

К. т. н. Н. Ф. КАРУШКИН

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»

E-mail: orion@ri-orion.kiev.ua

СИНХРОНИЗАЦИЯ ГЕНЕРАТОРОВ НА ЛПД ИМПУЛЬСНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ В ММ-ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН.

Часть 2. Стабилизация СВЧ-параметров синхронизированных генераторов

Представлена вторая часть работы, посвященной обобщению результатов, которые достигнуты на данный момент при разработке синхронизированных генераторов на лавинно-пролетных диодах (ЛПД). В статье рассмотрены методы токовой компенсации температурных изменений проводимости кремниевых ЛПД и предварительного импульсного подогрева диода, обеспечивающие постоянство температуры в начале каждого импульса. Их использование позволяет создавать высокостабильные по частоте синхронизированные генераторы на кремниевых двухдрейфовых ЛПД с уровнем выходной мощности от 20 до 150 Вт. Приведены конструкции и параметры когерентных источников СВЧ-мощности при использовании нелинейных свойств ЛПД в режиме радиоимпульсного преобразования низкочастотного сигнала в высокочастотный с коэффициентом более 15.

Ключевые слова: диапазон миллиметровых волн, синхронизация, преобразователь частоты, генератор, лавинно-пролетный диод.

Существенными особенностями мощных импульсных генераторов на лавинно-пролетных диодах (ЛПД), работающих со значительными плотностями тока питания диодов, являются приближение собственной частоты лавинного резонанса диода к рабочей частоте генератора и нестационарность теплового режима диода в пределах длительности импульса тока питания. Указанные особенности приводят к значительным изменениям импеданса полупроводниковой структуры в пределах длительности импульса и в результате — к нестабильности амплитуды и фазы выходного сигнала. Наиболее сильно нестабильность СВЧ-параметров проявляется при низкой температуре окружающей среды, в частности, в области переднего фронта импульса тока питания диода. Значительно уменьшить нестабильность СВЧ-параметров позволяет так называемый метод токовой компенсации температурных изменений проводимости ЛПД наряду с дополнительным подогревом полупроводниковой структуры, при котором начальная температура диода в области переднего фронта каждого импульса остается практически постоянной, не зависящей от температуры окружающей среды T_0 .

Настоящая работа, состоящая из двух статей, посвящена обзору результатов, достигнутых на сегодняшний день в области разработки синхронизированных генераторов на лавинно-пролетных диодах. В [1] были рассмотрены электродинамические конструкции генераторов, синхронизируемых внешним

источником СВЧ-колебаний. Данная статья посвящена синхронизированным генераторам импульсного действия с выходной мощностью 20—150 Вт. Здесь приводятся результаты рассмотрения совместного действия методов токовой компенсации и дополнительного подогрева для стабилизации параметров ЛПД, а именно:

— обсуждается целесообразная схема выполнения дополнительного импульсного подогрева, отличающаяся малой инерционностью и низким энергопотреблением;

— рассматриваются достигнутые характеристики стабильности импульсных ЛПД в режиме внешней синхронизации.

Стабилизация СВЧ-параметров синхронизированных генераторов импульсного действия

Выбор в качестве активного элемента кремниевых ЛПД для создания источников мощности импульсного действия определяется тем, что при его использовании реализуются наибольшие уровни СВЧ-мощности, превышающие 30 Вт в 8-мм и 10 Вт в 3-мм диапазонах при скважности более 100 и длительности импульса СВЧ выходного сигнала не более 300 нс. Эти уровни примерно на порядок выше, чем у наиболее эффективных транзисторов НЕМТ, РНЕМТ.

Особенностью работы генераторов импульсного действия является изменение частоты в пределах

СВЧ-импульса вследствие изменения температуры, что приводит к изменению импеданса и, следовательно, к изменению фазы по отношению к синхронизирующему сигналу. В этом случае нарушаются фазовые соотношения сигналов (явление фазовой модуляции). Уменьшение фазовой модуляции или ее полное исключение (что требуется для создания когерентных передатчиков) обеспечивается путем применения токовой компенсации, т. е. при использовании импульса тока управления специальной формы, при которой исключается или существенно уменьшается изменение частоты в пределах импульса.

При разработке мощных импульсных генераторов миллиметрового диапазона длины волны необходимо учитывать ряд других особенностей:

— поскольку диод работает при токе высокой плотности ($j_{\text{имп}} \approx 40 \text{ кА/см}^2$), собственная частота ЛПД (частота последовательного резонанса) приближается к рабочей частоте, что увеличивает критическую чувствительность параметров к изменениям режима электрического питания, температуры окружающей среды и параметров нагрузки [2];

— значительное увеличение омических потерь генератора, соизмеримых с величиной модуля отрицательного сопротивления полупроводниковой структуры в режиме большого сигнала.

Определение достижимых характеристик генератора требует выбора температурного режима диода в зависимости от его геометрии и параметров импульсного питания. В [3—5] определение температурных характеристик диода проводится на основе приближенного аналитического подхода. Для установления связи между подводимой мощностью P_0 и рабочей температурой T_{pn} вводится понятие теплового сопротивления R_{τ} , которое прямо пропорционально среднему перепаду температуры $\Delta T_{\text{ср}} = T_{pn} - T_0$, возникающему на теплоотводящей поверхности диодной структуры:

$$P_0 = \Delta T_{\text{ср}} / R_{\tau}$$

Общее тепловое сопротивление $R_{\tau\Sigma}$ можно рассматривать как сумму теплового сопротивления растекания $R_{\tau\Sigma}$ и продольного теплового сопротивления $R_{\tau\text{пр}}$ [4]:

$$R_{\tau\Sigma} = R_{\tau\Sigma} + R_{\tau\text{пр}},$$

$$\text{где } R_{\tau\Sigma} = \frac{1}{2d_{pn}K};$$

$$R_{\tau\text{пр}} = \sum_i^n \frac{l_i / K_i}{\pi d_i^2 / 4};$$

K — коэффициент теплопроводности материала теплоотвода;

K_i — коэффициент теплопроводности i -слоя структуры ЛПД диаметром d_i и толщиной l_i .

Анализ тепловых характеристик ЛПД для среднего и переменного потока мощности, выбор конструкции импульсных ЛПД в режиме коротких импульсов выполнены в [6]. В длинном импульсном режиме работы ЛПД, когда длительность импульса равна или превышает время тепловой релаксации полупроводниковой структуры, значение R_{τ} определяется соотношением, полученным в [7]. На **рис. 1** приведена зависимость переходного теплового сопротивления полупроводниковой кремниевой двухпролетной структуры ЛПД диаметром $d_{pn} = 150 \text{ мкм}$ от величины скважности Q импульса тока питания при различной их длительности. Перегрев полупроводниковой структуры в пределах длительности импульса 300—400 нс составляет 250—300°C при токе питания, соответствующем режиму максимальной СВЧ-мощности.

При длительности импульсов тока питания, значительно меньших времени поперечной тепловой релаксации, и большой их скважности нагрев полупроводниковой структуры потоком средней мощности несущественен.

Разогрев полупроводниковой структуры в пределах длительности импульса тока питания диода приводит к изменениям импедансных характеристик структуры ЛПД и в результате этого — к явлениям внутриимпульсной нестационарности СВЧ-характеристик импульсных генераторов. На **рис. 2** приведены значения импеданса z_d двухпролетного ЛПД диапазона частот примерно 40 ГГц с оптимальным профилем легирования, рассчитанные для плотности тока питания $j_0 = 18 \text{ кА/см}^2$, при амплитуде напряжения сигнала $U_m = 3—26 \text{ В}$ для трех значений максимальной температуры θ_m [2]. Видно, что при $\theta_m < 390 \text{ К}$ и напряжении на диоде $U_m < 10 \text{ В}$ частота лавинного резонанса ω_d становится больше рабочей

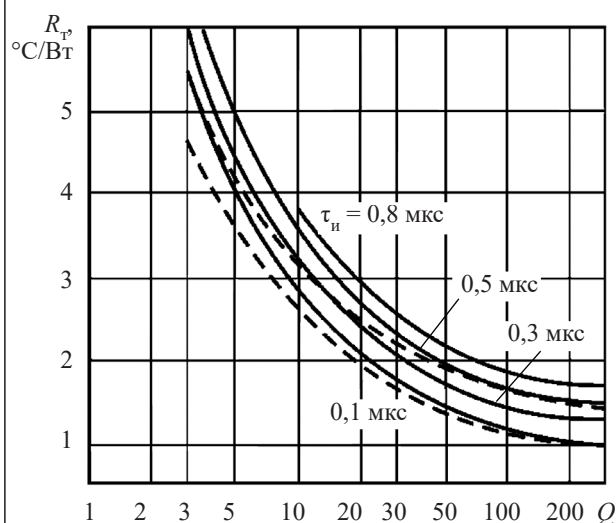


Рис. 1. Зависимость переходного теплового сопротивления ЛПД от скважности импульса тока питания при различной их длительности τ_i (пунктирные линии — расчет, сплошные — эксперимент)

