

К. т. н. Н. Ф. КАРУШКИН

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»

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

УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДНЫХ СТРУКТУР

Проведен анализ достигнутого уровня параметров и основных путей создания умножителей частоты, выполненных на основе полупроводниковых диодных структур, эффективных в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Рассмотрены диодные генераторы гармоник; умножители частоты, принцип действия которых основан на нелинейности зависимости их реактивных параметров от напряжения; умножители частоты высокой кратности на лавинно-пролетных диодах, действующих в режиме радиоимпульсного возбуждения колебаний в области высоких частот; умножители частоты на диодных гетероструктурах и квантовых сверхрешетках в терагерцевом диапазоне.

Ключевые слова: миллиметровый диапазон, варактор, диод Ганна, ISIS-диод, лавинно-пролетный диод, диод с барьером Шоттки, InP-диод, кратность умножения частоты, гетероструктуры, квантовые сверхрешетки, ТГц-излучение.

Расширение рабочего диапазона радиочастот в сторону их увеличения является важной и актуальной задачей для создания радиоэлектронной аппаратуры с высокими техническими характеристиками. Ее решение достигается путем создания источников сигналов сверхвысокой частоты (**СВЧ**) с применением новых принципов генерации и технологий, в связи с чем возрастает интерес к вопросам генерации сигналов в миллиметровом и терагерцевом диапазонах. Создание диодов Ганна, лавинно-пролетных диодов и резонансно-туннельных диодов позволило существенно продвинуться в коротковолновую часть СВЧ-диапазона, однако здесь практически невозможно добиться требуемого уровня параметров радиоэлектронной аппаратуры, используя полупроводниковые активные элементы.

Другим, более предпочтительным, путем создания источников мощности в коротковолновой части СВЧ-диапазона является разработка эффективных полупроводниковых умножителей частоты низкочастотных сигналов, формируемых при использовании уже разработанных источников с высокими энергетическими спектральными и диапазонными характеристиками [1–6]. С помощью полупроводниковых умножителей частоты осуществляется переход в заданный участок миллиметрового или терагерцевого диапазона, где уже реализуются энергетические характеристики аппаратуры, в значительной степени определяю-

щие ее потенциал и надежность. Кроме того, полупроводниковые умножители частоты являются важнейшими компонентами электронной техники при создании синтезаторов частоты, имеющих, как правило, меньший уровень шума по сравнению с автономными генераторами при отстройке частоты от несущей в ближней зоне на 0,3–2 кГц [7].

В настоящее время активно исследуются однокаскадные умножители частоты высокой кратности (более 10), поскольку они обеспечивают меньший уровень шумов, энергопотребление, габариты и массу, что особенно важно для применения их в работе бортовых систем.

В представленной работе проводится анализ основных путей создания и достигнутого уровня параметров умножителей частоты на полупроводниковых диодных структурах, а именно:

- умножителей, принцип действия которых основан на нелинейности зависимости их реактивных параметров от напряжения;
- умножителей высокой кратности на лавинно-пролетных диодах;
- умножителей на основе квантовых сверхрешеток;
- генераторов гармоник.

При этом также предложены направления совершенствования характеристик полупроводниковых структур с целью улучшения и оптимизации параметров приборов.

Умножители частоты на основе диодов с нелинейной емкостью

Основными полупроводниковыми элементами с нелинейной реактивностью являются варакторы — диоды с емкостью, управляемой напряжением. Известны также диоды с нелинейной реактивностью индуктивного характера — диоды на лавинно-пролетных полупроводниковых структурах.

К настоящему времени достаточно полно изучен процесс умножения частоты на нелинейной емкости, определены электрические параметры варактора, характеризующие его работу в режиме умножения, установлена связь электрических параметров варактора с выходными характеристиками устройства. Для качественной характеристики варактора обычно используют четыре параметра: пробивное напряжение $U_{пр}$, емкость перехода C при определенном отрицательном смещении, тепловое сопротивление R_T и максимальную рассеиваемую мощность $P_{рас}$. Степень приближения умножительного варакторного диода к идеальному, для которого возможно достижение максимального коэффициента преобразования, характеризуется качеством диода (его добротностью Q_B) и критической частотой

$$f_{кр} = \frac{1/C_{min} - 1/C_{max}}{2\pi R_B}, \quad (1)$$

где C_{min} — минимальная емкость варактора, определяемая как емкость при напряжении, равном напряжению пробоя $U_{пр}$;

C_{max} — максимальная емкость варактора, определяемая при положительном смещении;

R_B — сопротивление варактора, $R_B = R_s + R_k$;

R_s, R_k — сопротивление растекания и контактов соответственно.

