1, уровень генерируемой диодом Ганна мощности и величина изменения постоянного тока в стационарном режиме увеличиваются с уменьшением сопротивления  $R_0$  и теплового сопротивления прибора  $R_T$ .

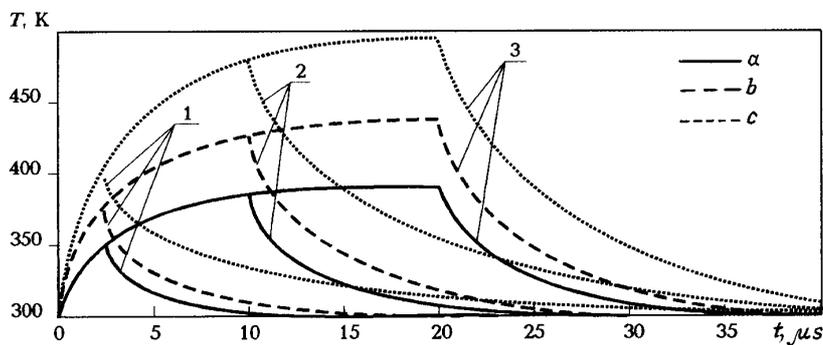
Расчеты температурных коэффициентов частоты ( $\text{ТКЧ} = \Delta f / \Delta T$ ), мощности ( $\text{ТК}_P = \Delta P / \Delta T$ ), изменения тока ( $\text{ТК}_{\Delta i} = \Delta i / \Delta T$ ) показали, что абсолютные значения величин долговременной нестабильности основных характеристик, обусловленной изменением температуры окружающей среды, уменьшаются с ростом теплового сопротивления прибора  $R_T$  и сопротивления  $R_0$ . На рис. 2 приведены зависимости абсолютных значений  $\text{ТКЧ}$ ,  $\text{ТК}_P$  и  $\text{ТК}_{\Delta i}$  от сопротивления диода  $R_0$  для различных значений величины теплового сопротивления  $R_T$ .



**Рис. 2.** Зависимости абсолютных значений ТКЧ (*a*), ТК<sub>Р</sub> (*b*) и ТК<sub>Δ<sub>и</sub></sub> (*c*) от сопротивления диода  $R_0$  для различных значений величины теплового сопротивления  $R_T$ . 1 —  $R_T = 150$  grad/W, 2 —  $R_T = 100$  grad/W.

Для определения величины долговременной нестабильности характеристик выходного сигнала генератора на диоде Ганна, обусловленной изменением условий теплопередачи, были проведены расчеты модуляционной чувствительности по тепловому сопротивлению частоты ( $\Delta f/\Delta R_T$ ), мощности ( $\Delta P/\Delta R_T$ ) и изменению постоянного тока в цепи питания диода Ганна ( $\Delta i/\Delta R_T$ ), показавшие, что абсолютные значения модуляционных чувствительностей генератора по тепловому сопротивлению уменьшаются с ростом температуры окружающей среды и сопротивления диода  $R_0$ .

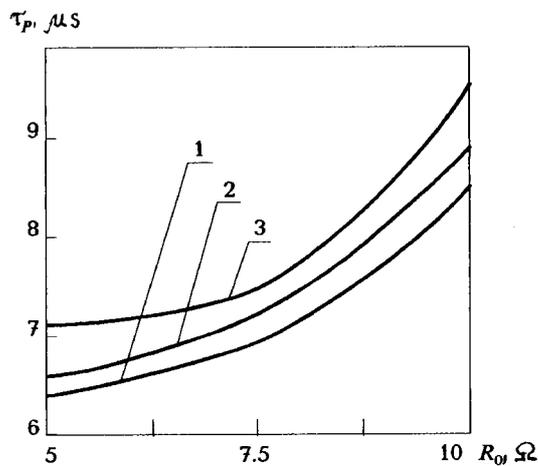
Сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами, приведенными в работе [1], показывает их качественное совпадение. Достижение количественного совпадения при определении величин



**Рис. 3.** Зависимости температуры кристалла диода Ганна от времени при воздействии прямоугольного импульса питания различной длительности  $\tau_p, \mu s$ : 1 — 2.5; 2 — 10.0; 3 — 20.0.  $a$  —  $n_0 = 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $R_T = 100 \text{ grad/W}$ ;  $b$  —  $n_0 = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $R_T = 100 \text{ grad/W}$ ;  $c$  —  $n_0 = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $R_T = 150 \text{ grad/W}$ .

