

13

## Эффект стабилизации фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов Ганна

© В.Ю. Конев, А.И. Климов, О.Б. Ковальчук, В.П. Губанов,  
В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Н.А. Торхов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: honour@vtomske.ru

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: kozyrev@to.hcei.tsc.ru

Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов, Томск

E-mail: trkf@mail.ru

Поступило в Редакцию 18 июля 2013 г.

Исследуется эффект влияния полупроводниковой структуры генераторного диода на стабилизацию фазы СВЧ-колебаний наносекундного генератора Ганна фронтом импульса модулирующего напряжения. Методом численного моделирования определены отклонения фазы в зависимости от разброса длительности фронта и амплитуды импульса. Выполнены измерения стандартного отклонения времени задержки фазы СВЧ-колебаний генератора относительно фиксированного уровня на фронте модулирующего импульса и стандартное отклонение разности фаз СВЧ-колебаний двух электродинамически развязанных генераторов, подключенных параллельно к одному модулятору.

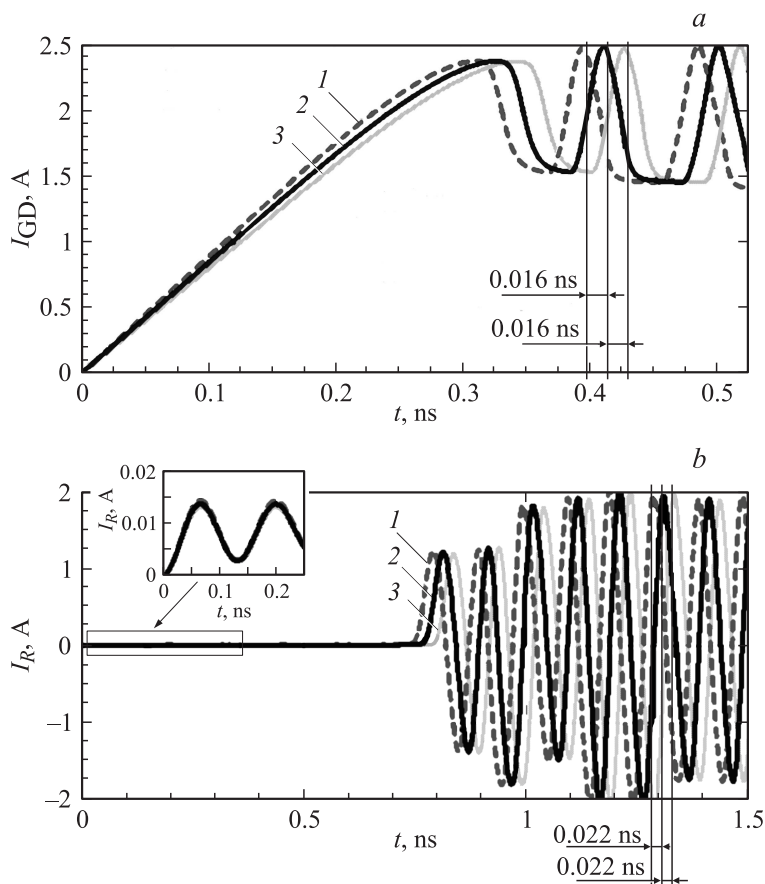
Задача синхронизации СВЧ-генераторов является актуальной на протяжении десятилетий [1,2]. Существенный интерес представляет метод, использованный в работах [3,4], где фиксация фазы наносекундного автогенератора на диоде Ганна (АДГ) трехсантиметрового диапазона милливаттной мощности осуществлялась импульсом модулирующего напряжения с достаточно крутым (порядка периода колебаний) фронтом. При этом эффект фиксации фазы объяснялся наличием всплеска тока в цепи диода Ганна (ДГ), приводящего к „ударному возбуждению“ резонаторной камеры генератора. Однако в [5] была показана возможность фиксации фазы наносекундных АДГ трехсантиметрового диапазона с мощностью порядка 30 W при длительности фронта импульса напряжения около 4 ns, существенно превышающей

период СВЧ-колебаний. В связи с этим в данной работе в численном моделировании и экспериментально исследована возможность фиксации фазы с учетом свойств самой полупроводниковой структуры ДГ.

