

Генераторы на СВЧ- и КВЧ-диодах. Часть 1. Состояние производства. Принципы построения

Владимир ГЕВОРКЯН,
к. т. н.
GevorkianVM@mpei.ru
Виктор КОЧЕМАСОВ,
к. т. н.

Первая часть статьи знакомит читателей с историей создания диодных генераторов, принципами построения генераторов на диодах Ганна и лавинно-пролетных диодах и с особенностями генераторов на основе этих активных элементов. Рассмотрены уровни характеристик генераторов на диодах Ганна и ЛПД различных конструктивных решений, а также перспективы развития диодных генераторов в область крайне высоких частот. Во второй части будет дан системный анализ предложений от ведущих отечественных и зарубежных производителей диодных генераторов, оценка и сравнение характеристик устройств различных фирм.

Введение

Генераторы на СВЧ- и КВЧ-диодах функционируют на эффекте отрицательного дифференциального сопротивления активного двухполюсника на рабочей частоте. Известны три основных типа генераторных диодов. Первыми [1] в 1956 году за рубежом появились туннельные диоды (на основе вырожденного полупроводника, в котором при приложении напряжения в прямом направлении на вольт-амперной характеристике (ВАХ) возникает участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением за счет туннельного эффекта в тонком слое *p-n*-перехода). В 1959 году в СССР (НПО «Исток», А. С. Тагер) наблюдалось явление, предсказанное в 1958-м У. Т. Ридом (W. T. Read), а через год в лаборатории СВЧ-диодов НИИ «Пульсар» под руководством В. М. Вальд-Перлова был разработан лавинно-пролетный диод (ЛПД), принцип действия которого связан с соизмеримостью времени «пролета» носителей заряда через рабочий продольный промежуток полупроводника и периода приложенного к этому полупроводнику переменного напряжения. Диоды на эффекте Ганна, обусловленном статической отрицательной проводимостью полупроводника со сложным (многодолинным) строением зоны проводимости, созданы в 1963 году в США (Дж. Ганн).

В настоящее время диоды Ганна и лавинно-пролетные диоды применяются в качестве источников электромагнитных колебаний. Ввиду малой мощности сигналов туннельные диоды практически не используются для генерации.

Во второй половине прошлого века генераторы на диодах Ганна (ГДГ) наряду генераторами на ЛПД (за рубежом называемыми ИМРАТТ-диодами) разрабатывались для замещения маломощных генераторов [2] на отражательных клистронах и их низковольтных модификациях (например, генераторах тормозящего поля с напряжением питания ~50 В). В сравнении с клистронными, преимущество генераторов на ЛПД (ГЛПД) заключается в отсутствии цепи накала и лучших энергетических характеристиках, а достоинства генераторов на диодах Ганна — еще и низкие питающие напряжения менее 10 В. Более широкое распространение получили ГДГ как устройства с лучшими шумовыми (спектральными) характеристиками, хотя реальные КПД таких генераторов составляли от нескольких долей до нескольких единиц процента (теоретически до 15%). В диапазоне частот до 40 ГГц их преимущество перед ГЛПД в уровне фазовых шумов составляет до 30 дБ/Гц при одинаковых отстройках от несущей частоты. Достоинства автогенераторов на ЛПД заключаются в более высоких (на порядок) уровнях выходной мощности и КПД до десятков процентов.

Отличия физических эффектов, на которых функционируют диоды, определяют варианты конструктивных решений генераторов на их основе. Кратко перечислим эти особенности.

В зависимости от параметров кристалла, свойств нагрузки, температуры и питающего напряжения генератор на диоде Ганна может работать в одном из нескольких существенно отличающихся режимов, общим для которых является формирование импульсов тока

во внешней цепи. Импульс тока формируется в процессе перемещения в кристалле диода «сгустка» напряженности электрического поля или носителей заряда — домена. В зависимости от особенностей (вида) доменов теоретически различают доменные режимы (пролетный, с задержкой и с гашением домена), гибридные режимы, режим с ограничением накопления объемного заряда. В практике применения диодов Ганна строго выделить режим работы диода в устройстве сложно. Очевидно лишь, что пролетный режим не управляется внешней цепью (КПД ~5%), а остальные доменные режимы контролируются внешним резонансным контуром, причем частота колебаний может быть как больше, так и меньше пролетной. В этих режимах генерируемый сигнал поддается перестройке внешним контуром и может лежать в пределах от $0,6f_{пр}$ до $1,5-2f_{пр}$, то есть на частотах $f \approx 1-5$ ГГц. При этом импульсы тока сильно отличны от гармонического вида, что уменьшает мощность 1-й гармоники колебаний, и КПД оказывается приблизительно в 2,5 раза меньше, чем в режиме с задержкой домена.

Качественно иной режим ограниченного накопления объемного заряда (ОНОЗ) основан на инерционности процесса формирования домена в сравнении со скоростью изменения переменного напряжения. Для этого требуются специальные диоды со строго однородным профилем легирования, замедляющим формирование домена. Тогда поле внутри диода равномерно распределится вдоль длины активной части кристалла. Динамическая ВАХ диода совпадает с зависимостью скорости дрейфа от напряженно-

сти поля. В ОНОЗ-режиме диод Ганна нагружается на параллельный контур, у которого $R_n \gg R_d$. Частота генерации в таком режиме полностью определяется настройкой колебательной системы и никак не зависит от пролетной частоты диода.

ОНОЗ-режим применяют для создания импульсных ГДГ, которые обладают на -3 порядка большей мощностью, чем другие твердотельные источники СВЧ-колебаний. Максимальный КПД в этом режиме приближается к $15-17\%$ и достигается при $R_n \approx (20-30) \times R_d$.

Практически ГДГ работают в гибридных режимах, промежуточных между ОНОЗ и доменными. В этих режимах в кристалле может одновременно существовать несколько доменов, время формирования которых достаточно велико по сравнению с периодом колебаний. Домены влияют на ток диода только на части падающего участка ВАХ. В гибридных режимах КПД может быть около 15% .

Известны и иные режимы в диодах Ганна, например статического домена сильного поля, но в ГДГ они не применяются.

В отличие от диодов Ганна ЛПД формируют СВЧ-колебания на основе эффекта динамического отрицательного дифференциального сопротивления, возникающего в результате ударной ионизации атомов полупроводника при лавинном пробое. Лавина (стукт электронно-дырочной пары) формируется под действием переменного напряжения в узком слое перехода (слое умножения). Если частота переменного напряжения такова, что лавина возникает в период ускоряющей фазы напряжения, то в последующий полупериод изменения напряжения (замедляющее электрическое поле) электроны будут отдавать свою энергию переменному полю.

Впервые генерация наблюдалась на германиевых обратном смещенных диодах с одним $p-n$ -переходом, имеющих резкий излом ВАХ. К настоящему времени созданы кремниевые, арсенид-галлиевые и фосфид-индиевые лавинно-пролетные диоды в виде ряда структур (например, диод Тагера с резким $p-n$ -переходом, диод Рида с переходом типа $p^+-n-i-n^+$, диод Мисавы со слоем однородного умножения — $p-i-n$ -переход и пр.), отличающихся ВАХ, условиями лавинного пробоя и динамическими свойствами, которые зависят от геометрии, уровня легирования, материала диода и т. д.