Для оценки варактора как умножителя применяется предельная частота $f_{пр}$ и нормализованная мощность $P_{норм}$:

$$f_{пр} = \frac{1}{2\pi R_B C_{min}}; \quad (2)$$

$$P_{норм} = \frac{(U_{пр} + \phi)^2}{R_B}, \quad (3)$$

где ϕ — контактная разность потенциалов.

Предельная частота характеризует степень приближения варактора к идеальному конденсатору без учета потерь на рабочей частоте, а нормализованная мощность характеризует способность варактора выдерживать воздействие высоких уровней СВЧ-мощности. Чем больше нормализованная мощность диода, тем большая мощность основной частоты может быть преобразована в мощность выходной гармоники.

Создание эффективных умножителей частоты в миллиметровом диапазоне длины волны требует построения варакторов с критическими (предельными) частотами, превышающими входную частоту сигнала в десятки-сотни раз, т. е. $f_{кр} > 1000$ ГГц. При разработке умножителей применяются эпитаксиальные GaAs-диоды с минимальным контактным сопротивлением и минимальной емкостью. Высокая подвижность носителей в GaAs позволяет реализовать в варакторах малые значения омического сопротивления R_s . Нелинейность емкости варактора C_B определяется выражением

$$C_B(U) = C_0(U_0) \left(\frac{U_0 + \phi_0}{U_0 - \phi_0} \right)^\gamma, \quad (4)$$

где $U = U_0 + U(t)$;

U_0 — напряжение смещения;

ϕ_0 — контактная разность потенциалов;

$U(t)$ — зависящая от времени периодическая составляющая напряжения на варакторе;

$C_0(U_0)$ — емкость варактора при напряжении смещения U_0 , $C_0(U_0) = C_0$.

В этом выражении показатель степени γ характеризует распределение примеси: для резких переходов $\gamma = 1/2$, для структур с минимальным распределением примеси $\gamma = 1/3$. Варакторные диоды, характеризующиеся различными значениями γ , находят применение в умножителях частоты миллиметрового диапазона. Диоды с резким переходом наиболее широко применяются для умножения частоты сравнительно слабых сигналов в два-три раза.

При использовании варакторов, работающих при любой величине γ ($1/2, 1/3$), увеличение номера гармоники N приводит к резкому уменьшению коэффициента передачи [8] (рис. 1).

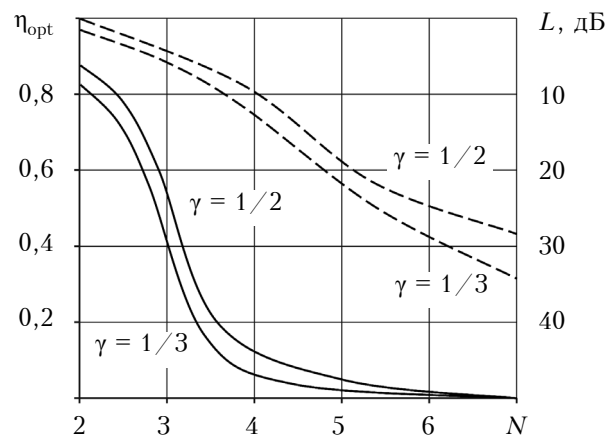


Рис. 1. Зависимость оптимального коэффициента передачи η_{opt} (сплошные линии) и потерь преобразования L (пунктир) от номера гармоники N для варакторов, работающих при $\gamma = 1/2$ и $\gamma = 1/3$

Заметное увеличение коэффициента передачи, особенно в умножителях с высоким номером гармоники, может быть достигнуто в режиме, когда на некоторой части периода входного сигнала напряжение на диоде заходит в положительную область и диод открывается, т. е. возникает небольшой прямой ток диода.

Необходимо отметить, что эффективность работы варактора в умножительном каскаде растет при увеличении степени нелинейности вольт-амперной характеристики (ВАХ) γ и добротности диода, а уровень преобразуемой мощности растет с увеличением пробивного напряжения варактора. Исследования, направленные на создание диодных структур с законом изменения емкости, отличным от $1/2$ или $1/3$, привели к созданию диодов со сверхрезким $p-n$ -переходом, в котором используется особый закон распределения примеси.

Для увеличения добротности варакторного диода необходимо свести к минимуму величину последовательного сопротивления R_v , которая определяется геометрическими размерами $p-n$ -перехода, удельным сопротивлением материала рабочей области и наличием сопротивления омических контактов. При этом, однако, снижение R_v за счет уменьшения толщины рабочей области и удельного сопротивления ее материала приводит к уменьшению $U_{пр}$ и, следовательно, к снижению уровня рабочей мощности.