Численный анализ электронных процессов в диоде Ганна (ДГ) выполнялся на основе локально-полевой (ЛП) модели [6]. В расчетах использовался профиль легирования с однородной концентрацией доноров  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Исследовались однослойная и двухслойная полупроводниковые структуры. Диаметр и длина однослойной полупроводниковой структуры равнялись 300 и  $12.5 \mu\text{m}$  соответственно. Домен инициировался за счет наличия области длиной  $0.6 \mu\text{m}$  на расстоянии  $0.6 \mu\text{m}$  от катода с уменьшенной до  $0.9 \cdot 10^{15} \mu\text{m}^{-3}$  концентрацией доноров. Для зависимости скорости электронов от напряженности электрического поля использовалась известная [6] аппроксимация, в которой подвижность электронов принималась равной  $8000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , а дрейфовая скорость, соответствующая насыщению характеристики при большом ( $4000 \text{ V/cm}$ ) поле —  $10^7 \text{ cm/s}$ . Коэффициент диффузии аналогично [6] считался постоянным и принимался равным  $200 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Исходный моделирующий импульс напряжения задавался в виде равнобедренной трапеции амплитудой  $20 \text{ V}$ , длительностью по основанию  $5 \text{ ns}$ , длительностью фронта  $t_f$  и среза, равными  $1 \text{ ns}$ . Моделирование выполнялось в среде MATLAB R2012b (номер 851653).

На первом этапе выполнялось моделирование простейшего АДГ, включающего последовательно соединенные диод Ганна, источник напряжения и ограничительное сопротивление  $1 \Omega$ . На рис. 1, а приведены расчетные зависимости тока в ДГ от времени при различных длительностях линейно нарастающего фронта импульса напряжения. Вариация длительности фронта импульса напряжения в пределах  $\pm 0.050 \text{ ns}$  приводит к вариации времени запаздывания начальной фазы колебаний лишь в пределах  $\pm 0.016 \text{ ns}$ , что свидетельствует об определенной стабилизации начальной фазы.

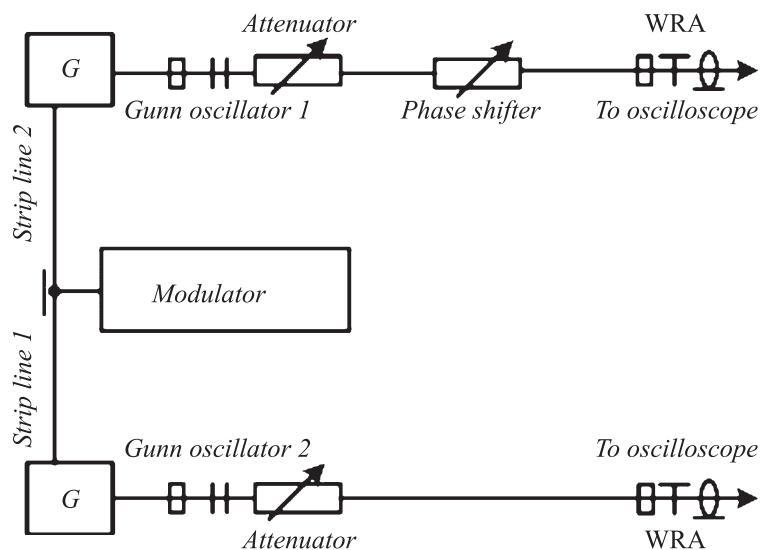
На втором этапе моделирования диод Ганна был включен в эквивалентную схему, замещающую волноводную конструкцию резонаторной камеры реального генератора [7]. Для учета влияния электрического поля СВЧ-резонатора на процессы в полупроводниковой структуре генераторного диода эквивалентная электрическая цепь содержала колебательный контур с активной нагрузкой и дополнительные элементы, учитывающие особенности конструкции АДГ. Нагрузка имитировала отбор мощности из резонатора. Параметры эквивалентной схемы вы-