В ЛПД стандартным считается так называемый пролетный, или IMPATT (IMPact ionization Avalanche Transit-Time diode), режим. Он отражает основные физические явления, протекающие в ЛПД при не слишком высоких амплитудах СВЧ-полей (резонаторы средней добротности). Обычно максимальный КПД прибора, примерно равный 25% , достигается на частоте, удовлетворяющей соотношению $\omega\tau \sim \pi$, где τ — время пролета электронной лавины, ω — пролетная частота. В этом режиме носители заряда ге-

нерируются в слое лавинного умножения. Дырки уходят в p -область, а электроны в пролетном промежутке участвуют в энергообмене с полем. Процесс соответствует диодам Рида и Тагера. В диоде Мисавы IMPATT-режим сложнее, чем в диодах Рида и Тагера, но качественно похож.

Второй тип колебательного режима ЛПД — TRAPATT-режим (TRApped, Plasma Avalanche Triggered Transit), или аномальный режим, рабочая частота в котором намного ниже пролетной. TRAPATT-режим отличается относительно высоким значением КПД и возникает в условиях значительных напряжений СВЧ на диоде, размещенном в высокодобротной резонансной системе.

Недостатком ЛПД является на порядок более высокий уровень амплитудных и фазовых шумов в сравнении с ГДГ, что демонстрируют зависимости (рис. 1), приведенные в работе В. М. Вальди-Перлова, В. В. Вейца, О. А. Рябкова и Л. С. Сибирцева «Лавинно-пролетные диоды на арсениде галлия серии АА-707» (производство НИИ «Пульсар»), опубликованной в 1981 году. Отметим, что этот недостаток ЛПД «компенсируется» их преимуществом в сравнении с диодами Ганна в уровнях выходной мощности на один диод и КПД генератора в режиме непрерывной генерации.

По частоте лавинно-пролетные диоды способны перекрыть весь диапазон СВЧ и КВЧ ($0,5-500$ ГГц) и характеризуются коэффициентом полезного действия до $20-30\%$ в сантиметровом и $60-70\%$ в дециметровом диапазонах. ЛПД способны генерировать электромагнитные колебания мощностью до 12 Вт от одного прибора в сантиметровом диапазоне и порядка $0,1-1$ Вт в миллиметровом. В аномальном режиме импульсная мощность ЛПД достигает сотен ватт. По уровням генерируемой мощности ЛПД способны заменить лампы обратной волны и клистроны малой и средней мощности.

Исторически появление СВЧ генераторных диодов предшествовало появлению СВЧ-транзисторов. С развитием технологии создания транзисторных структур и появлением биполярных СВЧ-транзисторов (БТ) интерес к диодным генераторам малой мощности уменьшился ввиду того, что АГ на биполярных транзисторах обладают на поря-

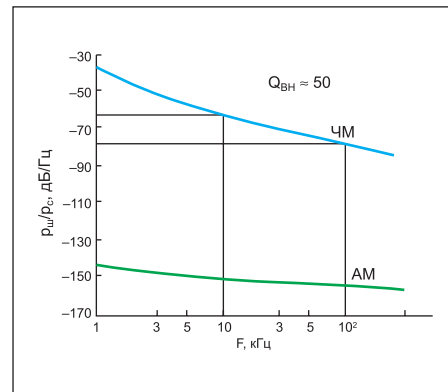


Рис. 1. Спектральная плотность АМ- и ЧМ-шума в полосе 1 Гц ЛПД на арсениде галлия серии АА-707, выполненных по меза-эпитаксиальной технологии на трехслойных $n-n^+-n^+$ -структурах для диапазона частот $8-17$ ГГц. Шумы измерены при добротности колебательной системы ~ 50

док лучшими шумовыми характеристиками в сравнении с АГ на диоде Ганна при соизмеримых мощностях. Этот процесс соответствовал освоению сантиметрового диапазона длин волн. Однако в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн (начиная примерно с 10 ГГц) возможность применения биполярных транзисторов в качестве основы автогенератора исчезла ввиду физического предела создания таких структур. Появление полевых транзисторов, спектральные свойства которых аналогичны шумовым характеристикам диода Ганна, продолжило процесс вытеснения ГДГ транзисторными автогенераторами (ГТр).

ГТр на полевых транзисторах имеют выраженные преимущества в сравнении с ГДГ в КПД при практически одинаковых спектральных характеристиках в частотном диапазоне примерно до $20-30$ ГГц. С ростом частоты собственные шумы транзисторных структур растут (табл. 1), и этот рост превосходит рост шумовых характеристик диодов Ганна вследствие уменьшения числа $p-n$ -переходов или переходов на барьере Шоттки и, соответственно, уменьшения источников дробового шума [4]. В миллиметровом диапазоне диоды Ганна становятся конкурентны полевому транзисторам не только по спектральным ха-

Таблица 1. Зависимости параметров ГТр от типа транзистора [3]

Тип транзистора	Технология	Частота, ГГц	$P_{\text{выхл}}$, мВт	КПД, %	Фазовые шумы, Гц/дБн*
GaAs MESFET Затвор $0,25 \times 120$ мкм	монокристаллическая	23	16	7	-100
Si/SiGe HBT Эмиттер 1×20 мкм	гибридная	23,2	7	11,4	-92
GaN/GaAs HBT Эмиттер $1,5 \times 20$ мкм	гибридная	21	3	13	-102
InGaAs/GaAs HEMT Затвор $0,25 \times 120$ мкм	монокристаллическая	35,5	12	7	-97
InGaAs/GaAs HEMT Затвор $0,25 \times 120$ мкм	монокристаллическая	62,1	1,7	2	-78
InGaAs/GaAs HEMT Затвор $0,25 \times 120$ мкм	гибридная	81,9	1	1,5	-67

Примечание. *Спектральная плотность фазовых шумов, дБ/Гц при отстройке на 100 кГц от несущей

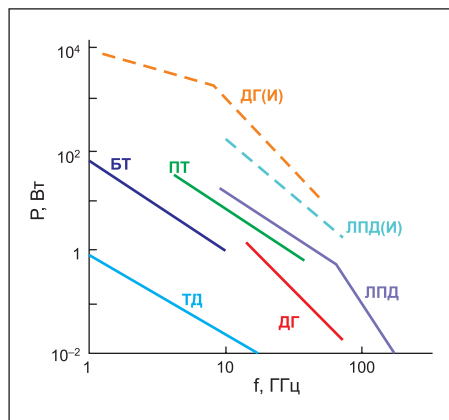


Рис. 2. Схематичный частотный план применения АГ на туннельных диодах (ТД); диодах Ганна (ДГ); ЛПД; биполярных (БТ) и полевых (ПТ) транзисторах. «И» — импульсный режим

рактическим, но и по уровням выходной мощности. В этом диапазоне частот по спектральным характеристикам ГДГ обладают на несколько порядков лучшими шумовыми характеристиками в сравнении с АГ на ЛПД.

Итак, с освоением миллиметрового диапазона длин волн альтернативе ГДГ в области малошумящих АГ малой и средней мощности практически нет. «Конкурентная борьба» здесь продолжается между АГ на БТ с применением умножителей частоты и ГДГ.

Современная картина, иллюстрирующая частотный план применения активных элементов в качестве АГ, приведена на рис. 2.

