

## Стабилизация фазы СВЧ-колебаний наносекундной длительности в генераторе на диоде Ганна

© В.Ю. Конев,<sup>1</sup> А.И. Климов,<sup>1</sup> О.Б. Ковальчук,<sup>1</sup> В.П. Губанов,<sup>1</sup> В.Ю. Кожевников,<sup>2</sup> А.В. Козырев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: kozyrev@to.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 22 мая 2014 г.)

Выполнено численное моделирование процесса навязывания фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов на диоде Ганна импульсом модулирующего напряжения. По результатам численных расчетов выявлены зависимости вариации фазы СВЧ-колебаний от разброса длительности фронта и амплитуды модулирующего импульса. Проведены измерения стандартного отклонения времени задержки фазы в генераторе трехсантиметрового диапазона относительно фиксированного уровня напряжения на фронте модулирующего импульса. Экспериментально исследована синхронизация фаз двух электродинамически не связанных генераторов, параллельно возбуждаемых одним модулятором.

### Введение

Синхронизация фаз СВЧ-генераторов на протяжении десятилетий представляет большой практический интерес [1,2]. Генераторы на основе диодов Ганна (далее ГГ) с высокой фазовой стабильностью могут эффективно использоваться в системах ближней радиолокации с высоким разрешением по дальности [3,4]. Исследование возможности стабилизации фазы СВЧ-импульсов таких генераторов может способствовать повышению распознавательной способности радиолокационных систем за счет когерентного накопления принимаемых сигналов, а также для построения активных фазированных антенных решеток [5]. Особый интерес может представлять использованный в работах [6–9] способ фиксации фазы наносекундных ГГ трехсантиметрового диапазона милливаттной мощности. Этот способ фазовой синхронизации пары не имеющих электродинамической связи генераторов обеспечивается применением достаточно крутого фронта модулирующих импульсов напряжения, подаваемых на генераторные диоды [6]. По мнению авторов этой работы, начальная фаза СВЧ-колебаний задавалась „ударным“ возбуждением резонатора всплеском тока, а для ее фиксации длительность фронта импульса напряжения на генераторных диодах Ганна (далее ДГ) должна быть сравнима с периодом колебаний, т. е. быть порядка 100 ps.

Однако позднее [10] было показано, что в наносекундных ГГ трехсантиметрового диапазона с более высокой мощностью ( $\sim 30$  W) при длительности переднего фронта импульса напряжения питания  $\tau_e \approx 4.5$  ns, что существенно превышает период СВЧ-колебаний, фаза СВЧ-колебаний также стабильна по отношению к фиксированной точке на фронте импульса напряжения. В связи с этим в настоящей работе посредством численного моделирования и экспериментально выполнены более детальные исследования эффекта стабилизации

фазы наносекундных ГГ трехсантиметрового диапазона мощностью  $\sim 30$  W.

### Модель диода Ганна

Численный анализ электронных процессов в ДГ выполнялся на основе одномерной локально-полевой модели [11–13]. Основным фактором, ограничивающим практическое использование этой модели, является допущение того, что скорость электронов считается мгновенной функцией локального электрического поля. Известно [11,12], что в случае, когда время релаксации электронов проводимости по энергии (в арсениде галлия это время  $\tau \approx 10^{-12}$  s) превышает длительность исследуемых процессов, такое допущение не применимо. Поскольку в настоящей работе все численные расчеты проводились в режиме работы ГГ, при котором основная частота СВЧ-колебаний была около 10 GHz, что соответствует периоду 100 ps, то задача полностью удовлетворяет критериям применимости локально-полевой модели.

Полупроводниковая структура ДГ рассматривалась как кристалл арсенида галлия с  $n$ -типом проводимости с двумя омическими контактами на противоположных гранях. Уравнение для напряженности электрического поля  $E(x, t)$  в полупроводнике может быть получено из уравнения непрерывности для электронов, в котором концентрация электронов выражается через уравнение Пуассона [13]

$$\frac{\partial E}{\partial t} = D \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - V(E) \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon} \left( D \frac{\partial n_0}{\partial x} - n_0 V(E) + \frac{I}{eS} \right), \quad (1)$$

где  $V(E)$  — зависимость скорости дрейфа электронов от локальной напряженности электрического поля,  $D$  — коэффициент электронной диффузии,  $n_0(x)$  — концентрация доноров вдоль образца,  $I$  — ток во внешней

цепи,  $e$  — заряд электрона,  $\epsilon_0\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость арсенида галлия,  $S$  — площадь поперечного сечения полупроводника,  $x$  — координата вдоль его структуры.

На электрическое поле в полупроводниковой структуре (базе диода) накладывалось известное начальное условие [13], контактными неоднородностями проводимости в расчетах пренебрегалось, а для поля задавались граничные условия Неймана [14]

$$E(x, t = 0) = \varphi_T \frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial x}, \quad \left. \frac{\partial E}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial E}{\partial x} \right|_{x=l} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\varphi_T = kT/e$  — температурный потенциал,  $l$  — длина базы диода. Поле  $E(x, t)$  и падение напряжения  $U(t)$  на диоде связаны обычным соотношением

$$U_{GD}(t) = \int_0^l E(x, t) dx.$$

В области базы ДГ профиль уровня легирования задавался равномерным с концентрацией доноров  $n_0$ . Возникновение домена сильного поля инициировалось локальным уменьшением („зарубкой“) в прикатодной области на 10% концентрации доноров относительно уровня  $n_0$ . „Зарубка“ шириной  $l_2$  располагалась на расстоянии  $l_1$  от катода, причем  $l_1, l_2 \ll l$ .