долговременной нестабильности характеристик генератора получается, как это следует из результатов расчета, при учете одновременного действия со своими знаками нескольких дестабилизирующих факторов, например, изменения условий теплопередачи  $R_T$  и температуры окружающей среды  $T_0$ . Определение взаимосвязи этих параметров в реальном приборе является самостоятельной, достаточно сложной задачей.

Следует отметить также, что количественное изменение величины долговременной нестабильности характеристик генератора на диоде Ганна зависит от причин, вызывающих изменение величины сопротивления диода  $R_0$ . Так, например, уменьшение величины  $R_0$  в 2 раза, вследствие увеличения  $\mu(T)$ , приводит к двукратному увеличению нестабильности характеристик выходного сигнала генератора по сравнению с аналогичным уменьшением  $R_0$  вследствие увеличения  $S$  или  $n_0$ . Расчеты показывают, что это связано с меньшим саморазогревом кристалла диода, происходящим при увеличении  $\mu$ , по сравнению с саморазогревом, происходящим при аналогичном увеличении  $S$  или  $n_0$ . Следует также принять во внимание, что увеличение  $S$  или  $n_0$  приводит к более значительному увеличению выходной мощности генерируемого излучения, чем увеличение  $\mu(T)$ .



**Рис. 4.** Зависимости максимальной длительности импульса питания  $\tau_P$ , при которой обеспечивается определенное значение уровня нестабильности выходного сигнала генератора на диоде Ганна, обусловленной изменением условий теплопередачи и температуры окружающей среды, от сопротивления диода  $R_0$ . 1 —  $T_0 = 290$  К, 2 —  $T_0 = 300$  К, 3 —  $T_0 = 310$  К.

В работе [1] приведены результаты экспериментальных исследований, из которых следует, что при использовании импульсного питания уменьшается нестабильность выходных характеристик генератора по сравнению со случаем, когда генератор запитывается от источника постоянного напряжения.

Результаты расчета зависимости температуры кристалла диода от времени при воздействии на него прямоугольного импульса питания для различных значений  $R_0$  и  $R_T$  и длительности импульса  $\tau_P$  представлены на рис. 3. Минимальный период следования импульсов, при котором обеспечивается режим остывания, увеличивается с увеличением длительности импульса. Эта зависимость заметно усиливается, если  $\tau_P$  становится соизмеримым со временем остывания.

В результате расчетов было также установлено, что максимальная длительность импульса питания  $\tau_P$ , при которой обеспечивается определенное значение уровня нестабильности выходного сигнала генератора на диоде Ганна, обусловленная изменением условий теплопередачи

и температуры окружающей среды (рис. 4), увеличивается с ростом сопротивления полупроводниковой структуры диода.

Таким образом, с помощью моделирования электрических и теплофизических параметров диода Ганна описана экспериментально наблюдающаяся взаимосвязь сопротивления диодов в слабых электрических полях с характеристиками СВЧ-генераторов на их основе, что позволяет по легко измеряемым параметрам диодов на постоянном токе прогнозировать основные характеристики диодных СВЧ-генераторов.

Из полученных результатов, в частности, следует также, что, используя диоды с низким значением  $R_0$ , соответствующим выбором  $\tau_r$  можно добиться повышения максимальной генерируемой мощности при сохранении уровня неустойчивости сигнала.

## Список литературы

- [1] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев А.А. // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 10. С. 194–198.
- [2] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев А.А., Бабаян А.В. // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 46. № 12. С. 1497–1500.
- [3] Билько М.И., Томашевский А.К., Шаров П.П., Баймуратов Е.А. Измерение мощности на СВЧ. М.: Сов. радио, 1976. 168 с.
- [4] Murayama K., Ohmi T. // Japan. J. Appl. Phys. 1973. V. 12. N 12. P. 1931–1940.
- [5] Mulmot P.J., Hobson G.S., Taylor B.C. Transferred electron devices. London, New York: Academic Press, 1972. 402 p.