Из приведенных оценок следует, что генераторы на ДГ уступают генераторам на ЛПД по КПД, максимальной рабочей частоте и по уровню отдаваемой мощности в непрерывном режиме. Тем не менее преимуществами ГДГ являются: высокая (в сравнении с вакуумными приборами) надежность (срок службы до 10^5 ч), широкий диапазон частотной перестройки, высокая стабильность и малый уровень амплитудных и фазовых шумов. Это определяет нишу применения в миллиметровом диапазоне, в котором использование транзисторов ограничено.

Основными областями применения генераторов на ДГ являются: источники малой и средней мощности и гетеродины в связных системах и в измерительной аппаратуре, свип-генераторы на гиромагнитных резонаторах для панорамных анализаторов цепей, генераторы для портативных импульсных радаров и генераторы с линейной частотной модуляцией для радаров квазинепрерывного действия.

Современное состояние производства генераторных диодов

В настоящее время в России производство генераторных диодов сосредоточено практически на двух предприятиях. Это АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино, Московская область [5], и научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов (АО «НИИПП»), г. Томск [6]. Причем НПП «Исток» специализируется на производстве генераторных устройств и не рекламирует поставки СВЧ-диодов. АО «НИИПП» предлагает диоды Ганна с широкой номенклатурой по мощности, частоте и полосе генерации, характеризующиеся низким уровнем амплитудных и фазовых шумов, разнообразным конструктивным исполнением (как корпусных приборов, так и бескорпусных изделий для поверхностного монтажа), высокой надежностью, обеспеченной 100%-ными технологическими испытаниями, а также возможностью изготовления по специальным требованиям потребителя. Здесь рекламируются диоды Ганна сантиметрового диапазона (4–30 ГГц) как малой и средней (<100 мВт), так и большой мощности (>100 мВт), а также диоды Ганна миллиметрового диапазона (30–150 ГГц), причем малой и средней мощности (<100 мВт) на частотах 30–150 ГГц и большой мощности (>100 мВт) до 30 ГГц. В каталоге предприятия представлено 225 различных узкополосных (с полосой частот в единицы процентов) и широкополосных (с полосой до 25%) СВЧ генераторных диодов Ганна, предназначенных для работы в качестве активного элемента в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) для создания АГ малой и средней мощности, используемых в качестве передатчиков и гетеродинов.

Зарубежные производители предлагают широкий спектр генераторных СВЧ-диодов различного конструктивного исполнения. Например, фирма Microsemi RFIS Integrated Solusion [7] наряду с элементами различного функционального назначения предлагает диоды Ганна серии MG1001–MG1060 непрерывной мощности от 10 мВт в V (60,5–85 ГГц) и W (85–95 ГГц) частотных диапазонах и до 500 мВт в C-диапазоне (5,4–6,9 ГГц); X (8–12,4 ГГц) и Ku (12,4–18 ГГц) диапазонах, а также до 10 Вт импульсной мощности в X-диапазоне. Эти диоды с отводом тепловой мощности от катода рекламируются производителем как элементы с высокими характеристиками, малым уровнем фазовых шумов и низким уровнем фликкер-шума

(пропорционален $1/f$). Серию MG1041–MG1058 представляют диоды Ганна с отводом рассеиваемой мощности от анода, рекламируемые как элементы со сверхнизким уровнем фазовых шумов и фликкер-шума. Устройства выпускаются для дискретных частот X- и K-диапазонов при уровнях выходной мощности до 30 мВт (X-диапазон). Тип применяемого АП ВV полупроводника диодов, вероятно, GaAs. Рекомендуемая производителем область применения диодов — приемопередатчики, радары, радиометры, доплеровские системы и пр.

Фирма Linwave Electronic Manufacturing Services [8] рекламирует диоды Ганна для частот до 94 ГГц, повторяющие параметры, предлагаемые фирмой Microsemi RFIS Integrated Solusion. Конструктивное исполнение рекламируемых диодов показано на рис. 3. Размеры керамической области (излучательного пространства), соответствующий керамическому цилиндру (белого цвета), уменьшаются с ростом частоты. В 3-см диапазоне длин волн (X-диапазон) продольный размер керамической вставки меньше 3 мм.

Фирма Microwave Technology Centre Teledyne-e2v [9] предлагает корпусные и бескорпусные диоды Ганна (рис. 4) в диапазоне частот до 125 ГГц, на основе которых она производит генераторы различного функционального назначения. Рекламируются диоды как с катодным, так и с анодным принципом теплоотвода.

Компания Microwave Device Technology [10] предлагает корпусные и бескорпусные эпитаксиальные арсенид-галлиевые диоды Ганна коммерческого и военного назначения для диапазона частот 5–110 ГГц. В таблице 2 приведены характеристики диодов Ганна с теплоотводом от анода в непрерывном режиме. Диоды Ганна для работы в импульсном режиме практически не рекламируются.

Основное направление современного процесса развития структур диодов Ганна — повышение частотного диапазона на основе варизонных структур, например AlInN в вариантах $n^+ - n - n^+$; $n^+ - n - n - n^+$; $n^+ - n - n^+$; $n - n^+$ [11]. Структуры обеспечивают генераторные диоды с предельными частотами 0,9–1,3 ТГц.

Кроме того, стимулируются исследования возможности повышения уровня выходной мощности и КПД диодов при сохранении высоких и расширении диапазонных характеристик [12, 13]. Так, исследование длин активной области и свойств материалов варизонных структур позволило достичь увеличения частотных полос отрицательных

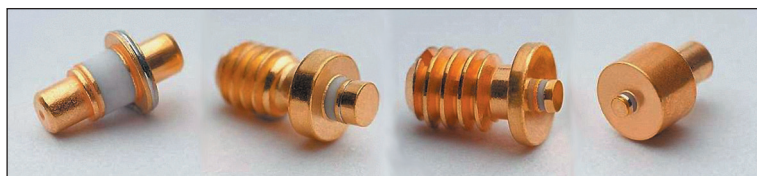


Рис. 3. Корпусные герметичные диоды Ганна для различных частот

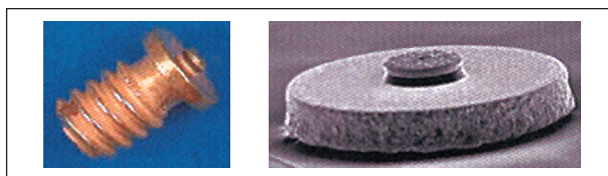


Рис. 4. Варианты корпусных герметичных диодов Ганна для различных частот

Таблица 2. Характеристики диодов Ганна для работы в непрерывном режиме, фирма Microwave Device Technology [10]

Диапазон частот (*EIA)	C	X	Ku	K	Ka	U	V	W
Диапазон частот, ГГц	5,4–6,9	9–11	13–16	18–26,5	26,5–40	40–60	50,5–85	75–110
Выходная мощность, мВт	50–500	50–500	50–500	50–400	50–250	50–150	10–50	10–50
Диапазон рабочих напряжений, В	12	10	8	6	4,5–5,5	4	4,5–5,5	4,5–5,5

Примечание. *Electronic Industries Alliance (EIA) Standards.

сопротивлений с 27%, свойственных однородным полупроводникам, до 97% (60–172 ГГц) в диапазоне питающих напряжений 52–80 В. На рис. 5 приведен пример исследования зависимости КПД $n^+ - n - n^+$ GaN-диода при разном напряжении смещения.