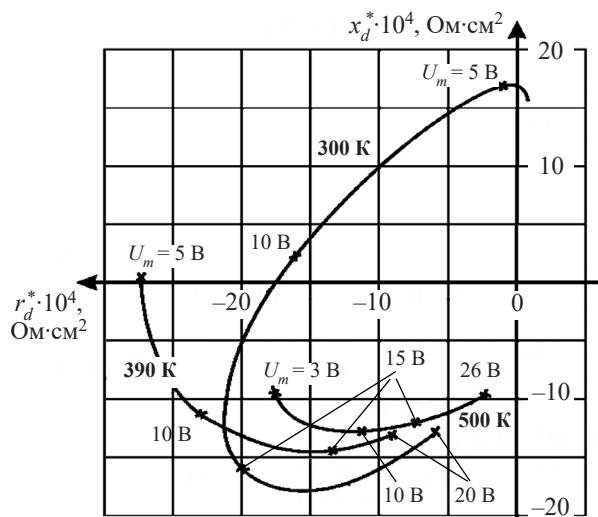


Рис. 2. Величина импеданса $z_d = r_d + x_d$ кремниевого двухпролетного диода, рассчитанная для трех значениях температуры полупроводниковой структуры θ : 300, 390, 500 K при различных значениях амплитуды U_m напряжения сигнала

частоты ω_p , вследствие чего реактивное сопротивление диода изменяет свой знак и становится индуктивным; при $\theta_m \leq 300$ K и $U_m \leq 5$ В модуль отрицательного сопротивления уменьшается. В области больших сигналов ($U_m > 15$ В) зависимость импеданса диода от температуры существенно снижается, однако модули отрицательного сопротивления в этой области уменьшаются до величин, соизмеримых с сопротивлением потерь в СВЧ-цепи. В связи с этим оптимизация генератора по энергетическим характеристикам приводит к необходимости максимального уменьшения сопротивления растекания диода r_s , оптимизации диаметра его структуры и применения трансформации импеданса ЛПД [2]. Фактически это те же требования, которые предъявляются к ЛПД непрерывного действия. При этом, однако, в импульсном режиме оптимальный диаметр структуры оказывается существенно зависимым от параметров импульсного режима питания.

Изменение теплового режима диода в пределах импульсного тока питания приводит к значительным изменениям импеданса полупроводниковой структуры в интервале изменения температуры окружающей среды и к нестабильности амплитуды и фазы выходного сигнала. Наиболее сильно нестабильность СВЧ-параметров проявляется при низкой температуре окружающей среды в области переднего фронта импульса.

Известный метод стабилизации СВЧ-параметров генератора, так называемый метод токовой компенсации температурных изменений проводимости ЛПД [8–10], позволяет значительно уменьшить нестабильность СВЧ-параметров. Этот метод заключается в изменении амплитуды импульсного тока во времени $j_0(t) = \delta I(t)$, при котором в условиях разогре-

ва полупроводниковой структуры до температуры $\theta_0(t) = \theta_0 + \delta\theta(t)$ частота лавинного резонанса ЛПД остается неизменной. Однако при его использовании полная компенсация (особенно при низкой температуре) не достигается, и можно говорить лишь о минимизации этих изменений.

Очевидным альтернативным путем стабилизации СВЧ-параметров является введение дополнительного подогрева полупроводниковой структуры, при котором начальная температура θ_0 диода в области переднего фронта каждого импульса остается практически постоянной, не зависящей от температуры окружающей среды. При этом в пределах длительности импульса стабилизация параметров генератора достигается применением токовой компенсации. Совместное применение токовой компенсации и дополнительного подогрева обеспечивает наибольшую реализуемую стабильность параметров генератора [11, 12].

Принцип действия рассматриваемой системы стабилизации СВЧ-параметров генератора на ЛПД иллюстрируется эпюрами токов и напряжений, представленными на рис. 3. На этом рисунке приведены временные зависимости, построенные с постоян-

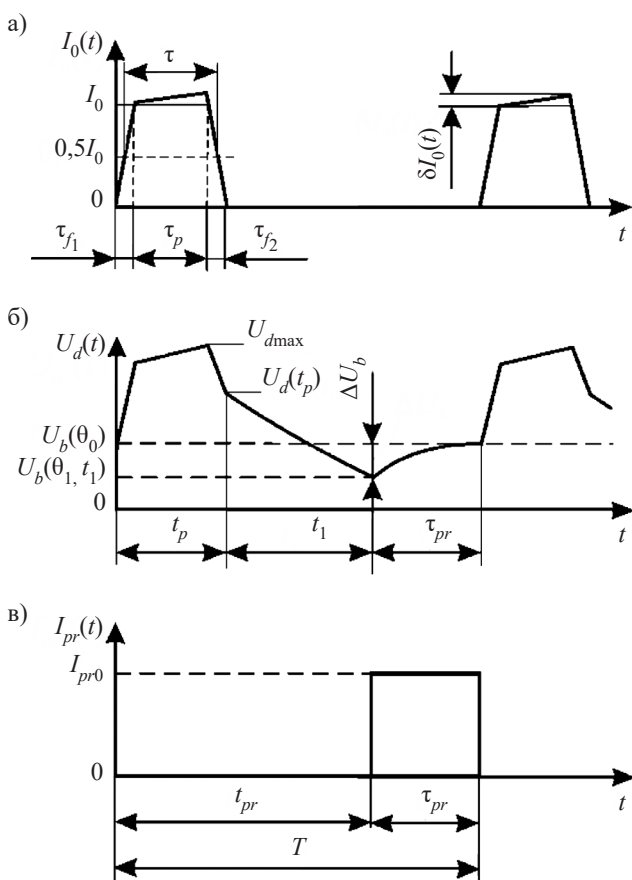


Рис. 3. Временные зависимости импульсного тока питания ЛПД (а), напряжения на диоде (б) и тока подогрева (в) для стабилизации СВЧ-параметров генератора при периодической импульсной модуляции

ным периодом повторения импульсов T и длительностью t_p . Предполагается, что температура окружающей среды, температура корпуса генератора и теплоотвода ЛПД θ_k меньше температуры θ_0 , которую должна иметь полупроводниковая структура в начале импульса тока питания $I_0(t) = I_0 + \delta I_0(t)$. В пределах длительности импульса t_p ток питания изменяется в соответствии с принципом токовой компенсации, а напряжение $U_d(t)$ на диоде — от $U_{d0}(t) = U_b(\theta_0)$ до $U_{d\max}(t) = U_b(\theta_0) + I_0(t) \cdot r_d + \beta U_b(\theta_0) \cdot \delta \theta_{\max}$. После окончания импульса тока $I_0(t)$ в момент времени $t_p = \tau_p + \tau_{f1} + \tau_{f2}$ на диоде устанавливается напряжение $U_d(t_p) \approx U_b(\theta_0) \cdot (1 + \beta \cdot \delta \theta_{\max})$.

Через временной интервал t_1 на диоде устанавливается температура θ_1 и соответствующее этой температуре напряжение лавинного пробоя $U_b(t_1, \theta_1)$, величина которого меньше величины начального напряжения $U_b(\theta_0)$. В этот момент времени, $t_{pr} = t_p + t_1$, включается ток импульсного подогрева I_{pr} , амплитуда которого пропорциональна величине $\Delta U_b = U_b(\theta_0) - U_b(t_1, \theta_1)$, т. е. $I_{pr} = k \Delta U_b$. Продолжительность импульса подогрева t_{pr} и величина k выбраны такими, чтобы в конце импульса подогрева напряжение лавинного пробоя становилось равным $U_b(\theta_0)$, т. е. температура полупроводника — равной заданной температуре θ_0 .

С учетом приведенных результатов могут быть определены достижимые характеристики стабильности СВЧ-параметров синхронизированных ГЛПД в полосе частот синхронной работы. Приведенные в [13] расчеты динамических и стабилизированных характеристик выполнены для ГЛПД 8-мм диапазона волн на основе волноводно-коаксиальной конструкции (рис. 4). Конструкция содержит металлодиэлектрический корпус диода и обеспечивает резонансную трансформацию импеданса диода и нагрузки при высоком КПД.