В модельных расчетах принимались следующие значения параметров полупроводника: диаметр исследованной полупроводниковой структуры в расчетах составлял  $d = 300 \mu\text{m}$ , длина базы  $l = 12.5 \mu\text{m}$ , концентрация донорной примеси  $n_0 = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , концентрация примеси в области „зарубки“  $n_1 = 0.9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , ширина зарубки  $l_2 = 0.6 \mu\text{m}$ , ее расстояние от катода  $l_1 = 0.6 \mu\text{m}$ . Коэффициент диффузии электронов, как и в [13], считался постоянным,  $D = 200 \text{ cm}^2/\text{s}$  и не зависящим от поля. Для описания зависимости средней дрейфовой скорости электронов от локальной напряженности поля  $V(E)$  использовалось модельное выражение [13]

$$V(E) = [\mu_n E + V_m (E/E_m)^4] / [1 + (E/E_m)^4], \quad (3)$$

где  $V_m = 10^7 \text{ cm/s}$  — дрейфовая скорость, соответствующая насыщению характеристики при большом поле  $E \gg E_m$ ,  $E_m = 4 \text{ kV/cm}$ , подвижность электронов в пределе слабого поля полагалась равной  $\mu_n = 8000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ .

Моделирование выполнялось в среде MATLAB R2012b. Для решения уравнения (1) использовались традиционные неявные абсолютно устойчивые разностные схемы [15], которые применимы для квазилинейных гиперболических уравнений. Пространственный шаг  $\Delta x$  выбирался приблизительно в 100 раз меньше возможного размера домена сильного поля. Интервал времени  $\Delta t$  выбирался много меньше характерного времени изменения электрического поля в диоде, т.е. порядка нескольких сотен фемтосекунд [13].

## Моделирование работы генератора

На первом этапе работы выполнялось моделирование простейшего ГГ, цепь которого включала последовательно соединенные элементы: ДГ, источник импульсного напряжения (модулятор) с заданной формой импульса  $U_0(t)$  и ограничительное сопротивление  $R = 1 \Omega$ . ДГ представлял собой либо однослойную полупроводниковую структуру, либо двухслойную структуру, которая образовывалась последовательным включением двух одинаковых однослойных структур. Ток в цепи данной схемы вычисляется в соответствии с уравнением Кирхгофа

$$I(t) = \frac{1}{R} \left[ U_0(t) - \int_0^l E(x, t) dx \right], \quad (4)$$

которое позволяет замкнуть систему уравнений теоретической модели.

Для учета влияния электрического СВЧ-поля резонатора на процессы в полупроводниковой структуре диода цепь ГГ должна быть дополнена колебательным контуром. Поэтому на втором этапе проводились численные расчеты ГГ с колебательным контуром, схема которого изображена на рис. 1, учитывающим основные конструктивные особенности электродинамической системы генератора [16].

Сопротивление  $R_1$  является ограничительным и позволяет регулировать напряжение на колебательном контуре. Цепочка элементов  $L_1$ – $C_1$  имитирует СВЧ-фильтр, развязывающий колебательный контур и модулятор по СВЧ. Емкость  $C_2$  учитывает емкость корпуса ДГ и емкость диодной ножки на землю и одновременно развязывает по видеоимпульсу резистор  $R_2$ , моделирующий потери мощности в электродинамической системе ГГ и уход мощности в выходной волновод. Емкость  $C_2$  и индуктивность  $L_2$  образуют колебательный контур, замещающий комбинированную колебательную систему, образованную коаксиальной цепью ДГ и подключенным к его резонаторной камере регулируемым волноводным резонатором. Элемент  $L_3$  учитывает индуктивность ДГ.

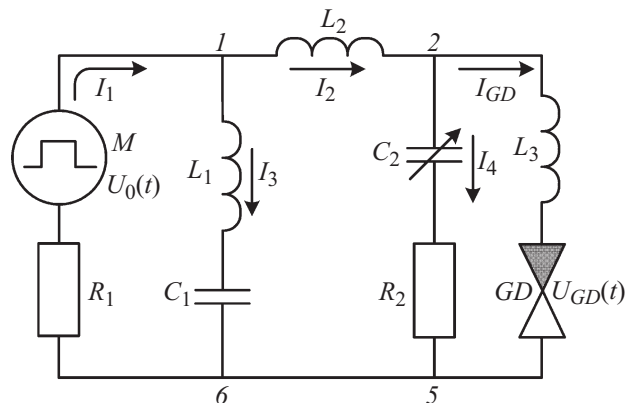


Рис. 1. Схема замещения генератора на диоде Ганна с учетом его электродинамической системы.