Итак, современное направление развития ГДГ связано с освоением высокочастотной части (выше 100 ГГц) миллиметрового диапазона длин волн и, соответственно, разработкой и внедрением в устройства более высокочастотных диодов Ганна на основе новых материалов группы $A_{III}B_{V}$: InP, GaN, SiC и др.

Выпускаемые в настоящее время диоды Ганна позволяют производить автогенераторы (АГ) с непрерывной выходной мощностью от единиц ватт (в сантиметровом диапазоне длин волн) до единиц милливатт в миллиметровом диапазоне. Относительная стабильность частоты таких АГ легко обеспечивается на уровне $10^{-4} \dots 10^{-5}$ при уровне амплитудных шумов, свойственном для коммерческой продукции (на уровне $-140 \dots -150$ дБ/Гц), и фазовых шумов $-100 \dots -110$ дБ/Гц при отстройках от несущей на 10–100 кГц.

Область применения современных ГДГ — гетеродины приемопередаточных модулей в верхней области СВЧ- и КВЧ-каналов передачи данных в радиорелейных линиях, а также традиционные автодинные и (реже) гомодинные модули систем ближней радиолокации.

Фирм, производящих ЛПД, существенно меньше, чем фирм, выпускающих диоды Ганна, причем изготовителей только ЛПД практически нет. Конструктивно ЛПД внешне повторяет диоды Ганна.

Здесь можно заметить, например, что производитель АО «НИИПП», выпуская ЛПД индексов АА-742 А,Б (бескорпусной); АД-530 А,Б (корпусной), предназначает их для формирования импульсных токов наносекундной длительности для работы в качестве быстродействующего электронного ключа малой мощности, а диод ЗА-801А-6 (бескорпусной) — для управления внешним оптическим излучением.

В советское время ведущим производителем ЛПД было московское предприятие НПО «Пульсар», однако в последние годы рекламные предложения такой продукции предприятия отсутствуют. Сегодня тоже не рекламирует ЛПД другое ведущее предприятие твердотельных СВЧ-приборов — АО «НПП «Исток» им. Шокина.

Фирма QwinStar Technology, Inc (QwinStar Impatt diode — QID), США [14], предлагает линейку мощных ЛПД (IMPATT diodes) для работы в непрерывном (табл. 3) и импульсном (диапазон частот 75–110 ГГц; пиковая мощность 20 Вт при длительности импульса 100 нс) режимах. Габариты диодов с теплоотводом $\sim 3 \times 4$ мм, внешне (конструктивно) повторяет диод Ганна на рис. 4 слева.

Фирма Microwave Device Technology [10] предлагает несколько ЛПД для создания, по мнению производителя, высокоэффективных автогенераторов непрерывной и импульсной мощности, предназначенных для применения в авиационных системах, системах радиоэлектронной борьбы и антенных решетках (smart antennas). Для генерации непрерывной мощности рекламируется ЛПД марки MI5022, который в диапазоне частот 9,5–10,2 ГГц при напряжении питания 50 В обеспечивает выходную мощность 3,5 Вт с КПД 20%. Для работы в импульсном режиме предлагаются ЛПД, приведенные в таблице 4.

Фирма Terahertz Imaging Systems (Terasense Group, Inc.), имеющая представительства в России, г. Черноголовка, Московская область, и в десятке стран Европы, Азии и Америки, рекламирует источники КВЧ-

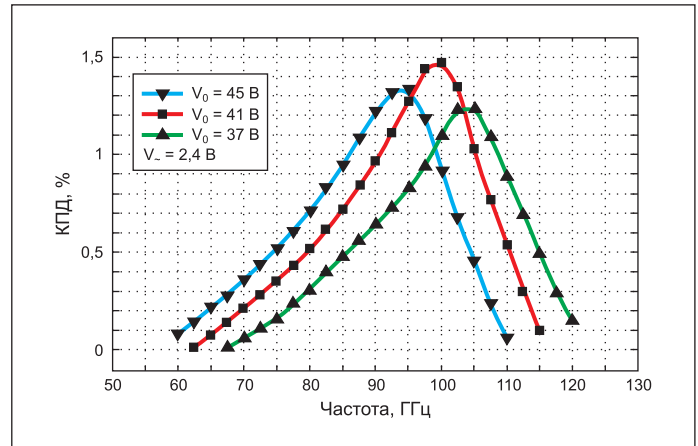


Рис. 5. КПД $n^+ - n - n^+$ GaN-диода при разном напряжении смещения

колебаний на силиконовых ЛПД-диодах с пролетной длиной 0,6 нм, систематизированные в таблице 5. ЛПД предназначены для комплектации конических и прямоугольных рупорных антенн источников, выпускаемых фирмой, включающих (опционно) вентили и ТТЛ-модуляторы.

Завершая раздел, заметим, что диоды Ганна и ЛПД имеют качественные различия не только в характеристиках, но и в режимах питания. Диоды Ганна запитываются источником напряжения. Величины напряжений питания убывают с ростом частоты (уменьшением промежутков дрейфа домена) от ~ 10 –15 В на частотах единиц ГГц до единиц вольт в КВЧ-диапазоне в режиме непрерывной мощности. Рабочие токи диодов Ганна составляют единицы ампер. Напряжение на диод подается скачком.

ЛПД требуют питания от источника тока, то есть источника с большим, например 1000 Ом, внутренним сопротивлением. Кроме того, источник питания должен обеспечивать возможность превышения тока в режиме запуска над силой тока в рабочем режиме, в некоторых случаях до 1,5 раза. Рабочие напряжения ЛПД составляют до полутора сотен вольт в непрерывном режиме генерации. В этом ЛПД подобны низковольтным клистродам, но в отличие от клистронов не требуют накальных цепей, что на порядки повышает их функциональный временной ресурс.

Таблица 3. Характеристики ЛПД (IMPATT diodes)

для работы в непрерывном режиме фирмы QwinStar Technology, Inc (QID) [14]

Диапазон частот (EIA)	Ka	Q	V	W	D
Диапазон частот, ГГц	26,5–40	33–50	50–75	75–110	110–170
Выходная мощность, мВт	1000	800	800	400	20
Диапазон рабочих напряжений, В	35–50	30–42	24–34	16–22	7–12

Таблица 4. Характеристики ЛПД (IMPATT diodes)

для работы в импульсном режиме фирмы Microwave Device Technology [10]

Модель	Диапазон частот, ГГц	Импульсная выходная мощность, Вт	Длительность импульса, мкс	Рабочее напряжение, В	Рабочий ток, А	КПД
MI5001	5,1–5,4	10	0,5–10	95	1,2	13
MI5003	9,1–9,6	15	0,5–10	65	1,8	15
MI5004	9,1–9,6	12	1–2	58	1,2	18

Таблица 5. Характеристики ЛПД (IMPATT diodes) фирмы Terahertz Imaging Systems [15]

Частота, ГГц	Выходная мощность, мВт
100	80/180/400
140	30/90
200	50
280	25/50
290	10