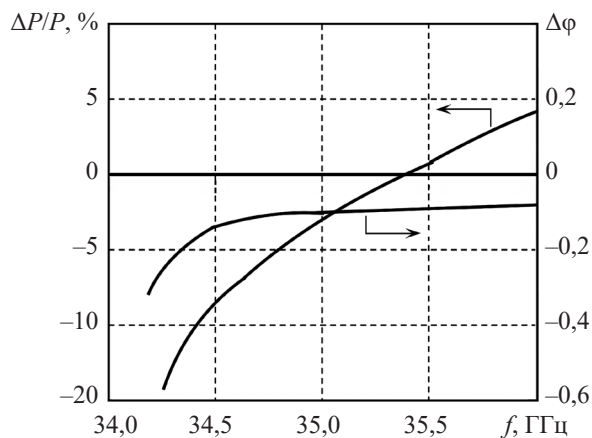


Рис. 4. Частотные зависимости нестабильности мощности $\Delta P/P$ выходного сигнала и фазы $\Delta \phi(f)$, полученные при применении токовой компенсации в условиях изменения температуры в интервале 390...500 К

На рис. 4 приведены частотные зависимости нестабильности фазы $\Delta \phi(f)$ и мощности $\Delta P/P$ выходного сигнала при изменении температуры в интервале 390—500 К и выполнении условий токовой компенсации. В интервале температуры 500—570 К величины нестабильности фазы и мощности уменьшаются в 5—6 раз по сравнению с указаниями значениями на рис. 4. При этом полная полоса синхронизации составляет $\Delta f_n \approx 2$ ГГц. Вблизи низкочастотной границы полосы синхронизации нестабильность СВЧ-параметров существенно возрастает, и наибольшие значения Δf и ΔP достигаются там, где величина θ минимальна. Следует отметить, что при отсутствии предварительного подогрева полупроводниковой структуры нестабильность СВЧ-параметров существенно выше.

Применение токовой компенсации температурных изменений импеданса ЛПД не устраняет полностью частотную и амплитудную внутриимпульсную модуляцию выходного сигнала генератора, но значительно ее уменьшает. Для достижения более высокой частотной стабильности можно применять стабилизирующий резонатор, при этом полоса его частот должна превышать ширину спектра импульсного сигнала. Конструкция генератора основана на включении резонатора в реактивную отражающую цепь схемы. В конструкции на рис. 5 применяется резонатор цилиндрического типа 1, возбуждаемый на волне типа H_{011} и перестраиваемый поршнем. Резонатор связан с волноводной секцией 4 щелью связи 2. Волноводно-коаксиальная секция содержит ЛПД 5 и антипаразитную нагрузку 3.

Принцип работы импульсного генератора такой же, как и у стабилизированного генератора непрерывного действия, однако в импульсном режиме имеется ряд особенностей. В режиме стабилизации частоты импульсного автогенератора из-за инерционности теплового режима возможна частотная синхронизация сигнала стабилизирующим резонатором. При недостаточно быстром нарастании тока питания возникают паразитные колебания на частотах побочных ко-

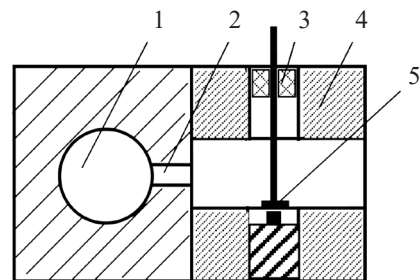


Рис. 5. Эскиз конструкции стабилизированного импульсного генератора на ЛПД:

1 — резонатор; 2 — щель связи; 3 — антипаразитная нагрузка; 4 — волноводная секция; 5 — ЛПД

лебательных контуров, образуемых неоднородностями в высокочастотной цепи генератора, и их подавление достигается уменьшением длительности фронта импульсного тока. Также можно применять на выходе генератора быстродействующий модулятор, который гасит эти колебания.

Результаты разработок когерентных передающих устройств

Принцип построения передающих устройств основан на применении генераторов, усилителей и сумматоров мощности на ЛПД, действующих в режиме внешней синхронизации сигналом, который формируется синтезатором частоты либо высокочастотным источником частоты, обеспечивающим высокую стабильность, низкий уровень спектральной мощности фазового шума и переключение парциальных частот выходного сигнала в широком диапазоне частот (свыше 1 ГГц). Большое количество имеющихся теоретических и экспериментальных работ позволило определить основные принципы построения сумматоров мощности на полупроводниковых активных элементах. Большинство известных сумматоров мощности базируется на применении режима взаимной синхронизации отдельных источников и режима синхронизации сигналом внешнего источника. По принципу построения и характеру внешней полезной нагрузки сумматоры разделяются на два основных класса:

- системы суммирования мощностей СВЧ в пространстве;
- системы суммирования мощностей в локализованных нагрузках линий передачи.

На основе сумматоров мощностей первого класса получили широкое распространение антенные фазированные решетки, полигенераторы, излучатели, в которых отдельные источники излучения размещены на некоторой общей излучающей поверхности [14, 15]. К сумматорам мощностей независимых источников относятся, прежде всего, системы, выполненные с использованием мостовых схем, многополюсников, ответвителей, а также сумматоры, в которых отдельные активные элементы монтируются на общем теплоотводе и суммирование мощности осуществляется в общем синхронизирующем контуре в режиме внешней синхронизации [7, 16—20].

На рис. 6 представлена схема четырехзвенного передатчика 8-миллиметрового диапазона длины волны с выходной импульсной мощностью 100 Вт. Первые две ступени выполнены как однодиодные усилители с усилением 16—17 дБ на ступень, предоконечная и оконечная ступени (сумматоры мощностей) выполнены на двух ЛПД в каждой ступени. Опорная частота сигнала (ОП) формируется синтезатором частоты и подается на вход синхронизатора, размещенного в передатчике. Синхронизатор вырабатывает импульсы запуска передатчика. КПД суммирования мощностей передатчика достигает 90%. Задача эффективного суммирования решается как при установке нескольких ЛПД в единой электродинамической системе, так и при каскадном включении ЛПД. Существенное увеличение КПД суммирования достигается применением резонансной трансформации импеданса полупроводниковой структуры, созданием параллельного резонансного контура с помощью элементов металлодиэлектрического корпуса ЛПД,

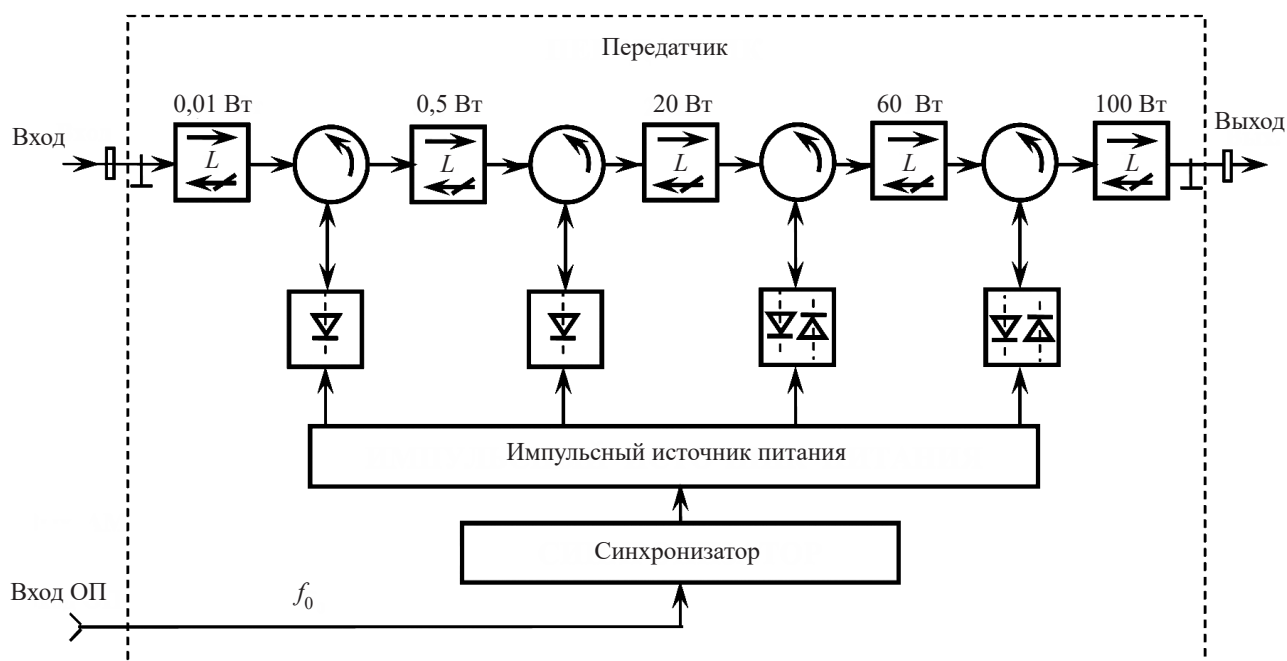


Рис. 6. Структурная схема передатчика 8-миллиметрового диапазона с выходной мощностью больше 100 Вт

применением антипаразитных нагрузок в сумматорах мощностей с минимальными величинами сопротивлений, достаточными для подавления паразитных колебаний, обеспечением согласования импедансов диода и нагрузки с учетом уровня синхронизирующего сигнала [21]. Значительное расширение полосы синхронизации достигается включением компенсирующих реактивных сопротивлений последовательно с параллельным резонансным корпусом корпусированного ЛПД при максимально достижимом снижении его добротности [22].