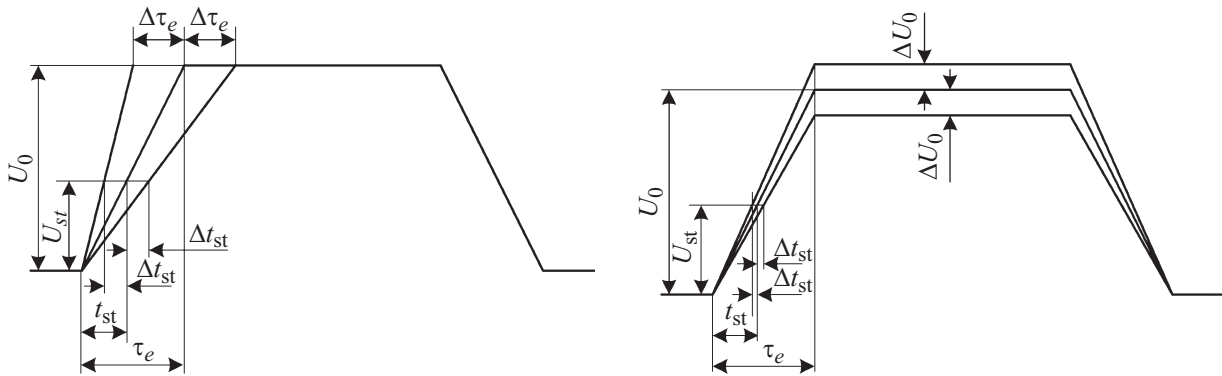


Рис. 2. Форма импульса модулирующего напряжения, использованная в расчетах.

При моделировании процессов в ДГ в схеме с колебательным контуром использовалось уравнение (1) для нахождения электрического поля в полупроводниковой структуре с граничными и начальными условиями (2) и выражением  $U_{GD}(t) = \int_0^l E(x, t) dx$  для напряжения на диоде, дополненное уравнениями для внешней цепи, полученными с использованием правил Кирхгоффа:

$$I_1 = I_2 + I_3, \quad I_2 = I_4 + I_{GD},$$

$$U_0(t) = I_1 R_1 + L_1 \frac{dI_3}{dt} + \frac{1}{C_1} \int_0^t I_3 dt,$$

$$\frac{1}{C_1} \int_0^t I_3 dt + L_1 \frac{dI_3}{dt} = L_2 \frac{dI_2}{dt} + \frac{1}{C_2} \int_0^t I_4 dt + I_4 R_2,$$

$$L_3 \frac{dI_{ДГ}}{dt} + U_{GD}(t) = \frac{1}{C_2} \int_0^t I_4 dt + I_4 R_2.$$

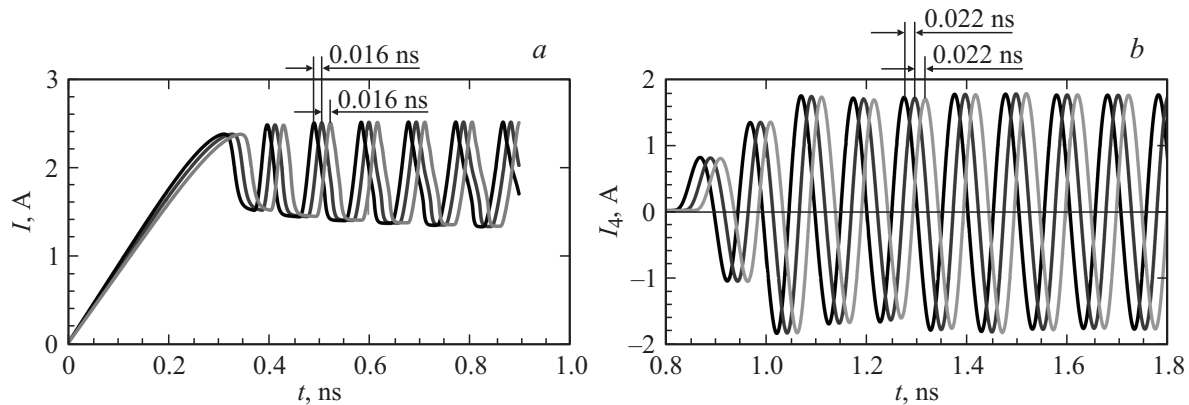
Модулирующий импульс источника напряжения задавался в виде трапеции (рис. 2) с изменяемыми значениями длительности фронта  $\tau_e$  и амплитуды  $U_0$ . Среднее значение  $U_0$  было 20 В для однослойной и двухслойной структур в схеме с резистивной нагрузкой, а также для однослойной структуры в схеме с колебательным контуром. Для двухслойной структуры в схеме с колебательным контуром среднее значение  $U_0$  равнялось 100 В.

При моделировании выполнялась оптимизация параметров элементов схемы замещения и амплитуды импульса модулирующего напряжения. Параметры цепи, оцененные как оптимальные для анализа исследуемых процессов, оказались следующими. Для однослойной полупроводниковой структуры:  $R_1 = 1 \Omega$ ,  $R_2 = 0.5 \Omega$ ,  $L_1 = 0.5 \text{ nH}$ ,  $C_1 = 0.5 \text{ pF}$ ,  $L_2 = 1.2 \text{ nH}$ ,  $C_2 = 1.2 \text{ pF}$ ,  $L_3 = 0.5 \text{ nH}$ . Для двухслойной —  $R_1 = 1 \Omega$ ,  $R_2 = 0.5 \Omega$ ,  $L_1 = 0.8 \text{ nH}$ ,  $C_1 = 0.5 \text{ pF}$ ,  $L_2 = 0.5 \text{ nH}$ ,  $C_2 = 1.5 \text{ pF}$ ,  $L_3 = 0.9 \text{ nH}$ . Эти параметры схем в совокупности с указанными амплитудами модулирующего импульса обеспечивали возбуждение колебаний на частоте

около 10 GHz. На рис. 2  $U_{st}$  — это модулирующее напряжение, при котором ДГ переходит в режим отрицательного дифференциального сопротивления в момент времени  $t_{st}$  и образуется домен сильного поля.