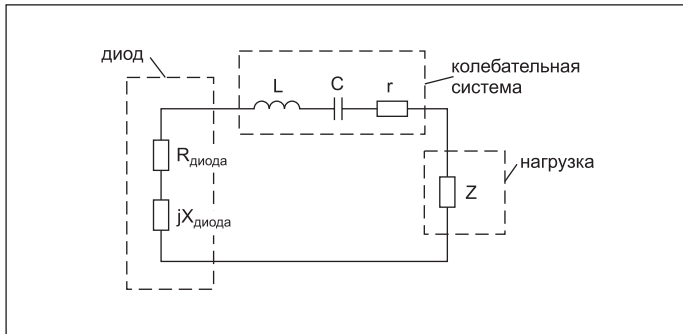


Рис. 6. Эквивалентная схема генератора на СВЧ-диоде

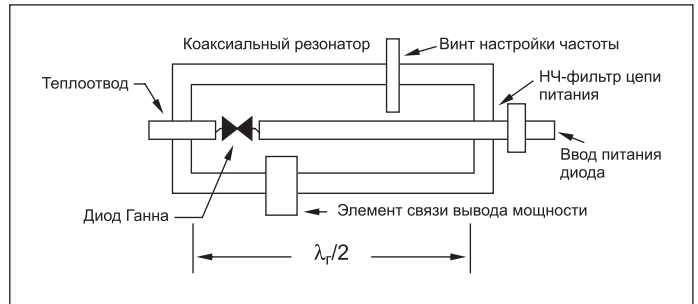


Рис. 7. Схематичный вид коаксиальной конструкции диодного СВЧ-генератора. Пример генератора на диоде Ганна (ГДГ), λ_r — длина генерируемой волны

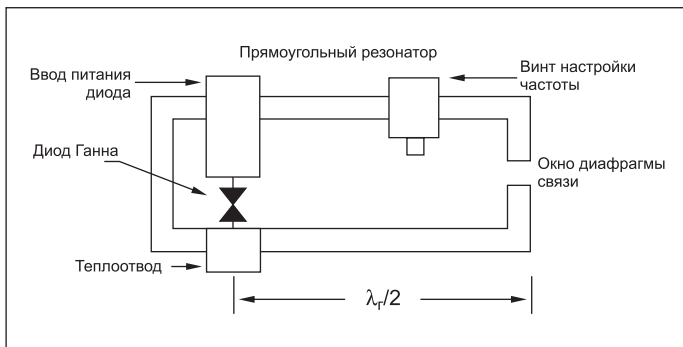


Рис. 8. Схематичный вид волноводной конструкции СВЧ диодного генератора. Пример генератора на диоде Ганна

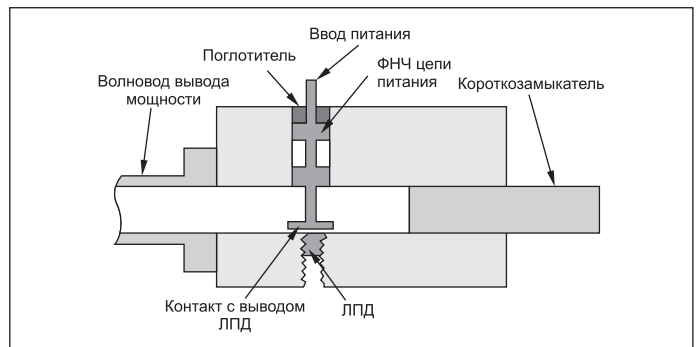


Рис. 9. Схематичный вид волноводной конструкции СВЧ-генератора при ортогональном положении ЛПД в центре широкой стенки

Область применения ЛПД — генераторные и усилительные устройства средней мощности коммерческих и оборонных систем.

Принципы построения генераторов на диодах

Генераторные СВЧ-диоды (и диоды Ганна, и ЛПД) в эквивалентном схемном представлении — активные двухполюсники с участком отрицательного сопротивления вольт-амперной характеристики или с падающим участком ВАХ, то есть ВАХ с N- или S-образными участками, определяющими отрицательное дифференциальное активное сопротивление.

Расчетные соотношения высокочастотных колебаний в электродинамических структурах с СВЧ-диодами, как правило, базируются на квазисосредоточенных эквивалентных схемах описания процессов в диоде. Эквивалентные схемы содержат реактивные элементы, связанные с вре-

менным запаздыванием процессов распространения импульсов в полупроводниковом теле диода, а также конструктивными элементами крепления полупроводника, СВЧ-цепей съема сигнала, цепей питания и т.п. За период с 60-х годов прошлого века предложено большое число вариантов таких расчетных схем, качественно не различающихся. Пример такого представления (рис. 6) описан в [4]. Колебательная система и нагрузка в эквивалентной схеме представляют приведенные к зажимам диода эквивалентные сопротивления цепи.

Конструктивное исполнение диодного генератора в общем случае представляет колебательную систему (резонатор), возбуждаемую проводником, последовательно соединенным с диодом (рис. 7, 8), то есть антенной-возбудителем (элементом связи). При этом качественно исполнение генератора не зависит от типа диода. Различие связано лишь с необходимым положением точки «включения» активного элемента в резонатор. Это определяет требуемое для воз-

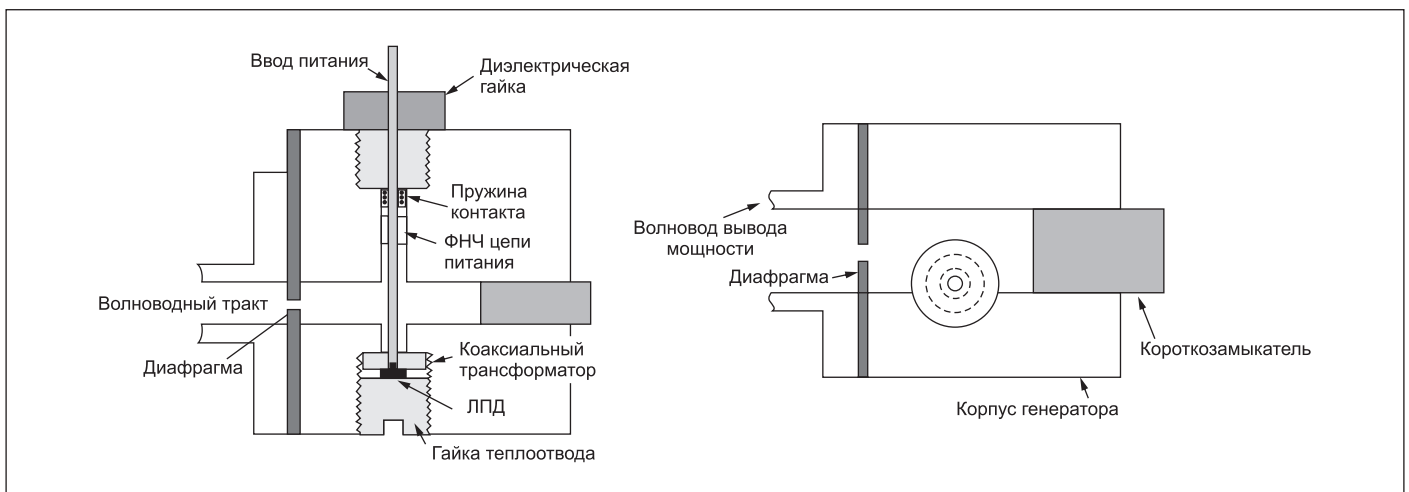


Рис. 10. Схематичный вид волноводной конструкции СВЧ-генератора на ЛПД (ГЛПД). Техническое решение Куракавы