Одним из перспективных направлений развития умножительных диодов с повышенным уровнем СВЧ-мощности остается разработка диодов с накоплением заряда и резким восстановлением обратного сопротивления. В отличие от обычного варактора, работающего на отрицательной ветви ВАХ, в таком диоде используется «заход» сигнала в положительную область. При этом если время жизни неосновных носителей, инжектированных в положительный полупериод, больше полупериода входного сигнала, они не успевают рекомбинировать и при отрицательной полуволне напряжения движутся в виде компактного сгустка в сторону $p-n$ -перехода. Вследствие этого в течение определенного времени сохраняется аномально высокая отрицательная проводимость, и затем происходит резкое восстановление обратного сопротивления.

Описанный режим работы создает существенно нелинейную временную зависимость тока через $p-n$ -переход, богатую гармониками. Насыщенность гармониками увеличивается при уменьшении времени восстановления, что достигается созданием специального распределения примеси в $p-n$ -переходе. Использование для умножения частоты диодов с резким восстановлением обратного сопротивления приводит

к значительному увеличению уровня рабочей СВЧ-мощности и повышению кратности умножения. Диоды, предназначенные для работы с повышенным уровнем СВЧ-мощности, имеют специальный характер распределения удельного сопротивления в переходе, не такой, как в диодах с резким и плавным переходом, а именно: в большей части кристалла удельное сопротивление составляет менее $0,01 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, а вблизи обедненного слоя оно достигает $100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Такая структура дает возможность сочетать большое пробивное напряжение (до 300 В) с высоким значением добротности. В диодах такого типа выходная мощность является почти линейной функцией входной мощности. Изменяя смещение на умножителе в соответствии с уровнем приложенного сигнала, можно с достаточной точностью поддерживать на постоянном уровне процентное содержание гармоник в кривых тока, генерируемого благодаря эффекту накопления заряда. Кроме того, из-за слабой зависимости емкости перехода от напряжения смещения ($\gamma = 1/5$) расстройка контура при изменении напряжения сигнала сводится почти к минимуму.

Диоды с накоплением заряда (ДНЗ) обладают высокой степенью нелинейности, что позволяет осуществить генерацию гармоник высокого порядка в одном каскаде, не используя при этом специальных устройств для замыкания токов холостых частот.

К сожалению, пока еще не установлена теоретическая связь между электрическими параметрами ДНЗ и выходными параметрами умножителя частоты на высоком уровне мощности СВЧ. Кроме того, известная система параметров емкостного умножительного диода ($U_{пр}$, C_v , $f_{пр}$, $P_{рас}$, R_t , R_v) не может быть достаточной, поскольку активный элемент работает с эффектом накопления заряда. Увеличение выходной мощности варакторного умножителя частоты можно достигнуть последовательным соединением нескольких (M) диодов в единой конструкции, где каждый из M диодов собран на индивидуальной подложке (рис. 2).

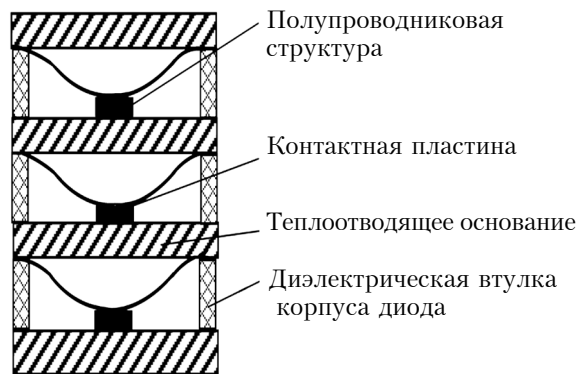


Рис. 2. Составной варакторный умножитель [9]

Недостатком такой конструкции является увеличение последовательного сопротивления и соответствующее уменьшение критической частоты при увеличении числа диодов. Создание составных варакторов в соответствии с рис. 2 увеличивает напряжение пробоя примерно в M раз, но затрудняет их применение в коротковолновой части миллиметрового диапазона. Проблему создания высоковольтных мощных варакторов миллиметрового диапазона решает применение ISIS-диодов (integrated series IMPAT structures) [10]. Структура таких диодов многослойная, состоящая из тонких слоев p - и n -проводимости, выращенных эпитаксиально на низкоомной подложке.

На рис. 3 представлена зависимость предельной частоты $f_{пр}$ от напряжения U для ISIS-диода с минимальной емкостью каждого перехода $C_{min} = 0,2$ пФ для различного количества слоев M . Здесь видно, что одновременно с увеличением критической частоты увеличивается напряжение пробоя.