Высокая стабильность СВЧ-параметров достигается применением метода электронной компенсации изменения импедансов полупроводниковых структур при изменении температуры в пределах длительности импульса или в пакете импульсов, а также применением метода импульсной и непрерывной стабилизации температуры полупроводниковой структуры диода в широком интервале рабочих температур при минимальной величине потребляемой для этой цели мощности. При создании передатчиков в 8-мм диапазоне применяются кремниевые двухпролетные ЛПД с уровнем импульсной мощности свыше 25 Вт при длительности импульса 100—300 нс и минимальной скважности 200 [23].

Каскадное суммирование мощностей представляет значительный интерес в миллиметровом диапазоне, когда размещение большого числа диодов в единой электродинамической системе затруднено из-за ее малых размеров. Вследствие малого коэффициента усиления (3—4 дБ) построение синхронизированного источника с малым уровнем выходного сигнала требует введения дополнительных ступеней синхронного усиления. Такие конструкции, обеспечивающие высокий уровень выходной мощности только на основе каскадного суммирования, в большинстве случаев оказываются нецелесообразными из-за большого числа ступеней усиления. В связи с этим разработаны и находят применение другие эффективные методы суммирования мощностей диодов [24].

Суммирование мощностей диодов в мостовых и разветвленных системах сводится к сложению мощностей самостоятельных источников СВЧ-колебаний в независимых электродинамических конструкциях, удовлетворяющих требованиям обеспечения суммирования двух и более источников с максимальным КПД суммирования в широком частотном диапазоне и обеспечению развязки источников друг от друга. Указанным требованиям удовлетворяют конструкции, решающие задачу сложения мощностей двух источников. Это трехдецибелные целевые мосты, Т-образные и кольцевые мосты. Анализ характеристик этих конструкций [25] показывает, что эффективность суммирования мало зависит от различия уровней мощности двух источников в пределах 3—5 дБ. Необходим весьма точный фазовый баланс

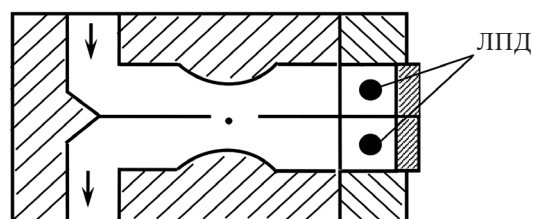


Рис. 7. Схема конструкции усилителя на ЛПД

источников в пределах до 30° . Указанные сумматоры мощностей двух источников могут быть включены в общую разветвленную систему суммирования. Системы такого типа при отсутствии потерь позволяют неограниченно увеличивать выходную мощность при увеличении числа суммируемых источников.

На рис. 7 представлена упрощенная схема конструкции усилителя импульсного действия, выполненного по схеме суммирования мощностей двух каскадов ЛПД с использованием трехдецибелного щелевого моста.

Синхронизированный усилитель работает в диапазоне частот 90—100 ГГц [26]. В рабочей полосе $f_0 \pm 0,5$ ГГц обеспечивается уровень выходного импульса мощности не менее 30 Вт при длительности импульсов 80—100 нс и частоте повторения 50 кГц. Для работы усилителя необходимы два источника постоянного напряжения — 49 В и 7 В, входной импульсный СВЧ-сигнал мощностью 10 Вт и внешний импульсный сигнал управления TTL-уровня.

В НИИ «Орион» (г. Киев) на базе миниатюрных щелевых мостов разработан синхронизированный усилитель, содержащий 10 каскадов ГЛПД на частоте 94 ГГц с выходной мощностью в импульсе более 100 Вт, длительностью СВЧ-импульсов 75—100 нс при частоте следования не более 50 кГц [26].

В миллиметровом диапазоне находит применение метод суммирования мощностей в единой электродинамической конструкции. В такой конструкции диоды устанавливаются на независимых теплоотводящих основаниях и включаются в высокочастотную цепь так, что их мощности складываются в общую нагрузку, автоколебательный режим при этом базируется на взаимной синхронизации сильно связанных между собой диодных генераторов. На основе сумматоров такого класса достигнуты значительные уровни мощностей передающих устройств как в непрерывном, так и в импульсном режимах работы [24].

В области частот 40—41 ГГц при суммировании мощностей 12 двухпролетных кремниевых ЛПД, установленных в резонаторе прямоугольного сечения, реализовано усиление непрерывной мощности свыше 10 Вт [27]. На частоте 91 ГГц при суммировании мощностей двухпролетных кремниевых ЛПД, установленных в резонаторе прямоугольного сечения, получен уровень мощности 40 Вт при скважности $\theta > 200$ и длительности импульса 100 нс [28].

Эффективным методом создания мощных СВЧ-устройств непрерывного и импульсного действия является суммирование мощностей диодов, установленных на общем теплоотводе. Этот метод суммирования основывается на создании мезаструктурных диодов и монтажом отдельных структур на общем теплоотводе при параллельном включении в СВЧ-цепь и цепь питания. Такой сумматор реализован путем установки полупроводниковых структур в единой радиальной линии под общей крышкой без применения отдельных проводников [29]. В рассматриваемой конструкции применена резонансная трансформация суммарного импеданса структур. Резонансный контур в конструкции создается включением практически ненагруженной радиальной линии $D > \lambda/2$ параллельно полупроводниковым структурам входной проводимости.

Сложение мощностей отдельных диодов может быть достигнуто применением суммирующего модуля, работающего на несимметричных азимутальных гармониках и содержащего синхронизирующий резонатор [30].

Суммирующий модуль, схема которого представлена на рис. 8, состоит из медного массивного основания 1, используемого как теплоотвод, верхняя часть которого имеет в центре выступ 6 в виде цилиндра. От него в радиальных направлениях расходятся четыре перегородки 8 металлического диска 3, расположенного на диэлектрической втулке 2, которая смонтирована на основании 1, установленного в волноводе 4. Питание к полупроводниковым диодам 7 подается через проводники 5. Размеры диска определяются рабочим диапазоном частот. Размеры диэлек-

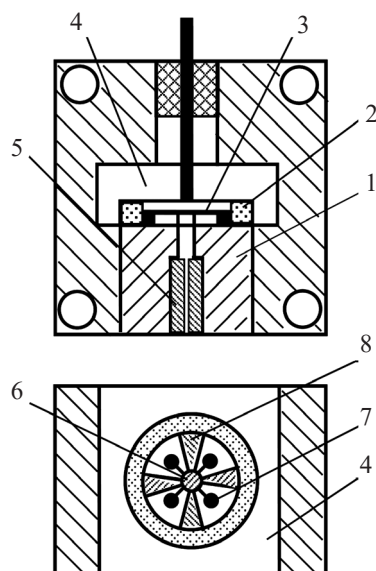


Рис. 8. Упрощенная схема конструкции сумматора мощности:

1 — медное основание; 2 — диэлектрическая втулка; 3 — металлический диск; 4 — волновод; 5 — проводники; 6 — выступ; 7 — полупроводниковые диоды; 8 — перегородки

трической втулки выбираются из требуемых условий трансформации импеданса к клеммам диода и обеспечения необходимой связи между резонатором и выходным волноводом.

В рассматриваемом модуле решается проблема паразитных типов колебаний при расширении области рабочих частот. Выступ с перегородками эффективно подавляет паразитные азимутальные гармоники и при этом не искажает электромагнитное поле рабочего колебания, поскольку для последнего электрическое поле равно нулю в местах расположения выступа и перегородок. Модуль разработан для применения в 8-мм диапазоне в режиме работы с большой длительностью импульса и малой скважностью. В модуле использованы кольцевые структуры ЛПД, позволяющие максимально реализовать свои преимущества [31]. При длительности импульса СВЧ $\tau_n = 1$ мкс и скважности $\theta = 4$ выходная мощность СВЧ составляет более 15 Вт, при $\tau_n = 4$ мкс мощность СВЧ равна 10,4 Вт.

В [32] приведены результаты разработки синхронизированных малогабаритных генераторов импульсного действия с электронным переключением частоты от импульса к импульсу. В качестве задающего высокостабильного источника СВЧ-импульса применен малогабаритный синтезатор частоты 8-мм диапазона длин волн, формирующий импульсы заданной длительности с дискретным переключением частоты. Структурная схема генератора приведена на рис. 9.