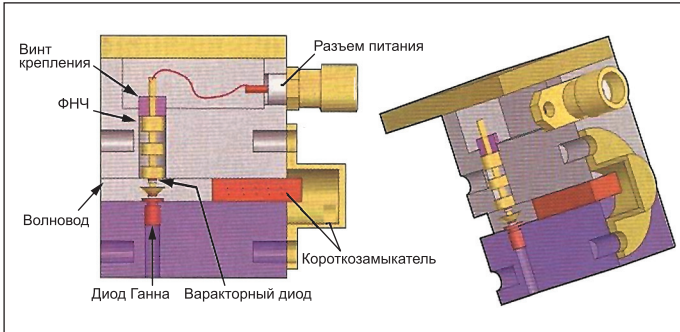


Рис. 11. Схематичное изображение генератора на диоде Ганна с варакторной перестройкой частоты генерации при последовательной схеме включения диодов

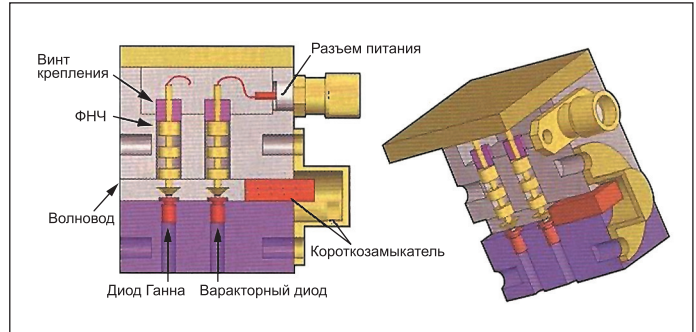


Рис. 12. Схематичное изображение генератора на диоде Ганна с варакторной перестройкой частоты генерации при параллельной схеме включения диодов

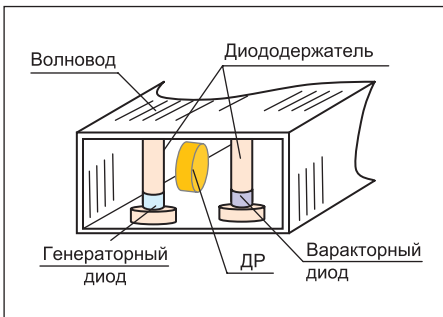


Рис. 13. Схематичный вид волноводного диодного генератора с варакторной перестройкой частоты и колебательной системой на открытом диэлектрическом резонаторе (ДР)

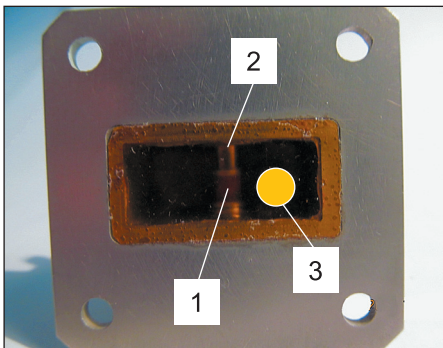


Рис. 14. Фотография ГДГ 3-см диапазона длин волн с размерами 42×42×9 мм на основе диода Ганна АА-703 в волноводном фланце 23×10 мм [17]: диод Ганна (1) в поперечном держателе (2), связанном электромагнитным полем с открытым диэлектрическим резонатором (3)

буждения колебаний сопротивление внешней цепи, приведенное к зажимам активного элемента.

Более детальное представление конструктивного исполнения СВЧ диодного автогенератора иллюстрируют устройства на ЛПД, приведенные на рис. 9, 10. Здесь показаны варианты реализации фильтров питания и конструктивное исполнение теплоотводов. На рис. 10 представлен вариант возбуждения волноводного резонатора антенным штырем, смещенным к боковой стенке, что обеспечено применением согласующего коакси-

ального трансформатора. Такое включение генераторного диода позволяет реализовать включение в резонатор нескольких диодов, то есть создать сумматор мощности.

При изменении резонансной частоты колебательной системы — например, при механическом изменении размеров резонатора или за счет включения в него неоднородностей, а также при изменении реактивностей, подключенных к резонатору (связанных с ним), в частности управляемых емкостей, как видно на рис. 11, 12 [16], меняется и частота генерируемых колебаний.

На рис. 13, 14 показаны ГДГ с колебательной системой, образованной открытым диэлектрическим резонатором (ДР).

Устройства аналогичного функционального назначения представляют микрополосковые варианты построения СВЧ-генераторов, отличающиеся лишь тем, что в качестве элемента связи выступает участок основного проводника микрополосковой линии (МПЛ). Микрополосковые автогенераторы СВЧ имеют некоторые преимущества в размерах, но добротность колебательной системы на основе МПЛ более чем на порядок меньше добротностей волноводных резонаторов. Это определяет ухудшение спектральных характеристик микрополосковых СВЧ-генераторов. Решение проблемы было найдено в 1960-е годы с применением в качестве основы колебательной системы АГ-ДР [18] (рис. 15). Такая колебательная система эффективна за счет на порядок большей собственной добротности (несколько тысяч), чем добротность системы на основе микрополоскового резонатора.

Помимо твердотельных резонансных структур на основе ДР, СВЧ-генераторы создают с применением перестраиваемых магнитным полем ферритовых резонаторов. Чаще всего эти резонаторы образуют монокристаллические шары из железо-иттриевого граната (ЖИГ), помещенные в воздушный зазор магнитопровода электромагнита [19]. Схематично конструктивное исполнение автогенератора с ЖИГ иллюстрирует рис. 16, а на рис. 17 представлен внешний вид генератора с ЖИГ-перестройкой частоты. Генераторы обеспечивают перестройку ча-

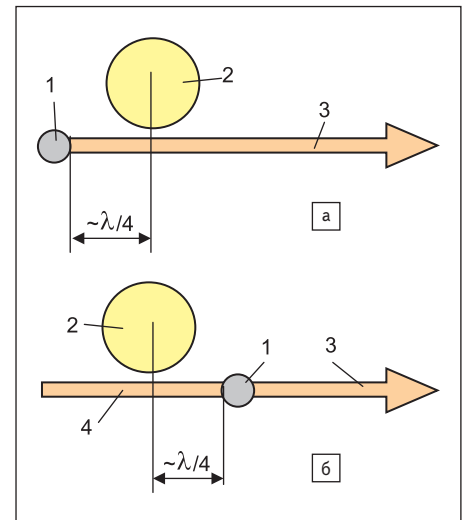


Рис. 15. Схематичное изображение топологий микрополосковых диодных (1) автогенераторов с ДР (2): а) ДР в линии (3) вывода мощности; б) диодный генератор с реактивно отражающим резонатором (4)

стоты в широком диапазоне (больше октавы) и применяются в основном до сантиметрового диапазона длин волн. ЖИГ-генераторы используют при создании измерительных устройств, например свип-генераторов анализаторов цепей, где не требуется быстрого сканирования. Достоинства таких генераторов по перестройке частоты сопровождаются увеличением размеров, определяемых магнитной системой, что иллюстрирует рис. 17. Объем электромагнита на порядок превышает размеры генератора с механической или электрической (варакторной) перестройкой