Выполнялись расчеты зависимостей от времени напряжения на ДГ  $U_{GD}(t)$  и тока  $I_{GD}(t)$  через него. В схеме с колебательным контуром, кроме того, рассчитывалась зависимость от времени тока  $I_4(t)$  через нагрузочное сопротивление  $R_2$ .

На рис. 3, а представлены расчетные зависимости от времени тока в цепи ДГ в случае схемы с резистивной нагрузкой, а на рис. 3, б аналогичные зависимости для тока  $I_4$  через нагрузку  $R_2$  в схеме с колебательным контуром. В обоих случаях амплитуда импульса модуляции была постоянной  $U_0 = 20 \text{ V}$ . Расчеты показали, что при вариации длительности фронта  $\Delta \tau_e = \pm 0.05 \text{ ns}$  (при средней длительности фронта 1 ns) вариация фазы колебаний для однослойной структуры составляет  $\Delta t_{ph} = \pm 0.016 \text{ ns}$  в схеме с резистивной нагрузкой и  $\Delta t_{ph} = \pm 0.022 \text{ ns}$  в схеме с колебательным контуром. В случае двухслойной структуры отклонение фазы оказалось:  $\Delta t_{ph} = \pm 0.027 \text{ ns}$  для схемы с резистивной нагрузкой, а в схеме с колебательным контуром  $\Delta t_{ph} = \pm 0.011 \text{ ns}$ . Последние результаты указывают на то, что вариация фазы определяется соотношением между стартовым  $U_{st}$  и амплитудным  $U_0$  напряжениями (рис. 2). Вариация фазы меньше в случае меньшего отношения  $U_{st}$  к  $U_0$ . Кроме того, численное моделирование показало, что во всех случаях включения ДГ, генератор запускается „жестко“, амплитуда колебаний достигает стационарного значения за первую половину периода колебаний. Амплитуда „предымпурса“ тока, протекающего в колебательном контуре в результате его „ударного“ возбуждения, оказалась на два порядка меньше амплитуды колебаний тока ДГ. Как показал анализ расчетных зависимостей тока через ДГ [17], эти колебания не оказывают существенного влияния на установление фазы основных колебаний, определяемой моментом  $t_{st}$  перехода полупроводниковой структуры в область отрицательного дифференциального сопротивления, что свидетельствует о пренебрежимо малом



**Рис. 3.** Зависимости тока ДГ от времени для однослойной полупроводниковой структуры в схеме с резистивной нагрузкой (а) и тока через нагрузку  $R_2$  в схеме с колебательным контуром (b).

воздействию возможных внутренних шумов схемы на установление фазы колебаний.

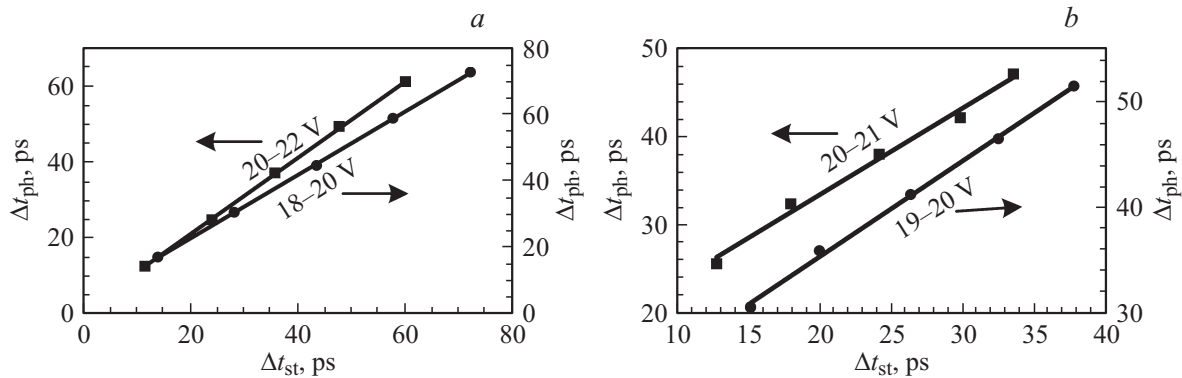
С однослойной полупроводниковой структурой ДГ и с использованием обеих схем генераторов выполнялись более детальные расчеты отклонения фазы  $\Delta t_{ph}$  СВЧ-колебаний при фиксированной амплитуде модулирующего импульса  $U_0 = 20 \text{ V}$  и вариации длительности его фронта  $\Delta \tau_e = \pm 0.1 \text{ ns}$ . При этом длительность  $\tau_e$  самого фронта изменялась в пределах от 0.4 до 2 ns. Кроме того, при таком же изменении длительности фронта в отсутствие ее вариации ( $\Delta \tau_e = 0$ ) варьировалась амплитуда импульса в пределах  $U_0 = 20 \text{ V} \pm 2 \text{ V}$  в случае схемы с резистивной нагрузкой и в пределах  $U_0 = 20 \text{ V} \pm 1 \text{ V}$  в случае схемы с колебательным контуром. Меньшие вариации амплитуды в последнем случае были вызваны необходимостью избежать значимой погрешности определения отклонения фазы. Эта погрешность была обусловлена зависимостью установившейся частоты осцилляций от амплитуды напряжения, которая была выражена сильнее в случае схемы с колебательным контуром. Результаты расчетов отклонения фазы сравнивались с результатами расчетов отклонения момента начала СВЧ-колебаний  $t_{st}$ , который определялся моментом формирования первого домена сильного поля около катода. Этот момент, в свою очередь, определялся моментом достижения критической напряженности поля у катода  $\sim 4 \text{ kV/cm}$ . Расчеты, выполненные для обеих схем генераторов, показали, что вариация фазы  $\Delta t_{ph}$  зависит от вариации длительности фронта  $\Delta \tau_e$  линейно.