Для того чтобы определить, можно ли использовать ISIS-диод в качестве источника большой мощности СВЧ на выходной частоте умножителя, необходимо знать его тепловое сопротивление. Его величина определяется как

$$R_{m \max} = \frac{l_i}{S_{pn} \lambda_{ti}} \frac{1+M}{2M} + \frac{1}{4\lambda_{to} r_{pn}}, \quad (5)$$

где λ_{to} — коэффициент теплопроводности материала теплоотводящего основания диода;

λ_{ti} — коэффициент теплопроводности i -й структуры, зависящий от температуры полупроводника;

S_{pn} — площадь p – n -перехода;

l_i — толщина i -го слоя структуры;

r_{pn} — радиус полупроводниковых структур.

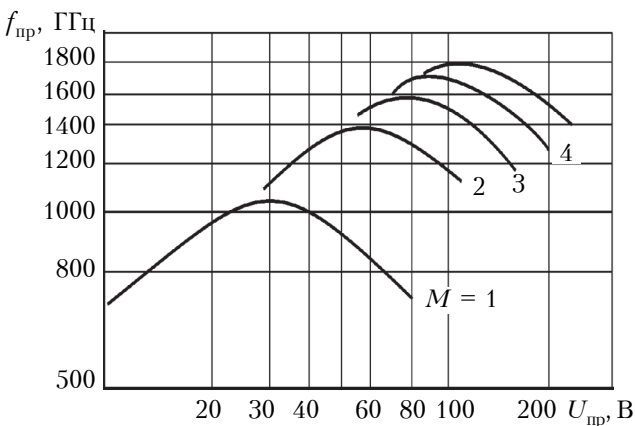


Рис. 3. Зависимость предельной частоты $f_{пр}$ от пробивного напряжения $U_{пр}$ для ISIS-диода при различном количестве слоев M с минимальной емкостью каждого перехода $C_{min} = 0,2$ пФ

На рис. 4 приведены зависимости выходной мощности ISIS-диода в непрерывном режиме от количества слоев, рассчитанные для фиксированной емкости перехода на каждой частоте, пропорциональной f^{-1} . Для каждой частоты здесь указаны значения эффективности преобразования η диода.

В [12] приведены результаты создания умножителей частоты на основе двух- и трехслойных структур. Преобразование от 47 до 94 ГГц производилось удвоителем частоты с двухслойным ISIS-диодом. Применялись GaAs-диоды с резким переходом, установленные в кварцевые корпуса емкостью 0,1 пФ. Индуктивность монтажной площадки в корпусе составляет 0,12 нГн, напряжение пробоя двух- и трехслойных ISIS-диодов — соответственно, 50 и 100 В. Высокочастотная цепь для удвоителя частоты выполнена с использованием входного и выходного волноводов, связанных коаксиальной линией, содержащей полосовой фильтр низких частот. Схема построения умножителя с коэффициентом умножения n приведена на рис. 5.

Высота входного 1 и выходного 2 волноводов при сочленении с коаксиальной линией 3 уменьшена в два раза по сравнению со стандартными размерами. В каждом из волноводов установлены скользящие поршни 4, 5 для согласования импеданса. Коаксиальная линия содержит фильтр низких частот 6 в цепи постоянного напряжения смещения, подводимого к диоду при помощи центрального проводника коаксиальной линии. В линию 3 включен также полосовой фильтр, пропускающий к диоду частоты входного сигнала и не пропускающий частоты гармоник. Включение в высокочастотную цепь ISIS-диода 8 производится при помощи фильтра и трансформатора импедансов 7, 9 в коаксиаль-

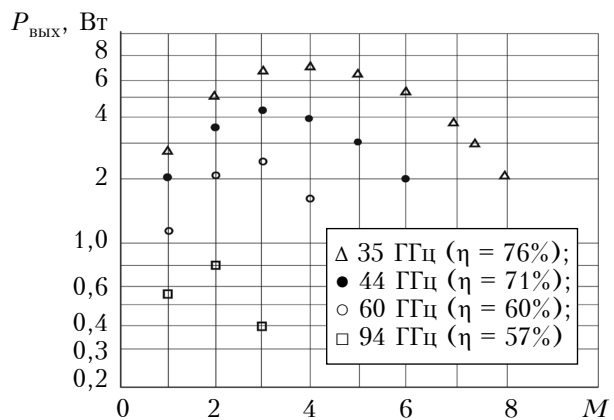


Рис. 4. Расчетные зависимости выходной мощности ISIS-диода в непрерывном режиме от количества p – n -переходов для различных значений частоты при температуре полупроводниковой структуры 140°C [11]