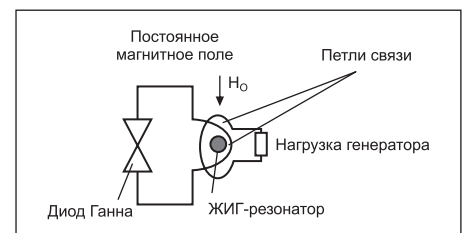


Рис. 16. Схематичное изображение ЖИГ генератора Ганна

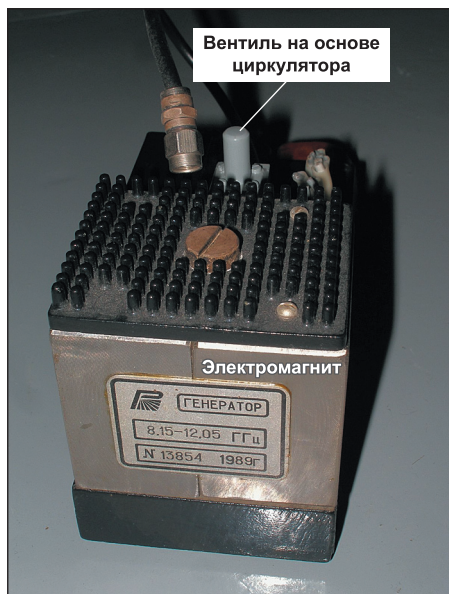


Рис. 17. ЖИГ-генератор Ганна 3-см диапазона длин волн (перестройка 8–12 ГГц). Электромагнит 50×50×60 мм, диод Ø3 мм и длиной 5 мм

частоты. С ростом частоты генерации напряженность магнитного поля, необходимая для работы ЖИГ-резонатора, линейно возрастает, что пропорционально увеличивает размер электромагнита. В миллиметровом диапазоне длин волн соотношение электронной части генератора уже на два порядка меньше размеров электромагнита генератора.

С ростом частоты технические решения СВЧ-генераторов трансформируются в направлении применения волноводных труб. Это объясняется снижением (ввиду дисперсии свойств диэлектриков) добротности МПЛ и ДР, что ухудшает спектральные характеристики генераторов. Кроме того, уменьшение выходной мощности диодов на более высоких частотах (определяемое физическими явлениями в полупроводниковых средах диодов) указывает на важность формирования систем суммирования мощности на диодах. Особенно актуальна эта за-

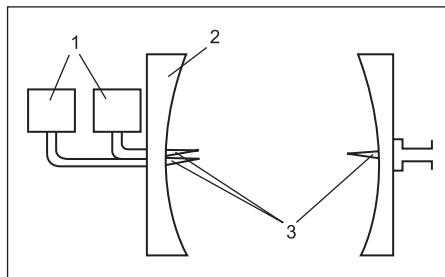


Рис. 18. Схематичное изображение сумматора мощностей волноводных генераторов (1), связанных с открытым резонатором (2) через антенные возбуждители (3)

дача при создании генераторов крайне высоких частот (КВЧ-генераторов).

Известны три варианта построения сумматоров мощности диодных генераторов (ГД, чтобы не путать с диодом Ганна — ДГ):

- с помощью многополюсных схем-сумматоров;
- со сложением сигналов в общем резонаторе;
- со сложением сигналов в пространстве с помощью фазированной антенной решетки.

Чаще всего суммируются сигналы однотипных ГДГ [20, 21]. При этом эффект повышения выходной мощности сложения n автогенераторов сопровождается в $\sim\sqrt{n}$ раз улучшением соотношений сигнал/шум выходного сигнала сумматора. В миллиметровом диапазоне длин волн, с переходом от полых волноводных труб к структурам диэлектрических волноводов, меняется и тип резонансных систем. Колебательные системы ГДГ образуют открытые резонаторы Фабри — Перо, дифракционные решетки Брегга и т. п. При этом применяют два типа диодных генераторов. В первом — в открытом резонаторе суммируют мощности нескольких волноводных генераторов (рис. 18), а во втором — происходит суммирование мощностей нескольких диодов, размещенных внутри резонатора, например на поверхности его зеркала (рис. 19), и электромагнитно связанных с ним.

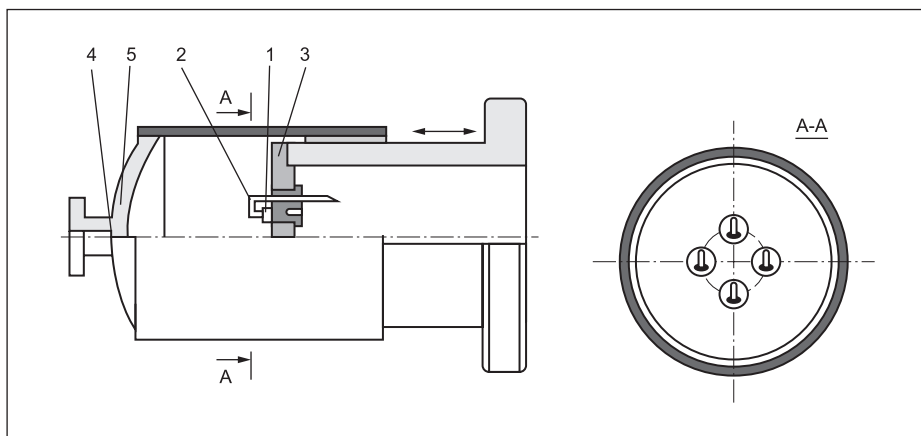


Рис. 19. Схематичное изображение сумматора мощностей генераторных диодов (1) в открытом резонаторе с зеркалами (3) и (5), с возбуждателями резонатора (2) и выходного волновода (4)

Классификация диодных генераторов

Приведенные сведения по построению СВЧ- и КВЧ-генераторов на эффекте отрицательного дифференциального сопротивления активного двухполюсника лишь качественно описывают многообразие конкретных технических решений по созданию таких устройств. Условно решения на основе генераторных диодов в западной литературе разделяют на следующие виды:

- автогенераторы непрерывной мощности фиксированных частот;
- автогенераторы непрерывной мощности с механической перестройкой (настройкой) частоты;
- автогенераторы непрерывной мощности с перестройкой (настройкой) частоты по напряжению питания диода;
- автогенераторы непрерывной мощности с электрической перестройкой (настройкой) частоты с применением варикапа (варакторного диода);
- автогенераторы непрерывной мощности с комбинированной (одновременно и с механической и с электрической) перестройкой частоты;
- импульсные генераторы;
- синхронизируемые генераторы;
- генераторы с фазовой автоподстройкой;
- генераторы с автоподстройкой частоты;
- генераторы с температурной подстройкой частоты генерации.

Однако подобное деление генераторных устройств весьма условно. Например, производство (даже малой серией) генераторов требует введения технологических подстроек, компенсирующих разброс параметров комплектующих. Такие подстройки, как правило, обеспечивают введением элементов механической подстройки частоты резонаторов, согласующих элементов и пр. Реже подстройки реализуют вариацией питания активного элемента, которая обеспечивается введением резистивных делителей напряжения. С другой стороны, в генераторах с электрической перестройкой частоты принципиально присутствует элемент механической подстройки частоты генерации в начальную (рабочую) точку. Все сказанное относится и к импульсным диодным генераторам.