Теоретическая оценка отклонения фазы СВЧ-колебаний  $\Delta t_{ph}$  за счет изменения амплитуды  $\Delta U_0$  и длительности фронта  $\Delta \tau_e$  импульса может быть получена из того предположения, что колебания начинаются на фронте модулирующего импульса при достижении на ДГ порогового уровня  $U_{st}$ . На основании формы импульса, показанной на рис. 2, отклонение момента старта СВЧ-колебаний  $\Delta t_{st}^*$  можно определить формулой:

$$\Delta t_{st}^* = \tau_e (U_{st}/U_0) (\Delta \tau_e / \tau_e - \Delta U_0 / U_0). \quad (5)$$

К сожалению, как показало сравнение с результатами численного моделирования, эта формула может быть использована лишь для качественного анализа, главным образом, в схеме генератора с резистивной нагрузкой. Это связано, в первую очередь, с тем, что форма импульса напряжения на ДГ отличается от трапециoidalной формы напряжения модулирующего импульса. В схеме с колебательным контуром дополнительным влияющим фактором являются особенности возбуждения колебаний. Тем не менее из соотношения (4) следуют практически важные качественные выводы о том, что при стабильной амплитуде модулирующего импульса,  $\Delta U_0 = 0$ , разброс момента старта  $\Delta t_{st}^*$  не должен зависеть от средней длительности фронта  $\tau_e$ , а будет определяться только вариацией его длительности  $\Delta \tau_e$ . А при стабильной длительности фронта ( $\Delta \tau_e = 0$ ) разброс момента старта  $\Delta t_{st}^*$  должен линейно зависеть от  $\Delta U_0$  и нарастать пропорционально средней длительности фронта  $\tau_e$ .

Полученные в численном моделировании данные для отклонения фазы  $\Delta t_{ph}$  при изменении средней длительности  $\tau_e$  от 0.4 до 2 ns,  $\Delta \tau_e = 0.1 \text{ ns}$  и  $\Delta U_0 = 0$  показали, что как в схеме с резистивной нагрузкой, так и в схеме с колебательным контуром  $\Delta t_{ph}$  соответствует отклонению момента старта СВЧ-колебаний  $\Delta t_{st}$ . При этом в схеме с резистивной нагрузкой  $\Delta t_{ph} \approx 32.3 \text{ ps}$  практически не зависит от длительности фронта импульса напряжения и полностью соответствует оценке по формуле (4):  $\Delta t_{st}^* \approx 32 \text{ ps}$ . На рис. 4 показаны результаты, подтверждающие эти предположения. Так, при вариации амплитуды модулирующего импульса в отсутствие вариации длительности его фронта ( $\Delta \tau_e = 0$ ) отклонение фазы  $\Delta t_{ph}$  нарастает линейно с увеличением длительности фронта от 0.4 до 2 ns и зависит от знака отклонения амплитуды  $\Delta U_0$  относительно ее среднего значения  $U_0 = 20 \text{ V}$ . Последний вывод следует и из геометрических построений, представленных на рис. 2, b. Отклонение  $\Delta t_{st}$  и  $\Delta t_{ph}$  больше в случае уменьшения  $U_0$ , чем при увеличении. Отклонение фазы  $\Delta t_{ph}$  хорошо соответствует отклонению момента  $\Delta t_{st}$  старта

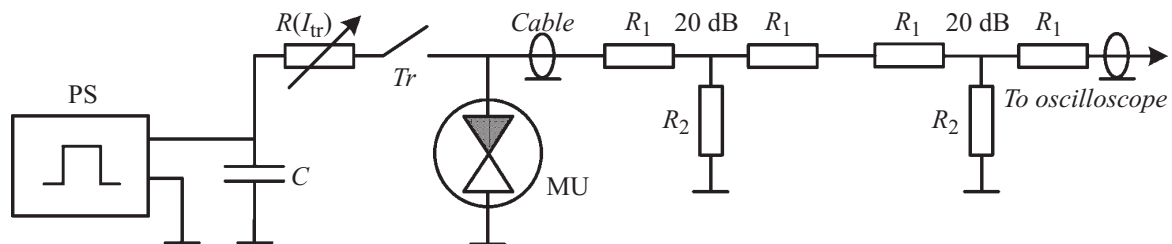


**Рис. 4.** Корреляция отклонения фазы  $\Delta t_{ph}$  тока ДГ в схеме с резистивной нагрузкой (а) и тока нагрузки  $R_2$  в схеме с колебательным контуром (б) от отклонения момента старта  $\Delta t_{st}$  СВЧ-колебаний в ДГ.