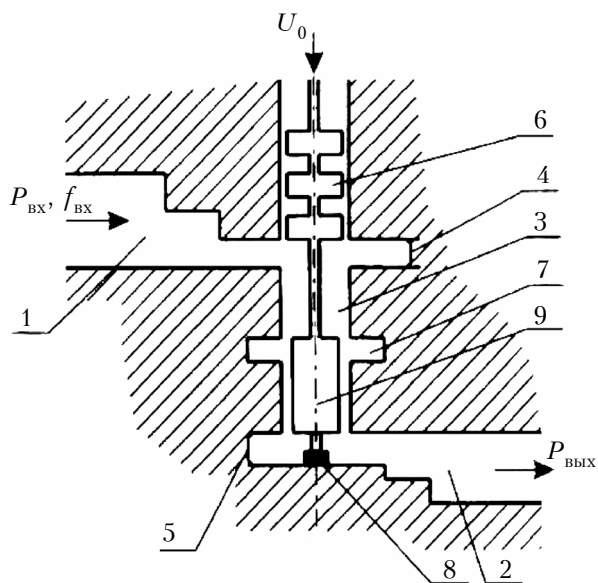


Рис. 5. Схема волноводно-коаксиальной конструкции умножителя частоты с двухслойным ISIS-диодом [12]

ной линии. Выходная мощность удвоителя частоты 47–94 ГГц составляет 22 дБм при входной мощности 29 дБм. В импульсном режиме работы выходная мощность удвоителя свыше 29 дБм достигается в диапазоне частот 93–95 ГГц при длительности импульса 2,5 мкс и скважности 20. Внутримпульсные изменения фазы импульсного выходного сигнала не превышают 3° при длительности импульса 15 мкс.

Значительный интерес представляет разработка умножителей в монокристаллическом и гибридно-интегральном исполнении с использованием трехслойного ISIS-диода [13]. Схема высокочастотной цепи такого умножителя приведена на рис. 6. В нее включены микрополосковые линии входа 1 и выхода 2, согласующие отрезки линий 3, 4, 5 на входе и выходе, а также холостые отрезки радиальных линий 6, обеспечивающие оптимальную величину импедансов, приведенных к ISIS-диоду 7. В качестве ISIS-диода применена структура на основе GaAs, состоящая из трех варакторов с $p-n$ -переходами, выпол-

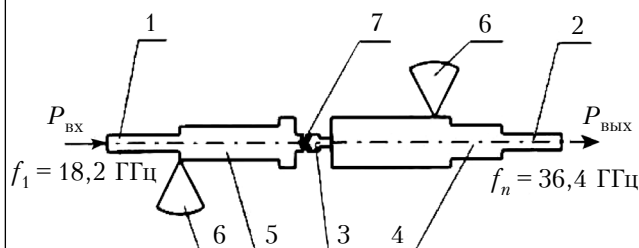


Рис. 6. Схема удвоителя частоты волн 8-мм диапазона в монокристаллическом или гибридно-интегральном исполнении с ISIS-диодом [13]

ненными в едином процессе многослойной эпитаксии. Размер схемы — 4×8 мм. Данный удвоитель частоты в гибридно-интегральном исполнении обеспечивал следующие параметры: входная частота 22 ГГц, выходная частота 44 ГГц, эффективность преобразования $\eta = 50\%$, выходная мощность в непрерывном режиме 4,4 Вт.

Умножители частоты большой мощности позволяют создавать многодиапазонные передающие устройства для РЛС при минимальных габаритах и стоимости конструкции.

На рис. 7 представлены конструкция и схема умножителя частоты импульсного действия большой мощности (единицы кВт и десятки сотни Вт) входного и выходного сигналов для РЛС, работающей в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. Умножитель включает в себя входной и выходной волноводы 1 прямоугольного сечения, связанные друг с другом штырем связи 3, в разрыве которого установлены полупроводниковые умножительные диоды 4. Во входном волновоме установлен режекторный фильтр 2, пропускающий частоты входного сигнала и отражающий рабочие частоты выходного сигнала. Напряжение смещения U подается через вывод 5, настройка умножителя производится короткозамыкающим поршнем в выходном волновоме 6.

Штырь связи, проходящий через широкую стенку выходного волновода перпендикулярно к ней, является одновременно продолжением внутреннего проводника плеча Т-образной

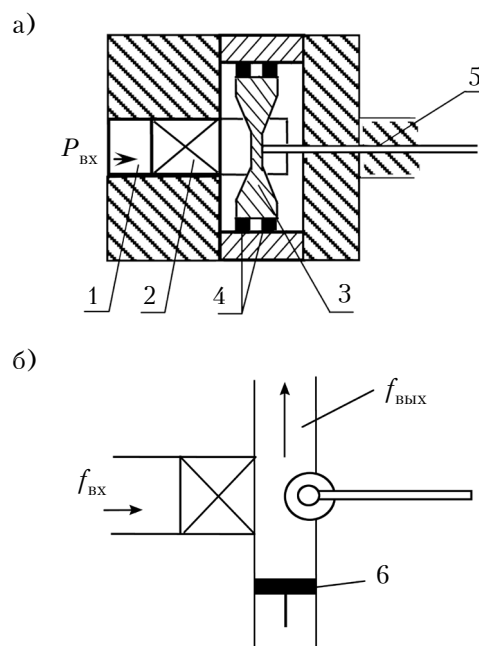


Рис. 7. Конструкция (а) и схема (б) импульсного умножителя частоты [14]