**Рис. 1.** Расчетные зависимости тока ДГ от времени для АДГ в схеме с резистивной нагрузкой (*a*) и тока в активной нагрузке в схеме с колебательным контуром (*b*) при различной длительности фронта импульса напряжения  $t_f$ , ns: 1 — 0.95, 2 — 1, 3 — 1.05.

бирались такими, чтобы на нагрузке возбуждались СВЧ-колебания с несущей частотой 10 GHz [7].

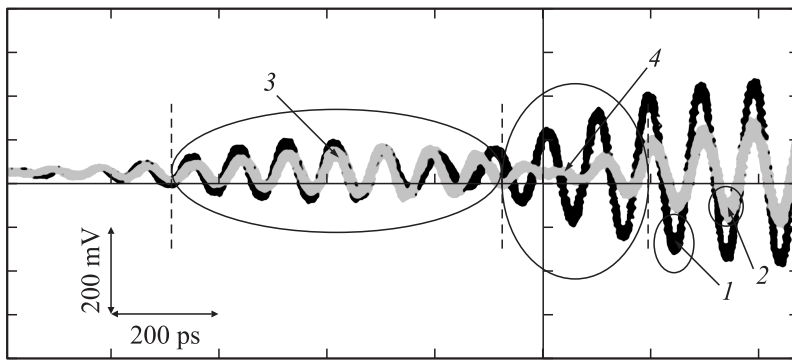
На рис. 1, *b* приведены расчетные зависимости тока в нагрузке эквивалентной цепи АДГ. При том же разбросе длительности фронта



**Рис. 2.** Схема измерений стандартного отклонения разности фаз СВЧ-колебаний двух наносекундных АДГ.

напряжения модулятора наблюдается чуть больший разброс фазы колебания в нагрузке  $\Delta t_{phase} = \pm 0.022$  ns. Увеличение разброса фазы по сравнению со схемой с резистивной нагрузкой обусловлено тем, что в эквивалентной схеме с колебательным контуром фронт импульса напряжения на ДГ более пологий.

Расчеты показали, что во всех исследуемых случаях фаза СВЧ-колебаний определяется переходом полупроводниковой структуры ДГ в режим отрицательного дифференциального сопротивления по мере роста напряжения модулирующего импульса на его фронте. В результате наблюдаемый разброс фазы определяется нестабильностью фронта и амплитуды импульса, а сам ДГ дает стабильную фазу при возбуждении колебательного процесса. Эффект стабилизации фазы в цепи, учитывающей резонансную систему, также имеет место, причем это наблюдается на фоне ударного возбуждения тока в колебательном контуре, которое продемонстрировано в квадратной выноске на рис. 1, *b*.



**Рис. 3.** Выборка из 2500 осциллограмм СВЧ-колебаний, зарегистрированных по схеме измерений, приведенных на рис. 2: 1 — АДГ № 1, 2 — АДГ № 2.

Эксперименты выполнялись с генераторами на диодах типа 3A762. Частота генерации равнялась 10 GHz. Измерения нестабильности фазы методом временных интервалов выполнялись с осциллографом LeCroy WaveMaster 830Zi. Результаты измерений, в которых была реализована минимальная нестабильность фазы, существенно образом зависели от выбора оптимального уровня напряжения запуска осциллографа на фронте модулирующего импульса, а также выбора рабочей полосы канала его регистрации. В экспериментах рабочая полоса канала регистрации модулирующего импульса была 1 GHz, а каждого из каналов регистрации СВЧ-сигнала — 13 GHz. Напряжение запуска осциллографа было около 500 mV.