колебаний в схеме с резистивной нагрузкой (рис. 4, а). В схеме же с колебательным контуром  $\Delta t_{ph}$  заметно превышает  $\Delta t_{st}$  (рис. 4, б). Это может объясняться некоторыми отличиями процесса установления колебаний при различной амплитуде модулирующего напряжения. На основании результатов, полученных в численном моделировании, можно сделать вывод о том, что на нестабильность фазы СВЧ-колебаний при различной длительности фронта модулирующего импульса существенно влияет нестабильность его амплитуды. При стабильной амплитуде импульса можно генерировать колебания с хорошо управляемой фазой даже при длительности фронта, существенно превышающей период колебаний. Этот результат особенно важен при создании массивов импульсно синхронизованных по фазе генераторов Ганна.

## Эксперименты с генераторами на диодах Ганна

Схема электрических измерений, использованная в описываемых экспериментах, представлена на рис. 5. Основой схемы является модулятор, включающий формирователь импульсов напряжения с накопительной емкостью  $C = 12.6$  pF. Принцип действия модулятора заключается в частичной разрядке накопительной емкости с использованием ключевого транзистора типа DE275.

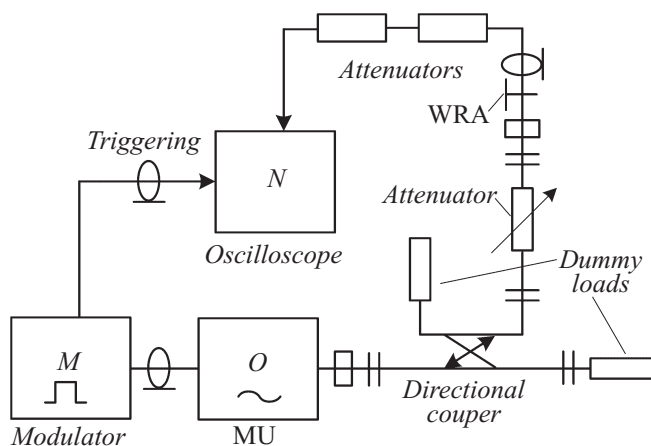


**Рис. 5.** Схема электрических измерений: PS (pulse shaper) — формирователь импульсов напряжения,  $C$  — накопительная емкость модулятора,  $Tr$  — ключевой транзистор DE275 с нелинейным сопротивлением  $R(I_{Tr})$ ; MU (microwave unit) — СВЧ-блок генератора с ДГ.

Основная часть принципиальной схемы модулятора описана в [16]. Схема была дополнена источником питания типа Б5-47, что позволяло регулировать амплитуду модулирующего импульса в пределах 0–300 В на нагрузке 50  $\Omega$ . Временная зависимость напряжения  $U_{GD}(t)$  на входе СВЧ-блока ГГ [16] (далее везде с некоторой погрешностью принимается за напряжение на ДГ) измеряется посредством сборки, состоящей из отрезков кабелей RK50-3-11 и RG-58, и подключенных к ней двух аттенуаторов RADIALL R41620000 с рабочей полосой 4 GHz и ослаблением 20 dB каждый. Длительность фронта импульса напряжения, зарегистрированная по представленной схеме с использованием осциллографа Agilent DSO9254A с рабочей полосой 2.5 GHz и периодом дискретизации 20 Gs/s на нагрузке 50  $\Omega$  без подключения СВЧ-блока, составила  $\tau_e = 1.9$  ns по уровню 0.1–0.9 от амплитуды. Эксперименты выполнялись с одним или двумя включенными последовательно ДГ типа 3A762. Измерялись соответствующие этим вариантам стандартные отклонения  $\sigma_{t1}$  и  $\sigma_{t2}$  разброса времени задержки выбранной фазы СВЧ-колебаний относительно фиксированной точки на фронте импульса напряжения на ДГ. Измерения проводились по схеме, приведенной на рис. 6.

В этой схеме модулирующее напряжение на СВЧ-блок подавалось непосредственно от модулятора. К выходу СВЧ-генератора были подключены волноводный направленный ответвитель, волноводный аттенуатор типа





**Рис. 6.** Схема измерения стандартного отклонения времени задержки фазы СВЧ-колебаний относительно фиксированной точки на фронте импульса напряжения на ДГ: MU — СВЧ-блок генератора с ДГ, WRA (waveguide-to-radio adapter) — коаксиально-волноводный переход.

Д5-1, коаксиально-волноводный переход и кабельная вставка на основе кабеля RG-58, по которой радиосигнал, ослабленный до приемлемого уровня двумя аттенюаторами фирмы RA-DIALL с рабочей полосой 18 GHz, подавался на цифровой осциллограф реального времени LeCroy WaveMaster 830Zi с рабочей полосой до 30 GHz и частотой дискретизации сигнала 40 Gs/s. Осциллограф запускался фронтом импульса напряжения на ДГ. Измерения временных интервалов выполнялись с использованием функции „Delay“ осциллографа.

Амплитуды импульсов напряжения на одном и двух включенных последовательно ДГ были равны 98 и 165 V соответственно, а длительность фронта в обоих случаях составляла 4.1 ns по уровням 0.1–0.9 от амплитуды. Более детально эта методика измерения описана в [18].