Опорный генератор, синхронизированный кварцевым генератором с помощью цифровой системы фазовой автоподстройки частоты, содержит умножитель частоты и усилитель, работающие в импульсном режиме. Синтезатор формирует импульсы СВЧ с уровнем мощности 1,0—1,2 Вт со стабильностью частоты не хуже $2 \cdot 10^{-6}$. Переключение частоты выполняется трехразрядным двоичным кодом в уровнях TTL. Конструкция ГЛПД выполнена на базе волноводно-коаксиального Т-образного сочленения. Согласование высокочастотных нагрузок со структурой ЛПД достигается путем установки диода в параллельный контур, параметры которого определяются

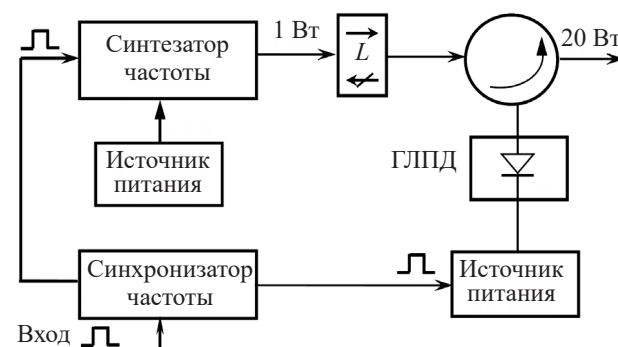


Рис. 9. Структурная схема генератора

выбором геометрических размеров диэлектрической втулки. При этом дополнительные неоднородности в волноводном канале исключаются. Запасенная энергия сосредоточена в основном в области корпусированного диода. Для расширения рабочей частоты генератора последовательно с диодом включен последовательный резонансный контур. График зависимости полосы синхронизации Δf и выходной импульсной мощности $P_{\text{вых}}$ синхронизированного ГЛПД от уровня входной импульсной мощности $P_{\text{вх}}$ задающего генератора приведена на **рис. 10**.

Один из путей создания источников СВЧ-мощности в коротковолновой части миллиметрового диапазона основан на применении свойств ЛПД в режиме эффективного преобразования частоты высокостабильного низкочастотного СВЧ-сигнала. Известно, что этот режим обеспечивает уровень мощности выходного сигнала на n -й гармонике $P_{\text{вых}} \sim 1/n$, что существенно превосходит достижимые характеристики умножителей частоты на диодах с накоплением заряда, для которых $P_{\text{вых}} \sim 1/n^2$ [33, 34]. Теоретическое рассмотрение характеристик умножителя частоты на ЛПД основано на схеме включения диода в СВЧ-цепь генератора и подведении к ЛПД напряжения $U(t) = U_0 + U_m \cdot \sin \omega t$. В результате действия опорного напряжения с частотой ω при достаточно большой амплитуде U_m в высокочастотной цепи в течение временных интервалов τ_n проходят импульсы высокой частоты ω_0 , лежащие в рабочей полосе частот генератора. При определенных условиях происходит фазовая синхронизация высокочастотных колебаний n -й гармоники опорного сигнала, и в результате возникают последовательно когерентные СВЧ-сигналы с частотой $\omega_0 = n\omega$. Более точное представление о работе ЛПД в режиме умножения дает исследование в самосогласованном режиме. Оно проводилось в предпо-

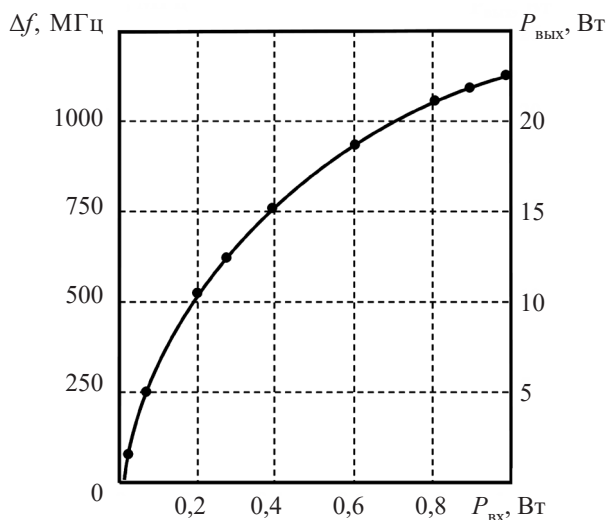


Рис. 10. Зависимость полосы синхронизации и выходной мощности синхронизированного ГЛПД от уровня входной мощности задающего генератора при длительности импульса СВЧ 300 нс

ложении, что на ЛПД подавалось напряжение смещения и заданное напряжение низкой частоты, а нагрузкой ЛПД являлся параллельный контур, настроенный на высокую частоту [35]. На **рис. 11** представлена схема конструкции умножителя, а его эквивалентная схема замещения — на **рис. 12**.

Совместное решение уравнений, описывающих процессы в ЛПД и в контуре, позволяет исследовать характер высокочастотных колебаний в нагрузке контура. Важным является вопрос о том, определяется ли частота и фаза ВЧ-колебаний только частотой и фазой низкочастотного сигнала, который предполагается высокостабильным, либо они зависят от других факторов. Как показано в [36], если фаза ВЧ-колебаний в момент появления нового импульса колебаний постоянна относительно фазы низкочастотного напряжения, то спектр колебаний не будет зависеть от частоты контура (которая может быть нестабильной), а определяется только частотой низкочастотного сигнала, что и требуется для эффективной синхронизации. Как правило, в режиме самовозбуждения ГЛПД синхронизация наблюдается только в узкой полосе. В режиме усиления на отрицательном сопротивлении ЛПД синхронизация наблюдается в достаточно широком интервале изменений низкой частоты.

Параметры умножителей частоты высокой кратности, достигнутые при разработке и исследовании

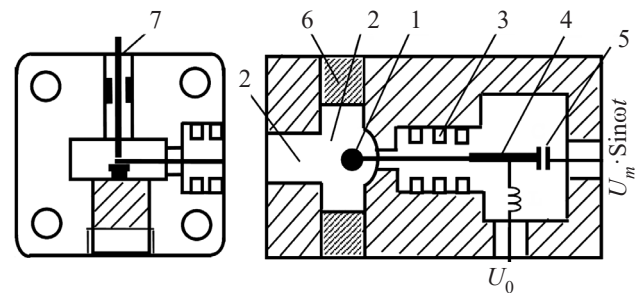


Рис. 11. Схема конструкции умножителя на ЛПД: 1 — ЛПД; 2 — волновод; 3 — фильтр радиального типа; 4 — несимметричная полосковая линия; 5 — разделительная емкость; 6 — КЗ-поршень; 7 — штырь

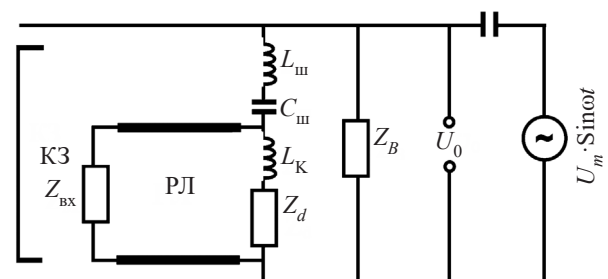


Рис. 12. Эквивалентная схема конструкции умножителя: КЗ — короткозамыкающий волноводный поршень; РЛ — радиальная линия; $L_{\text{ш}}$ — индуктивность штыря; $C_{\text{ш}}$ — емкость между штырем настройки и крышкой диода; $L_{\text{к}}$ — индуктивность контактов; $Z_{\text{д}}$ — сопротивление диода; $Z_{\text{Б}}$ — сопротивление линии передачи

Параметры умножителей частоты высокой кратности

Наименование параметра	Значение параметра в диапазоне частот, ГГц:		
	75—100	90—140	110—180
Выходная мощность, мВт	10—50	10—30	10—20
Коэффициент умножения	10—15	10—15	10—20
Рабочая полоса частот, ГГц	0,5—1,0	0,5—1,0	0,5—1,0
Диапазон рабочих частот сигнала синхронизации, ГГц	5—10	5—10	5—10
Напряжение смещения на ЛПД, В/А	24/0,15	24/0,15	24/0,15

ях, приведены в **таблице**. Конструктивно умножители частоты высокой кратности в диапазоне частот 30—180 ГГц содержат ферритовые волноводные вентили и полосно-пропускающие фильтры. Волноводные вентили защищают выходной сигнал умножителя частоты от влияния нагрузки. Фильтры подавляют ближайшие гармоники в выходном сигнале умножителя на уровне не менее 40 дБ. При модуляции тока управления ЛПД происходит синхронная модуляция выходного сигнала умножителя с глубиной модуляции не менее 70 дБ при частоте модуляции до 100 МГц.

Включение ЛПД в колебательный контур с использованием радиальной линии для реализации процесса умножения частоты аналогично включению и настройке ЛПД для генерации и усиления [37].

В [38] показана возможность синхронизации мощных СВЧ-приборов (магнетронов, клистронов). Когерентное излучение таких приборов может быть реализовано с применением полупроводникового когерентного источника импульсного действия, обеспечивающего фазовую синхронизацию колебаний магнетрона на отрезке времени, равном длительности импульса полупроводникового источника. Уменьшение длительности синхронизирующего импульса и уровня его мощности достигается при введении модуляции добротности мощного СВЧ-прибора. При этом уровень мощности синхронизации уменьшается пропорционально добротности мощного прибора во второй степени. Уменьшение добротности резонансной системы мощного СВЧ-прибора позволяет уменьшить уровень импульсной мощности синхронизирующего сигнала P_s пропорционально квадрату уменьшения добротности. При этом характеристики синхронного режима не изменяются. Уменьшение требуемой мощности P_s позволяет значительно уменьшить габариты синхронизирующего источника СВЧ и блока питания. Единый гибридный комплекс твердотельного и электровакуумного прибора может стать мощным импульсным когерентным источником СВЧ-колебаний, позволяющим решить задачу построения РЛС с селекцией

движущихся целей в миллиметровом диапазоне длины волны [26, 39—44].