Зарубежные производители генераторных устройств часто активно рекламируют какие-либо небольшие отличия моделей. Например, в устройствах с механической перестройкой частоты особо выделяют наличие микрометрического винта перемещения элемента перестройки частоты (обычного элемента перестройки частоты резонатора колебательной системы генератора). С точки зрения особенностей генератора такая опция не принципиальна, но на ней часто акцентируется внимание.

Особый класс генераторов с электрической перестройкой частоты представляют устройства с варикапной (варакторной) перестрой-

кой частоты. Эти генераторы называют генераторами, управляемыми напряжением (ГУН). Выделение их базируется на специальном функциональном назначении — основе генераторов с частотной подстройкой частоты и фазовой автоподстройкой частоты относительно опорного сигнала (это может быть «опорный генератор», чаще всего гармоника кварцевого генератора, или частотная точка на характеристике резонансной кривой стабильного резонатора).

Синхронизируемые генераторы условно можно отнести к усилительным устройствам, в которых мощный выходной каскад выступает в роли регенеративного усилителя маломощного источника СВЧ-сигнала.

Относительно особенностей генераторов с температурной компенсацией сдвигов частоты заметим, что такой опцией в той или иной мере снабжены любые генераторы. Другое дело, каким образом эффект температурной компенсации реализован. Так, если частота генерации контролируется частотой резонатора (при очень высокой нагруженной добротности последнего), то достаточно обеспечить высокую термостабильность последнего. Однако реально (ввиду «конечной» добротности резонаторов) самый простой вариант реализуется при взаимной компенсации температурных уходов параметров компонентов цепи, определяющих частоту генерации. Часто процесс термокомпенсации формируется противоположным смещением частоты генерации вследствие изменения частоты резонатора и смещения частоты за счет температурных изменений параметров активной области генераторного диода. Проще всего такой прием осуществляется при применении диэлектрических резонаторов, с широким спектром возможных значений температурных коэффициентов относительной диэлектрической проницаемости [22]. Все перечисленные варианты построения систем термокомпенсации смещений частоты генерации относятся к пассивным вариантам систем термокомпенсации. Лучшие варианты таких систем обеспечивают нестабильность частоты генераторов не выше $1 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Помимо пассивных систем термокомпенсации частоты автоколебаний, возможна реализация температурной стабилизации частоты на основе генератора с автоподстройкой частоты. При этом в качестве опорного сигнала можно применить отражение от термостабильного ДР [23].

К числу опций генераторных устройств можно отнести и различные вспомогательные узлы, например умножители частоты, системы управления питанием, системы управления термокомпенсаторами и т. п.

Комплекующие опции

Анализируя варианты построения диодных генераторов, обратим внимание

на растущее многообразие устройств, рассматриваемое научным сообществом и возникающее в результате появления на рынке предложений различных комбинаций генераторов с опциями, расширяющими и улучшающими характеристики автогенераторов. В числе таких опций в первую очередь следует упомянуть вентили в линии вывода мощности. Такие узлы могут быть как встроенными, так и внешним элементом генератора (рис. 17).

В качестве опции можно рассматривать и внешние устройства умножения частоты сигнала АГ, если умножитель не встроен в основной корпус генератора.

Кроме того, в качестве опции можно представить любой узел, подключенный к разьему АГ, обладающий специальными свойствами, ориентированными на применение именно с данным устройством АГ. К таким узлам можно отнести АГ опорного сигнала в случае построения системы подстройки частоты или фазы генератора, умножители и делители частоты, подключаемые к выходу АГ, и т. д.

Заключение

Проведенный обзор состояния рынка диодных генераторов позволяет определить основное направление усилий научной и технической мысли по развитию СВЧ и КВЧ активных устройств на основе диодов Ганна и ЛПД. Надо отметить видимое преимущество зарубежных производителей по широте спектра проводимых работ и предлагаемой продукции. Тем не менее в этом направлении электронной техники отставание отечественной промышленности может быть восполнимым, конечно, при определенных вложениях, которые представляются относительно умеренными. ■

Литература

1. Электроника. Энциклопедический словарь. Гл. ред. Колесников В.Г. Советская энциклопедия, 1991.
2. Голант М.Б., Бобровский Ю.Л. Генераторы СВЧ малой мощности. Вопросы оптимизации параметров. М.: Советское радио, 1977.
3. Güttich U. Active Elements Used in Microstrip Dielectric Resonator Oscillators // Microwave Journal. April 1996.
4. Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ. Книга 2. Под ред. Гудкова А.Г. и Попова В.В. М.: Автотест, 2013.
5. НПП «Исток» им. Шокина». www.istokmw.ru
6. Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов (АО НИИПП). www.niipp.ru
7. Microsemi RFIS Integrated Solution. www.microsemi.com
8. Linwave Electronic Manufacturing Services. www.linwave.co.uk
9. Microwave Technology Centre Teledyne-e2v. www.teledyne-e2v.com

10. Microwave Device Technology. www.mdtcorp.com
11. Стороженко И. П., Ярошенко А. Н., Кайдаш М.В., Аркуша Ю.В. Моделирование варизонных ALINN-диодов Ганна. 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 10–14 сентября 2012.
12. Гончарук Н. М., Карушкин Н. Ф. Нитрид-галлиевый диод Ганна миллиметрового диапазона. 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 10–14 сентября 2012.
13. Животова Е. Н., Стороженко И. П. Резонансная частота диодов Ганна на основе варизонных полупроводников АЗ В5. 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 10–14 сентября 2012.
14. QwinStar Technology, Inc (QID). www.qwinstar.com
15. Terahertz Imaging Systems (Terasense Group, Inc.). www.terasense.com
16. Deen S. Designing Compact V/W-Band Gunn Sources // Microwaves&RF. 2011. No. 4.
17. Алексейчик Л. В., Бурков В.Д., Геворкян В.М., Казанцев Ю. А. Авторское свидетельство № 633411. Сверхвысокочастотный генератор // Бюллетень изобретений. 1978. № 42.
18. Алексейчик Л. В., Бродуленко И. И., Геворкян В. М. и др. Состояние и перспективы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в радиоэлектронике. Часть II. Пассивные и активные СВЧ-устройства с миниатюрными диэлектрическими резонаторами. Обзоры по электронной технике. Серия 1 // Электроника СВЧ. 1982. Вып. 2.
19. Кувшинов В. В., Майстренко А. ЖИГ-генераторы и синтезаторы частот компании Micro Lambda Wireless // Компоненты и технологии. 2015. № 9.
20. Геворкян В. М., Ковтунов Д. А. Состояние и перспективы создания сумматоров мощностей полупроводниковых генераторов. Обзоры по электронной технике. Серия 1 // Электроника СВЧ. 1989. Вып. 18.
21. Згуровский М.З., Ильченко М.Е., Кравчук С. А. и др. Микроволновые устройства телекоммуникационных систем. Т. 2. Устройства приемного и передающего трактов. Проектирование устройств и реализация систем. Политехника, 2003.
22. ВЧ и СВЧ керамические материалы и микроволновые элементы. Каталог продукции ООО «Керамика», 2004.
23. Gorevoy A. A Low Noise Oscillator Based on a Conventional Dielectric Resonator // Microwave Journal. Nov. 2013.
24. Геворкян В. М., Кочемасов В. Н. Объемные диэлектрические резонаторы. Основные типы. Характеристики. Производители. Часть 1 // Электронная техника. Наука. Технология. Бизнес. 2016. № 4.
25. Ducommun Technologies. www.ducommun.com