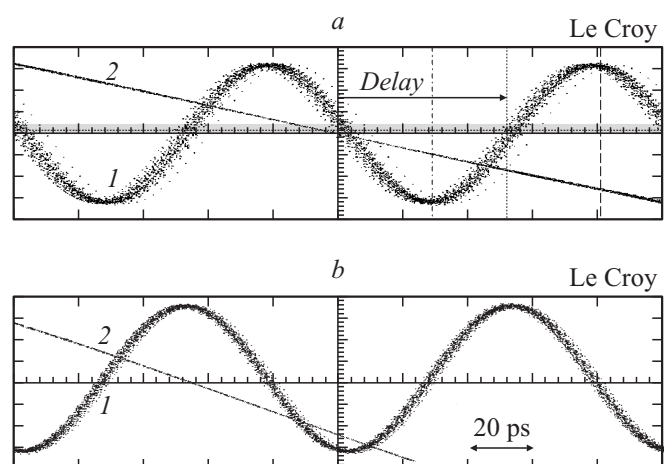
Эксперименты показали, что на результаты измерения  $\sigma_{t1}$  и  $\sigma_{t2}$  существенно влияет нестабильность момента запуска осциллографа, обусловленная СВЧ-помехой ГГ. Эта помеха возникала в результате попадания на канал запуска осциллографа СВЧ-сигнала, просачивающегося через фильтр нижних частот, развязывающий по СВЧ резонаторную камеру и модулятор [16]. Сужение рабочей полосы канала запуска до 1 GHz позволило в необходимой степени решить эту проблему. Результаты измерения зависели также от предела чувствительности и уровня напряжения канала запуска осциллографа. Минимальные  $\sigma_{t1}$  и  $\sigma_{t2}$  были получены при запуске осциллографа на уровне  $U_{tr} \approx 500$  mV в момент, непосредственно предшествовавший началу СВЧ-генерации. Чувствительность канала запуска была 5–10 mV/div. Рабочая полоса канала регистрации СВЧ-сигнала равнялась 13 GHz. При этом выделенный осциллографом временной интервал измерения фазы СВЧ-сигнала относительно момента запуска должен был иметь не более одного перехода от минимума к максимуму или, наоборот, от максимума к минимуму синусоиды сигнала

ла [18]. Учитывались осциллографические погрешности измерения временных интервалов.

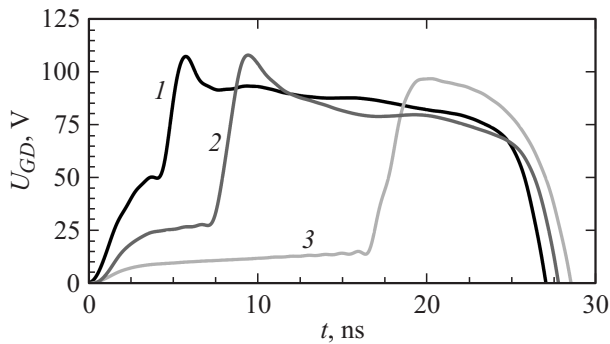
На рис. 7 приведен результат накопления 2500 осциллограмм в случае одного (рис. 7, а) и двух последовательно включенных (рис. 7, б) ДГ. Для однодиодного и двухдиодного ГГ стандартные отклонения составили  $\sigma_{t1} \approx 2.1$  ps и  $\sigma_{t2} \approx 0.8$  ps соответственно. Последний результат соответствует предельным возможностям измерения нестабильности временных интервалов осциллографом LeCroy WaveMaster 830Zi в условиях описанного эксперимента.

Для исследования зависимости  $\sigma_{t1}$  от скорости нарастания (длительности фронта) напряжения  $dU_{GD}/dt$  в цепь между модулятором и СВЧ-блоком впаивались чип-индуктивности. Уровень запуска осциллографа выбирался на начальном участке фронта импульса напряжения ниже уровня полого участка, где  $dU_{GD}/dt \rightarrow 0$ . На рис. 8 представлены полученные осциллограммы импульсов напряжения на ДГ. При наличии некоторой нестабильности амплитуды модулирующего импульса и увеличении длительности его фронта (уменьшении  $dU_{GD}/dt$ ) разброс фазы СВЧ-колебаний возрастал. Минимальное измеренное значение  $\sigma_{t1}$  в первом случае оказалось равно 2.4 ps, во втором — 14.5 ps, в третьем — разброс фазы колебаний генератора был столь значительным, что осциллограммы заполнили экран практически однородно. Эти результаты находятся в хорошем качественном соответствии с вышеизложенными результатами математического моделирования.

В рамках описываемых исследований в работе [17] выполнялись эксперименты по фазовой синхронизации двух генераторов с пиковой мощностью 30 W, которые возбуждались параллельно от одного модулятора через полосковые линии с геометрической длиной 120 см (изолятор — стеклотекстолит, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 6$ ). Этим исключалось влияние генераторов друг на друга через модулятор. Измерения



**Рис. 7.** Статистическая выборка из 2500 осциллограмм СВЧ-сигнала ГГ (1) и аналогичная выборка осциллограмм напряжения на ДГ (2) в случае одного (а) и двух (б) последовательно включенных диодов.