В НИИ «Орион» (г. Киев) разработан ряд высокостабильных генераторов импульсного действия для использования в качестве задающего генератора и в аппаратуре общего применения, и в бортовой аппаратуре в диапазоне частот 30—150 ГГц. В рабочей полосе частот генераторы обеспечивают выходную мощность 2—10 Вт при длительности импульсов 50—100 нс и частоте повторения 50 кГц. Конструктивно генераторы состоят из генераторной камеры, высокодобротного резонатора, выполненного из инвара, волноводного вентили и импульсного источника тока, температурная нестабильность частоты составляет $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. В диапазоне частот 30—180 ГГц созданы генераторы непрерывного действия с применением специальных корпусированных кремниевых двухпролетных IMPATT диодов. Выходная мощность составляет 20—50 мВт. Температурный коэффициент частоты равен $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Уровень фазовых шумов составляет –80 дБ/Гц при отстройке от несущей не более 10 кГц. На выходе генераторов установлены волноводные полосно-пропускающие фильтры, подавляющие амплитудные шумы до уровня –180 дБ/Гц относительно несущей при отстройке частоты более 1 ГГц [26].

Выводы

Создание когерентных синхронизированных генераторов на ЛПД обеспечивается при полном исключении фазовой модуляции, которая достигается в случае импульсного режима работы использованием импульса тока управления специальной формы. Для расширения полосы синхронизации необходимо создать колебательную систему с минимальным запасом энергии. При этом целесообразно использовать собственный резонансный контур, содержащий активный элемент, и корпус без применения дополнительных резонансных элементов в электродинамической системе. В этом случае добротность контура, содержащего активный элемент, составляет 10—15. Это позволяет реализовать рабочую полосу на уров-

не 10% при коэффициенте усиления до 10 дБ и на уровне 3% при усилении до 20 дБ.

Опыт разработки синхронизированных генераторов показал, что такие приборы необходимо конструировать совместно с блоком питания. При этом они должны быть сопряжены как по электрическим характеристикам, так и конструктивно. Выполнение этих условий обеспечивает создание эффективных когерентных источников мощности миллиметрового диапазона с использованием ЛПД.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Карушкин Н. Ф. Синхронизация генераторов на ЛПД импульсного и непрерывного действия в мм-диапазоне длин волн. Часть 1. Конструкции генераторов и обобщенная модель их синхронизации внешним сигналом. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2021, № 1–2, с. 10–20. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.10>
2. Белоусов Н.П., Новожилов В.В. Температурная зависимость динамических характеристик импульсных ЛПД. *Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ*. 1987, вып. 3, с. 23–26.
3. Касаткин Л.В. Стабилизация СВЧ параметров стационарного синхронного режима импульсных генераторов на ЛПД. *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. 2001, т. 44, № 3, с. 18–25.
4. Касаткин Л.В., Чайка В.Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. Севастополь. Вебер. 2006, 319 с.
5. Тагер А.С., Голант Е.М. Расчет токовой стабилизации частоты импульсных ЛПД. *Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ*. 1982, вып. 11, с. 20–23.
6. Тагер А.С. К расчету тепловых характеристик полупроводниковых структур в режиме коротких импульсов. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ техника*. 1996, вып. 2, с. 41–47.
7. Касаткин Л.В., Рукин В.П. Мощные импульсные полупроводниковые источники миллиметрового диапазона в режиме внешней синхронизации. *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. 2005, т. 48, № 6, с. 3–19.
8. Горбачев А.В. Экспериментальные исследования методов стабилизации параметров импульсных ГЛПД в интервале температур. *Твердотельные генераторы и преобразователи миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Сб. Науч. трудов Института радиофизики и электроники АН УССР*, Харьков. 1989, с. 33–38.
9. Белоусов Н.П., Горбачев А.В., Касаткин Л.В., Новожилов В.В. Токовая стабилизация амплитудно-частотных характеристик синхронизированных импульсных ГЛПД в интервале температур. *Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ*. 1989, вып. 4, с. 10–15.
10. Eisenhort R., Robertson R. Controlled bias preheating for variable duty factor IMPATT transmitter. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Dig.* 1985, p. 529–530.
11. Карушкин Н.Ф., Касаткин Л.В. Стабилизация СВЧ параметров импульсных ГЛПД. *Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника*. 2000, вып. 1 (475), с. 22–27.
12. Карушкин Н.Ф., Касаткин Л.В., Новожилов В.В., Добрянский В.С., Илинецкий В.В. Генератор сверхвысокочастотных радиоимпульсов. А.с. СССР, no. 1162017, 1983.
13. Kasatkin L. V., Karushkin N. F. Stabilization of RF Parameters of Injection-locked Pulsed IMPATT Oscillators. *Microwave Journal*. September 2000, pp. 172–180.
14. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.М. Активные антенные решетки. (Обзор). *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. 1983, т. 25, № 2, с. 4–17.
15. Дворников А.А., Уткин Г.М., Чуков А.М. О внешней синхронизации автоколебательной АФАР. *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 1980, т. 23, № 5, с. 547–554.
16. Горбачев А.В., Касаткин Л.В. Каскадное суммирование мощностей в режиме внешней синхронизации. *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. 1989, вып. 10, с. 22–27.
17. Карушкин Н.Ф., Касаткин Л.В. Импульсные твердотельные генераторы миллиметрового диапазона волн на ЛПД. *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. 1999, № 10, с. 3–10.
18. Дворников А.А., Уткин Г.М. О сложении мощностей многих автогенераторов. *Радиоэлектроника и электроника*. 1974, № 3, с. 550–559.
19. Чуков А.М. О взаимной синхронизации линейки СВЧ автогенераторов. *Труды МЭИ*. 1981, вып. 547, с. 114–116.
20. Тараненко В.П., Коцержинский Б.А., Мачусский Е.А. Твердотельные генераторы СВЧ колебаний миллиметрового диапазона радиоволн. *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. 1978, т. 21, № 10, с. 4–24.
21. Карушкин Н.Ф., Касаткин Л.В., Хитровский В.А. Опыт разработки твердотельных когерентных передающих устройств высокого уровня мощности в Ка-диапазоне. *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. 2003, № 2, с. 3–8.
22. Касаткин Л.В. Широкополосные импульсные генераторы СВЧ на ЛПД в режиме внешней синхронизации. *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. 2002, т. 45, № 2, с. 15–24.
23. Тарасюк В.М., Басанец В.В., Болтовец Н.С. и др. Кремниевые лавинно-пролетные диоды 8-мм диапазона для мощных импульсных однодиодных СВЧ-генераторов. *Техника и приборы СВЧ*. 2011, № 1, с. 21–23.
24. Касаткин Л.В., Чайка В.Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. Севастополь. Вебер. 2006, 319 с.
25. Chang R., Sun C. Millimeter-wave power combining techniques. *IEEE Transactions on MTT*. 1983, vol. 31, no. 5, pp. 91–107.
26. Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт «Орион», Киев. Украина. URL: <http://www.orion.org.ua>.
27. Moony W., Bayuk F. Injection locking performance of 41 GHz 10 W power combining amplifier. *IEEE Transactions on MTT*. 1983, vol. 31, no. 2, p. 171–176.
28. Chang K., Ebert R. Power combining near 94 GHz. *IEEE International Solid-State Circuit Conf.* 1980. Session X: Microwave Circuits, p. 16–18.
29. Bauer T., Treger J., Claassen M. A resonant-cap power combiner for two-terminal millimeter wave devices. *IEEE Transactions on MTT*. 1997, vol. 45, no. 2, p. 146–148.
30. Карушкин Н.Ф. Источники мощности миллиметрового диапазона на лавинно-пролетных диодах с распределенными параметрами. *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. 1999, т. 42, № 7, с. 47–54.
31. *Теория линий передачи сверхвысоких частот*. Перевод с англ. под ред. А.И. Шпунтова. Часть II. Сов. Радио, 1951, 280 с.
32. Дворниченко В.П., Карушкин Н.Ф., Малышко В.В., Ореховский В.А. Полупроводниковый генератор импульсного действия с электронным переключением частоты Ка-диапазона. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2015, № 4, с. 3–7. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.4.03>
33. Gorbachev O., Kasatkin L. Complex coaxial-waveguide transitions at millimeter-waves. *Microwave Journal*, 2001, vol. 44, p. 90–100.
34. Дворниченко В.П., Карушкин Н.Ф., Мальцев С.Б., Чайка В.Е. Работа ЛПД в режиме радиоимпульсного умножения частоты. *Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ*. 1985, вып. 4 (376), с. 40–44.
35. Карушкин Н.Ф. Умножители частоты на полупроводниковых диодных структурах. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2018, № 13, с. 22–36. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.3.22>
36. Карушкин Н.Ф. Модули миллиметрового диапазона длин волн. *Радиофизика и электроника*, 2004, т. 9, № 1, с. 295–303.
37. Горлачев В.Е., Дворниченко В.П., Карушкин Н.Ф. Корпус полупроводникового диода. Пат. 9375 Украины, 1996.