Исследовалось синхронное возбуждение СВЧ-колебаний двух наносекундных генераторов с пиковой мощностью  $\sim 30$  W, которые питались 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 проводились по схеме, показанной на рис. 2, аналогичной той, что была в работе [5]. Длительность фронта модулирующего импульса на каждом из АДГ составила 6.4 ns.

На рис. 3 показаны синхронизированные осциллограммы радиосигналов двух АДГ, подключенных параллельно к одному источни-

ку модулирующих импульсов посредством полосковых линий. Зарегистрированные осциллограммы демонстрируют независимость фазы СВЧ-колебаний, которые появляются вследствие „ударного возбуждения“ колебательного контура на временном интервале 3, и фазы СВЧ-колебаний, нарастающих на интервале 4 в результате перехода полупроводниковых структур ДГ в область отрицательного дифференциального сопротивления. Хотя сигнал 2 имеет некоторый сбой фазы, тем не менее через несколько периодов фазы сигналов 1 и 2 выравниваются. Осциллограммы не изменялись при поочередном отключении АДГ. Таким образом, взаимная синхронизация генераторов исключается. Синфазность колебаний СВЧ-сигналов сохранялась вплоть до последнего периода при длительности импульса на полувывоте, равной 16 ns.

Полученные экспериментальные результаты находятся в качественном соответствии с изложенными выше результатами численного моделирования. В выполненных экспериментах не удалось обнаружить влияние шумов полупроводниковой структуры, способных повлиять на начальную фазу СВЧ-колебаний. Заметно выраженными оказались лишь колебания, возникающие в результате „ударного возбуждения“ резонансной системы АДГ. Однако, как показали эксперименты, влияние самой полупроводниковой структуры на установление фазы оказывается существенно сильнее. Этот вывод об определяющем влиянии полупроводниковой структуры ДГ на начальную фазу колебания вытекает из приблизительной оценки длительности формирования фазы колебания в ДГ, которая равна времени формирования в полупроводниковой структуре домена сильного поля [6]. Это время на основе результатов моделирования по порядку величины равно отношению характерной длины домена ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ) к скорости его дрейфа ( $\sim 10^7 \text{ cm/s}$ ), т. е. имеет порядок 10 ps, что существенно короче периода СВЧ-колебаний.

Таким образом, начальная фаза колебаний АДГ, способных генерировать импульсное СВЧ-излучение мощностью несколько десятков ватт, например с использованием генераторных диодов типа 3A762, может быть стабильной даже при существенно более длинных фронтах модулирующего импульса по отношению к периоду СВЧ-колебаний.

Типичные значения стандартного отклонения фазы СВЧ-колебаний, измеренные в наших экспериментах, не превышают 2.5 ps, что вполне удовлетворяет критерию фазовой стабильности источника излучения для построения активных фазированных решеток.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты РФФИ № 12-08-31171-мол\_а и 11-08-00041-а.

## Список литературы

- [1] Радиотехнические устройства СВЧ на синхронизованных генераторах / Под ред. Н.Н. Фомина. М.: Радио и связь, 1991. 192 с.
- [2] *Ельчанинов А.А., Климов А.И., Ковальчук О.Б.* и др. // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 1. С. 125–130.
- [3] *Введенский В.Ю., Андриянов А.В., Ермилов Э.А.* // ПТЭ. 1975. № 1. С. 114–115.
- [4] *Введенский В.Ю., Сюваткин В.С., Хрусталеv А.А.* // РЭ. 1985. Т. 30. № 10. С. 2063–2064.
- [5] *Конев Ю.В., Губанов В.П., Климов А.И.* и др. // ПТЭ. 2011. № 6. С. 37–40.
- [6] *Веселов Г.И., Егоров Е.Н., Алехин Ю.Н.* и др. Микроэлектронные устройства СВЧ. М.: Высш. школа, 1988. С. 124–160.
- [7] *Губанов В.П., Климов А.И., Ковальчук О.Б.* и др. // ПТЭ. 2010. № 5. С. 95–98.

4\* Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 21