**Рис. 8.** Осциллограммы импульсов напряжения на ДГ, полученные без дополнительной индуктивности (1) и с дополнительными чип-индуктивностями 8.2 (2) и 82 нГн (3).

проводились по схеме, описанной в [10,17]. Длительность фронта импульса напряжения на ДГ была 6.4 ns. Эксперименты продемонстрировали независимость фазы СВЧ-колебаний генераторов на поздних стадиях от фазы слабого сигнала „ударного“ возбуждения колебательно-го контура. Даже при наличии некоторого сбоя фазы одного из генераторов на начальной стадии раскачки основных колебаний через несколько периодов фазы сигналов обоих генераторов выравнивались. Осциллограммы СВЧ-сигналов не изменялись при поочередном отключении ГГ. Таким образом, взаимная синхронизация генераторов исключалась. При этом синфазность колебаний СВЧ-сигналов сохранялась вплоть до последнего периода при длительности импульса на полувывоте, равной 16 ns.

## Заключение

Численное моделирование и эксперименты убедительно показали, что ДГ способен жестко навязывать фазу колебаний генератора. Мы назвали это явление „эффектом стабилизации фазы“.

Начальная фаза колебаний генераторов, способных генерировать импульсное СВЧ-излучение мощностью несколько десятков ватт, например, с использованием генераторных диодов типа 3A762, может быть стабильной и при достаточно длинных фронтах модулирующего импульса по отношению к периоду СВЧ-колебаний. Как показали результаты численного моделирования, регулярное образование домена сильного поля при переходе ДГ в режим отрицательного дифференциального сопротивления у катода и его движение под действием прикладываемого напряжения в сторону анода приводят к тому, что СВЧ-колебания возбуждаются всегда с одной и той же начальной фазой. При этом амплитуда колебаний уже с первого периода начинает значительно превышать амплитуду возможных внутренних шумов ДГ, обусловленных известными механизмами [17]. Это означает, что шумовые колебания не оказывают заметного влияния ни на момент возбуждения колебаний, ни на их начальную

фазу. Поэтому стабильность фазы будет определяться только стабильностью параметров модулирующего импульса напряжения на ДГ. Стандартное отклонение  $\sigma_t$  времени задержки выделенной фазы СВЧ-колебаний относительно фиксированной точки фронта импульса напряжения на ДГ, обусловленное нестабильностью амплитуды импульса, уменьшается с ростом  $dU_{GD}/dt$  вследствие уменьшения разброса момента старта СВЧ-колебаний в ДГ. Минимально измеренное значение  $\sigma_t$  в наших экспериментах составило 0.8 ps, что соответствует  $\sigma_\phi = 2.9^\circ$ . Типичные значения  $\sigma_t$ , измеренные в настоящей работе, не превышают 2.5 ps. Это вполне удовлетворяет критерию фазовой нестабильности источника излучения для построения активных фазированных антенных решеток [19].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 12-08-31171-мол\_a и № 11-08-00041-а.

## Список литературы

- [1] Радиотехнические устройства СВЧ на синхронизированных генераторах / Под ред. Н.Н. Фомина. М.: Радио и связь, 1991. 192 с.
- [2] Касаткин Л.В. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2006. Т. 49. № 4. С. 38–45.
- [3] Бадулин Н.Н., Бацула А.П., Губанов В.П. и др. // ПТЭ. 1998. № 6. С. 111–114.
- [4] Вдовин В.А., Кулагин В.В., Митрофанов Е.В. и др. // Журн. радиоэлектрон. 2012. № 12. С. 1–15.
- [5] Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канашенкова. М.: Радиотехника, 2004. С. 11–31.
- [6] Введенский В.Ю., Андриянов А.В., Ермилов Э.А. // ПТЭ. 1975. № 1. С. 114–115.
- [7] Введенский В.Ю., Сюваткин В.С. // Радиотехн. и электрон. 1981. № 3. С. 664–665.
- [8] Введенский В.Ю., Зуев А.Б., Каримбаев Д.Д. и др. // ПТЭ. 1985. № 3. С. 123–125.
- [9] Введенский В.Ю., Сюваткин В.С., Хрусталева А.А. // Радиотехн. и электрон. 1985. № 10. С. 2063–2064.
- [10] Конев Ю.В., Губанов В.П., Климов А.И. и др. // ПТЭ. 2011. № 6. С. 37–40.
- [11] Левинштейн М.Е., Пожела Ю.К., Шур М.С. Эффект Ганна. М.: Сов. радио, 1975. 288 с.
- [12] Домрачев С.И., Кузнецов А.А. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 4. С. 58–62.
- [13] Микроэлектронные устройства СВЧ / Под ред. Г.И. Веселова. М.: Высш. шк., 1988. С. 124–160.
- [14] Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. С. 594.
- [15] Ruch J.G., Kino G.S. // Phys. Rev. E. 1969. Vol. 174. N 3. P. 921–931.
- [16] Губанов В.П., Климов А.И., Ковальчук О.Б. и др. // ПТЭ. 2010. № 5. С. 95–98.
- [17] Конев В.Ю., Климов А.И., Ковальчук О.Б. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 21. С. 45–51.
- [18] Конев В.Ю. Отчет по проекту РФФИ № 12-08-31171-мол\_a за 2012 г.
- [19] Хаус М., Морган Д. Полупроводниковые приборы в схемах СВЧ. М.: Мир, 1979. 444 с.