38. Касаткин Л.В. Импульсные автогенераторы в режиме фазовой синхронизации импульсным когерентным сигналом (когерентные магнетроны). *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*, 2006, т. 49, № 4, с. 38–45.

39. Карушкин Н.Ф., Мальцев С.Б., Хитровский В.А. Твердотельные СВЧ-модули для радиотехнической аппаратуры и систем миллиметрового диапазона длин волн. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2016, № 1, с. 3–7. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2016.1.03>

40. Мележик П.Н., Муськин Ю.Н., Зуйков В.А. и др. Экспериментальная оценка характеристик когерентности приемопередающего модуля Ка-диапазона. *Техника и приборы СВЧ*. 2008, № 2, с. 19–23.

41. Сидько В.И., Хитровский В.А. Высокочастотное измерение фазовых сверхмалошумящих стабильных генераторов и синтезаторов частоты при воздействии вибрации и акустического шума.

10-я Международная Крымская конференция. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. Севастополь, Вебер, 2000, с. 540–542.

42. Карушкин Н.Ф., Звершховский И.В. Пойгина М.И. Твердотельные приборы электронной техники ММ-диапазона. *Электронная техника. Сер. I Электроника СВЧ*. 1993, вып. 5–6, с. 20–24.

43. Колосов В.В., Мясин Е.А. Шумовой радиолокатор миллиметрового диапазона. *РЭНСИТ*, 2018, т. 10, № 2, с. 235–256.

44. Карушкин Н.Ф. Твердотельные компоненты и устройства электронной техники терагерцового диапазона в Украине. *Радиофизика и электроника*. 2018, т. 23, № 3, с. 40–64.

Дата поступления рукописи
в редакцию 23.03 2021 г.

DOI: 10.15222/TKEA2021.3-4.17

УДК 621.314.26:621.382.64

М. Ф. КАРУШКИН

Україна, м. Київ,

Науково-дослідний інститут «Оріон»

E-mail: orion@ri-orion.kiev.ua

СИНХРОНІЗАЦІЯ ГЕНЕРАТОРІВ НА ЛПД ІМПУЛЬСНОЇ ТА БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ У ММ-ДІАПАЗОНІ ДОВЖИНИ ХВИЛЬ.

Частина 2. Стабілізація НВЧ-параметрів синхронізованих генераторів

Наведено другу частину роботи, що складається з двох статей, в яких узагальнено результати, досягнуті на цей момент при розробленні синхронізованих генераторів на лавинно-пролітних діодах (ГЛПД). У першій частині було представлено електродинамічні конструкції генераторів, які містять резонансну коливальну систему з кремнієвими лавино-пролітними діодами та синхронізуються зовнішнім джерелом НВЧ-коливань.

В цій статті наводяться методи стабілізації параметрів ГЛПД, які дозволяють створювати когерентні джерела потужності в діапазоні міліметрових хвиль. Особливістю роботи генераторів імпульсної дії є змінювання частоти в межах НВЧ-імпульсу залежно від температури, що призводить до зміни імпедансу діода, а отже й до зміни фази відносно синхронізувального сигналу. Зменшення фазової модуляції або її повне виключення (що необхідно для забезпечення когерентності передавача НВЧ) реалізується шляхом застосування струмової компенсації, тобто при використанні спеціальної форми імпульсу струму управління.

Показано доцільність введення додаткового підігріву напівпровідникової структури ЛПД, завдяки чому початкова температура ЛПД в області переднього фронту кожного імпульсу залишається практично постійною і не залежить від температури навколишнього середовища. Використання цих методів щодо кремнієвих дводрейфових ЛПД дозволило створити синхронізовані генератори з рівнем вихідної потужності від 20 до 150 Вт, які характеризуються високою стабільністю частоти та високим ступенем когерентності в режимі синхронізації зовнішнім сигналом.

В роботі наведено також конструкції та параметри когерентних джерел НВЧ-потужності короткохвильової частини діапазону міліметрових хвиль з використанням нелінійних властивостей ЛПД в режимі радіоімпульсного перетворення. Цей режим забезпечує рівень вихідної потужності сигналу на n -й гармоніці $P_{\text{вих}} \approx 1/n$, що істотно перевищує досягнуті характеристики помножувачів частоти з накопиченням заряду, для яких $P_{\text{вих}} \approx 1/n^2$. Вихідна потужність таких пристроїв досягає рівня 50–20 мВт в діапазоні частот 75–180 ГГц при коефіцієнті множення частоти 1–15.

Ключові слова: діапазон міліметрових хвиль, синхронізація, перетворювач частоти, генератор, лавинно-пролітний діод.

SYNCHRONIZATION OF PULSED AND CONTINUOUS-WAVE IMPATT
OSCILLATORS IN THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE

Part 2. Stabilizing microwave parameters of synchronized generators

This is the second part of the two-part article, which summarizes the state-of-the-art results in the development of synchronized oscillators based on IMPATT (IMPact ionization Avalanche Transit-Time) diodes. The first part of the paper presented the electrodynamic design of oscillators, which contain a resonant oscillatory system with silicon IMPATT diodes and are synchronized by an external source of microwave oscillations.

The second part of the paper considers the methods for stabilizing the parameters of IMPATT oscillators, which make it possible to create coherent power sources in the millimeter wavelength range. The specifics of pulse generators lies in the change in frequency within the microwave pulse relative to the change in temperature, which leads to a change in the impedance of the diode and thus to a phase change with respect to the synchronizing signal. Phase modulation is reduced or completely eliminated (which is necessary to ensure the coherence of the microwave transmitter) by using current compensation, i.e., by using the control current pulse with a special shape.

The study demonstrates the expediency of introducing additional heating of the semiconductor structure of the IMPATT diode, which allows the initial temperature of the IMPATT diode in the region of the leading edge of each pulse to remain virtually constant and independent of the ambient temperature. Using these methods on silicon double-drift IMPATT diodes allowed creating synchronized oscillators with high frequency stability and an output power level from 20 to 150 W, which have a high degree of coherence in the synchronization mode with an external signal.

The paper also presents the designs and parameters of coherent microwave power sources in the short-wave part of the millimeter wavelength range using the nonlinear properties of the IMPATT diodes in the radio-pulse conversion mode. This mode makes it possible to provide the output power level of the signal at the n -th harmonic $P_{out} \approx 1/n$, which significantly exceeds the achieved characteristics of the frequency multipliers with charge accumulation, where $P_{out} \approx 1/n^2$. The output power of such devices is achieved at the level of 50–20 mW in the 75–180 GHz frequency range with a frequency multiplication factor of 1–15.

Keywords: millimeter range, IMPATT diode, oscillator, amplifier, frequency multiplier, synchronization.

REFERENCES

1. Karushkin N. F. Synchronization of pulsed and continuous-wave IMPATT oscillators in the millimeter wavelength range. Part 1. Generator designs and a generalized model of their external signal synchronization. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2021, no. 1–2, pp. 10–20. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.10> (Rus)
2. Belousov N.P., Novozhilov V.V. [Temperature dependence of dynamic characteristics of pulsed IMPATT diodes]. *Electronic Equipment. Ser. 1. Microwave Electronics*. 1987, vol. 3, pp. 23–26. (Rus)
3. Kasatkin L.V. [Stabilization of microwave parameters of stationary synchronous mode of pulse IMPATT oscillators]. *Izvestia VUZov. Radioelectronics*. 2001, vol. 44, no. 3, pp. 18–25. (Rus)
4. Kasatkin L.V., Chayka V.E. *Poluprovodnikovyye ustroystva diapazona millimetrovyykh voln* [Semiconductor Devices of Millimeter Wave Range]. Sevastopol, Weber, 2006, 319 c. (Rus)
5. Tager A.S., Golant E.M. [Calculation of current stabilization of pulsed IMPATT diodes frequency]. *Electronic Engineering. Series 1. Microwave electronics*. 1982, vol. 11, pp. 20–23. (Rus)
6. Tager A.S. [To the calculation of thermal characteristics of semiconductor structures in the short pulse mode]. *Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Technique*. 1996, vol. 2, pp. 41–47. (Rus)
7. Kasatkin L.V., Rukin V.P. [Powerful pulsed semiconductor sources of millimeter range in external synchronization mode]. *Izvestia VUZov. Radio Electronics*, 2005, T. 48, no. 6, pp. 3–19. (Rus)
8. Gorbachev A.V. [Experimental studies of methods for stabilizing the parameters of pulsed IMPATT oscillators in the temperature range]. *Solid-State Oscillators and Transducers of Millimeter and Submillimeter Ranges. Collected Papers of the Institute of Radiophysics and Electronics of the Academy of Sciences of the UkrSSR*, Kharkov. 1989, pp. 33–38. (Rus)
9. Belousov N.P., Gorbachev A.V., Kasatkin L.V., Novozhilov V.V. [Current Stabilization of Amplitude-Frequency Characteristics of Synchronized IMPATT oscillators in the Temperature Range]. *Electronic equipment. Series 1. Microwave Electronics*. 1989, vol. 4, pp. 10–15. (Rus)
10. Eisenhort R., Robertson R. Controlled bias preheating for variable duty factor IMPATT transmitter. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Dig.*, 1985, pp. 529–530.
11. Karushkin N.F., Kasatkin L.V. [Stabilization of microwave parameters of pulsed IMPATT oscillators]. *Electronic Technique. Series 1. Microwave Engineering*. 2000, iss. 1 (475), pp. 22–27. (Rus)
12. Karushkin N.F., Kasatkin L.V., Novozhilov V.V. et al. *Generator sverkhvysokochastotnykh radioimpul'sov* [Generator of Ultra-High Frequency Radio Pulses]. A.s. USSR, no. 1162017, 1983. (Rus)