коаксиальной системы, где два других симметричных плеча выполнены в виде неоднородных линий с коническими внутренними проводниками. Между большими по диаметру торцами внутренних проводников неоднородных коаксиальных линий с увеличивающимся диаметром внутренних проводников и короткозамыкающими стенками теплоотвода установлены параллельно включенные умножительные диоды. Умножительные диоды устанавливаются в область торцов Т-образной коаксиальной системы, где по сравнению с системами другой формы величина волнового сопротивления $W_{ок}$ снижена благодаря тому, что в ней диаметр d_2 внутреннего проводника увеличен и приближается к диаметру d_1 наружного цилиндрического проводника коаксиала. Это позволяет обеспечить значительное уменьшение напряжения сигнала на умножительных диодах. При уровне СВЧ-мощности входного сигнала P_1 в каждом симметричном плече Т-образной коаксиальной системы амплитуда СВЧ-напряжения определяется выражением

$$U_m = \sqrt{120P_1 \ln \frac{d_1}{d_2}}. \quad (6)$$

Например, при $d_1 / d_2 < 1,18$ волновое сопротивление $W_{ок} \leq 10$ Ом, тогда при $P_1 \leq 1$ кВт получим величину напряжения $U_m \leq 140$ В.

Умножительные диоды, рассчитанные на работу с такими амплитудами СВЧ-сигнала, реализуются при создании многопереходных ISIS-структур. Они удовлетворяют требованиям, связанным с обеспечением нормального теплового режима при уровне непрерывной мощности до 10 Вт.

Число включаемых диодов M определяется требованием обеспечения необходимого теплоотвода с диодов и минимизации последовательно включенного в СВЧ-цепь паразитного омического сопротивления растекания. В режимах работы импульсного умножителя частоты с длительностью импульса τ_n , превышающей время поперечной тепловой релаксации $\tau_{пр} = D^2 / (4\alpha_t)$, где α_t — коэффициент теплопроводности, увеличение числа параллельно включенных диодов уменьшает тепловое сопротивление в $M^{1/2}$ раз. Анализ показывает, что паразитное омическое сопротивление системы, состоящей из M параллельно включенных диодов, может быть определено выражением

$$R_{sM} = \frac{\rho_s h_s}{d_s \pi D \sqrt{M}} + \frac{R_m}{M} + \frac{\sqrt{2}\rho_s}{4\pi d_s M} \operatorname{Re} \left(\operatorname{th} \frac{h_s}{\rho_s} (1+j) \right), \quad (7)$$

где ρ_s — удельное сопротивление подложки полупроводниковой структуры;

h_s — толщина подложки;

D — диаметр $p-n$ -перехода одной структуры;

d_s — глубина скинслоя в материале подложки;

R_m — контактное сопротивление структуры.

Увеличение числа параллельно включаемых умножительных диодов приводит к существенному уменьшению омического сопротивления R_{sM} , что увеличивает их критическую частоту и КПД. В различных вариантах умножителя, представленного на рис. 7, возможно применение двухдрейфовых кремниевых $p^+-p-n-n^+$ -диодов с длиной пролета носителей в p - и n -областях $l_p = l_n = 2$ мкм и концентрацией $N_p = N_n = (1-3) \cdot 10^{16}$ см⁻³. Данная структура диода оптимизирована для умножения входного сигнала в сантиметровом диапазоне и получения выходного сигнала в 8-мм диапазоне длины волны. Умножительные диоды работают в режиме отсечки, когда СВЧ-напряжение заходит в область положительной ветви вольт-амперной характеристики диода.

Анализ показывает, что в суммарной цепи присутствуют только четные гармоники тока, и поэтому конструкция умножителя может работать как удвоитель или учетверитель частоты входного сигнала.

Умножители частоты высокой кратности

Один из путей создания умножителей частоты высокой кратности основан на применении свойств лавинно-пролетного диода (ЛПД) в режиме эффективного преобразования частоты высокостабильного низкочастотного сигнала. Известно [15], что этот режим обеспечивает уровень мощности выходного сигнала на N -й гармонике $P_{вых} \sim 1/n$, что существенно превосходит достижимые характеристики умножителей на диодах с накоплением заряда, для которых $P_{вых} \sim 1/n^2$ [16].