13. Kasatkin L.V., Karushkin N.F. Stabilization of RF Parameters of Injection-locked Pulsed IMPATT Oscillators. *Microwave Journal*. September 2000, pp. 172–180.
14. Voskresensky D.I., Gostyukhin V.M. [Active antenna arrays]. (Review). *Izvestia VUZov. Radioelectronics*. 1983, vol. 25, no. 2, pp. 4–17. (Rus)
15. Dvornikov A.A., Utkin G.M., Chukov A.M. [On the external synchronization of the auto-oscillatory AFAR]. *Izvestia VUZov. Radiophysics*. 1980, vol. 23, no. 5, pp. 547–554. (Rus)
16. Gorbachev A.V., Kasatkin L.V. [Cascade power summation in external synchronization mode]. *Electronic Equipment. Ser. 1 UHF Electronics*. 1989, iss. 10, pp. 22–27. (Rus)
17. Karushkin N.F., Kasatkin L.V. [Pulsed solid-state IMPATT oscillators of millimeter wave range]. *Izvestia VUZov. Radiotekhnika*. 1999, no. 10, pp. 3–10. (Rus)
18. Dvornikov A.A., Utkin G.M. [On the addition of the powers of many auto oscillators]. *Radiotekhnika i Elektronika*. 1974, no. 3, pp. 550–559. (Rus)
19. Chukov A.M. [On mutual synchronization of microwave auto oscillators]. *MPEI Proceedings*. 1981, iss. 547, pp. 114–116. (Rus)
20. Taranenko V.P., Kotserzhinsky B.A., Machusky E.A. [Solid-state microwave oscillators of the millimeter range of radio waves]. *Izvestia VUZov. Radioelectronics*. 1978, vol. 21, no. 10, pp. 4–24. (Rus)
21. Karushkin N.F., Kasatkin L.V., Khitrovsky V.A. [Development experience of solid-state coherent transmission devices of high power level in Ka-band]. *Izvestia VUZov. Radioelectronics*. 2003, no. 2, pp. 3–8. (Rus)
22. Kasatkin L.V. [Broadband pulse microwave oscillators on LPD in the mode of external synchronization]. *Izvestia VUZov. Radioelectronics*. 2002, vol. 45, no. 2, pp. 15–24. (Rus)
23. Tarasyuk V.M., Basanets V.V., Boltovets N.S. et al. [Silicon IMPATT diodes of 8-millimeter range for powerful pulsed single diode microwave oscillators]. *Tekhnika i pribory SVCh*. 2011, no. 1, pp. 21–23. (Rus)
24. Kasatkin L.V., Chayka V.E. Poluprovodnikovyye ustroystva diapazona millimetrovyykh voln [Semiconductor Devices of Millimeter Wave Range]. Sevastopol, Weber, 2006, 319 c. (Rus)
25. Chang R., Sun C. Millimeter-wave power combining techniques. *IEEE Transactions on MTT*, 1983, vol. 31, no. 5, pp. 91–107.
26. Scientific research Institute “RI “Orion”, Kyiv, Ukraine. URL: <http://orion.org.ua/>
27. Moony W., Bayuk F. Injection locking performance of 41 GHz 10 W power combining amplifier. *IEEE Transactions on MTT*, 1983, vol. 31, no. 2, pp. 171–176.
28. Chang K., Ebert R. Power combining near 94 GHz. *IEEE International Solid-State Circuit Conf.* 1980. Session X: Microwave Circuits, pp. 16–18.
29. Bauer T., Treger J., Claassen M. A resonant-cap power combiner for two-terminal millimeter wave devices. *IEEE Transactions on MTT*. 1997, vol. 45, no. 2, pp. 146–148.
30. Karushkin N.F. [Millimeter range power sources on IMPATT diodes with distributed parameters]. *Izvestia VUZov. Radioelectronics*. 1999, vol. 42, no. 7, pp. 47–54. (Rus)
31. *Teoriya liniy peredachi sverkhvysokikh chastot* [Theory of Microwaves Transmission Lines]. Red. by A.I. Shpuntov. Part II. Sov. Radio, 1951, 280 p. (Rus)
32. Dvornichenko V.P., Karushkin N.F., Malyshko V.V., Orekhovsky V.A. [Semiconductor pulse oscillator with electronic switching of Ka-band frequency]. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2015, no. 4, pp. 3–7. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.4.03> (Rus)
33. Gorbachev O., Kasatkin L. Complex coaxial-waveguide transitions at millimeter-waves. *Microwave Journal*, 2001, vol. 44, pp. 90–100.
34. Dvornichenko V.P., Karushkin N.F., Maltsev S.B., Chayka V.E. [Operation of IMPATT diode in radio pulse frequency multiplication mode]. *Electronic equipment. Ser.1. Microwave Electronics*. 1985, vol. 4 (376), pp. 40–44. (Rus)
35. Karushkin N.F. [Frequency multipliers on semiconductor diode structures]. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*. 2018, no. 13, pp. 22–36. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.3.22> (Rus)
36. Karushkin N.F. [Millimeter wave modules]. *Radiophysics and Electronics*. 2004, vol. 9, no. 1, pp. 295–303. (Rus)
37. Gorlachev V.E., Dvornichenko V.P., Karushkin N.F. [Semiconductor Diode Housing]. Pat. 9375, Ukraine, 1996. (Rus)
38. Kasatkin L.V. [Pulse self oscillators in phase synchronization mode with a pulsed coherent signal (coherent magnetrons)]. *Izvestia VUZov. Radioelectronics*. 2006, vol. 49, no. 4, pp. 38–45. (Rus)
39. Karushkin N.F., Maltsev S.B., Khitrovsky V.A. [Solid-state microwave modules for radio equipment and systems of millimeter wavelength range]. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*. 2016, no. 1, pp. 3–7. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2016.1.03> (Rus)
40. Melezhik P.N., Muskin Yu.N., Zuikov V.A. et al. [Experimental evaluation of the coherence characteristics of the Ka-band transceiver module]. *Tekhnika i Pribory SVCh*. 2008, no. 2, pp. 19–23. (Rus)
41. Sidko V.I., Khitrovsky V.A. [High-precision measurement of phase ultra-low noise stable oscillators and frequency synthesizers under the influence of vibration and acoustic noise]. *10th International Crimean Conference. Microwave Engineering and Telecommunication Technologies*. Sevastopol, Weber, 2000, pp. 540–542. (Rus)
42. Karushkin N.F., Zvershkhovskiy I.V., Poigina M.I. [Solid-state devices of millimeter electronic engineering]. *Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Electronics*. 1993, vol. 5–6, pp. 20–24. (Rus)
43. Kolosov V.V., Myasin E.A. [Noise radar of the millimeter range]. *RENSIT*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 235–256. (Rus)
44. Karushkin N.F. [Solid-state components and devices of terahertz electronic technology in Ukraine]. *Radiophysics and Electronics*. 2018, vol. 23, no. 3, pp. 40–64. (Rus).

Описание статьи для цитирования:

Карушкин Н. Ф. Синхронизация генераторов на ЛПД импульсного и непрерывного действия в мм-диапазоне длин волн. Часть 2. Стабилизация СВЧ-параметров синхронизированных генераторов. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2021, № 3–4, с. 17–29. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.17>

Cite the article as:

Karushkin N. F. Synchronization of pulsed and continuous-wave IMPATT oscillators in the millimeter wavelength range. Part 2. Stabilizing microwave parameters of synchronized generators. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 3–4, pp. 17–29. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.17>