Теоретическое исследование характеристик умножителя частоты на лавинно-пролетном диоде основано на схеме включения диода в СВЧ-цепь генератора и подведении к ЛПД напряжения $U(t) = U_0 + U_m \sin \omega t$. В результате действия опорного напряжения с частотой ω при достаточно большой амплитуде U_m в высокочастотной цепи на временных интервалах τ_n проходят импульсы с высокой частотой ω_0 , лежащей в рабочей полосе частот генератора. При определенных условиях происходит фазовая синхронизация высокочастотных колебаний N -й гармоники опорного сигнала, и в результате возникает последовательность когерентных СВЧ-сигналов с частотой $\omega_0 = n\omega$.

Механизм преобразования частоты высокой кратности с применением ЛПД в настоящее время полностью не раскрыт и в разных работах трактуется неоднозначно. В одних полагается, что значительная нелинейность лавинного процесса в ЛПД играет первостепенную роль в достижении высокой эффективности умножения частоты, и при этом анализируются методы обострения импульсов тока через диод с целью увеличения содержания гармоник. В других работах, например [17–19], показано, что высокая эффективность активного умножения частоты на ЛПД определяется в основном механизмом возбуждения колебаний в пределах длительности тока через диод и фазовой синхронизацией этих СВЧ-колебаний гармониками периодической последовательности импульсов тока. Механизм активного умножения частоты в электронных приборах известен и описан в [20, с. 120–127].

Более точное представление о работе ЛПД в режиме умножения частоты дает его исследование в самосогласованном режиме. В нашем случае такие исследования проводились в предположении, что на ЛПД подается напряжение смещения и заданное напряжение низкой частоты, а нагрузкой ЛПД является параллельный контур, настроенный на высокую частоту [21].

Эквивалентная схема умножителя частоты на ЛПД представлена на **рис. 8** в упрощенном виде, в ней не учитывается ряд особенностей, связанных с управлением током ЛПД. Совместное решение уравнений, описывающих процессы в ЛПД и в контуре, позволяет исследовать характер высокочастотных колебаний в нагрузке контура (амплитуду колебаний, ее зависимость от времени, частоту колебаний, возможность самовозбуждения). В нашем случае параметры контура подбирались таким образом, чтобы часто-

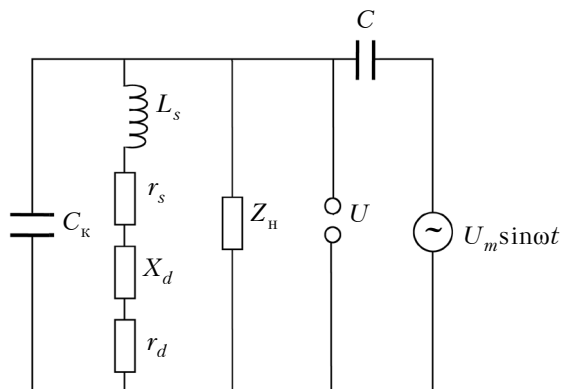


Рис. 8. Упрощенная эквивалентная схема умножителя на ЛПД:

C_k — емкость корпуса; r_s — сопротивление растекания; L_s — индуктивность контактов; r_d — отрицательное сопротивление ЛПД; X_d — реактивное сопротивление диодной структуры ЛПД; Z_n — сопротивление нагрузки

та генерации в режиме самовозбуждения была выше частоты низкочастотного сигнала на заданную величину.

Важным является вопрос, 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 [19], 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 генератора на ЛПД синхронизация наблюдается только в очень узкой полосе. В режиме усиления на отрицательном сопротивлении ЛПД синхронизация наблюдается в достаточно широком интервале изменений низкой частоты.

Следует отметить, что, несмотря на потенциальные возможности работы ЛПД на очень высоких частотах, существует целый ряд явлений, ограничивающих работу ЛПД в этом диапазоне частот. Одно из основных — поведение последовательного сопротивления растекания подложки и сопротивления контактов. С увеличением частоты удельное отрицательное сопротивление активного слоя ЛПД падает, и частота, на которой сопротивление растекания становится равным отрицательному сопротивлению, является предельной для данного диода.

Особое внимание при разработке генераторов и умножителей в коротковолновой части миллиметрового диапазона следует обращать на тепловые режимы работы диода, поскольку перегрев $p-n$ -перехода может не позволить реализовать необходимое для данного диапазона значение плотности тока. Важной причиной, ограничивающей выходную мощность ЛПД на высоких частотах, является трудность согласования очень малого импеданса диода с импедансом внешней электродинамической СВЧ-системы.

Анализ импедансных амплитудно-частотных характеристик ЛПД показывает, что при значениях амплитуды сигнала, соответствующих максимальной электронной мощности, и оптимальном диаметре $p-n$ -перехода модуль отрицательного сопротивления полупроводниковой структуры не превышает 1,0–1,5 Ом. В связи с этим, при непосредственном включении ЛПД в высокочастотную цепь с нагрузкой, равной волновому сопротивлению линии передачи, необходимо обеспечить высокий коэффициент трансформации активной составляющей импеданса нагрузки. Обеспечение высокого коэффициента транс-

формации импеданса диода при его включении в цепь СВЧ является основной особенностью создания высокочастотных систем генераторно-преобразовательных и усилительных устройств на ЛПД с минимальными энергетическими потерями. При выполнении такого трансформатора с минимальными собственными потерями и коэффициентом трансформации импедансов в высокочастотную цепь включают трансформированные отрицательные сопротивления диода, которые по модулю превышают сопротивление потерь в цепи включения диода. В нашем случае целесообразно рассматривать диэлектрический корпус диода в качестве трансформатора импеданса.

На рис. 9 представлены зависимости СВЧ-мощности в нагрузке контура, отнесенной к единице площади кристалла, от фазы низкочастотного сигнала. Здесь видно, что резкого снижения выходной мощности $P_{\text{вых}}$ при изменении номера гармоники умножителя не наблюдается, как это могло бы следовать из простого спектрального разложения формы тока. Таким образом, анализ зависимости выходной мощности от режима работы и параметров внешней электродинамической системы позволяет сделать вывод, что радиоимпульсное умножение происходит одновременно с усилением сигнала ВЧ гармонической составляющей.

Увеличение добротности ВЧ-контура приводит к резкому падению максимального значения выходной СВЧ-мощности, поскольку колебания в контуре нарастают медленнее. Кроме того, при увеличении добротности срыв режима синхронизации (т. е. граница области, где фаза ВЧ-колебаний привязана к периоду НЧ-колебаний)

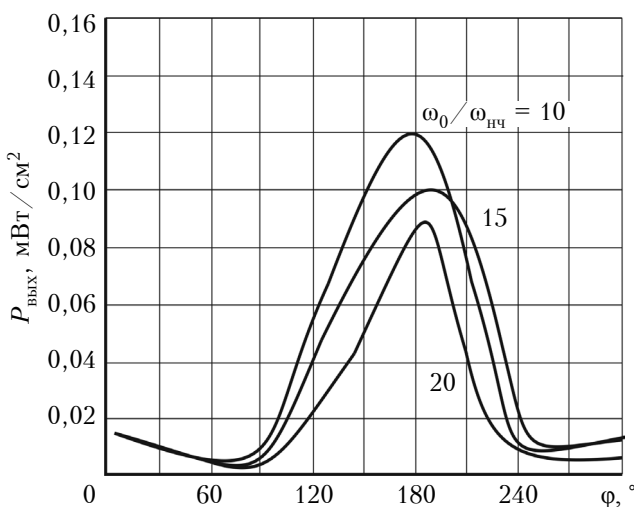


Рис. 9. Зависимость выходной мощности $P_{\text{вых}}$ в нагрузке ВЧ-контура от фазы φ напряжения НЧ-сигнала при различных значениях его частоты

наблюдается при меньших значениях плотности тока. Таким образом, для обеспечения оптимальной работы ЛПД в режиме умножения добротность ВЧ-контура должна быть минимальной.

Для получения оптимальных характеристик умножителя необходимо оптимизировать профиль легирования структуры диода, что позволяет уменьшить сопротивление области пролета в случаях, когда напряжение на диоде меньше напряжения пробоя, и отдалить область лавинного резонанса от рабочей области частот. Колебания нарастают, когда ток питания $I_0(t)$ превышает пусковой ток $I_{\text{п}}$. Если в цепь питания ввести внешний гармонический сигнал с частотой ω на определенных временных интервалах при условии $I_0 > I_{\text{п}}$, суммарное сопротивление контура R_{Σ} будет отрицательным ($R_{\Sigma} = -r_d + r_s$), т. е. возникнут условия для нарастания колебаний в высокочастотной цепи с частотой выходного сигнала $n\omega$, близкой к собственной частоте ω_0 .

Проведенный анализ работы активного умножителя частоты на ЛПД высокой кратности позволяет сделать следующие выводы:

- эффективное умножение частоты достигается при реализации резонанса высокочастотной цепи ЛПД. При этом необходимо обеспечить условие резонанса $X_d \ll 1/(\omega_0 C_k)$ и вывести область лавинного резонанса из рабочей полосы частот. Последнее можно достичь формированием профиля легирования структуры, близкой к структуре $p-i-n$ -диода;
- параметры высокочастотной цепи целесообразно выбирать такими, при которых ее добротность будет минимальной и будет выполняться условие резонанса вблизи рабочей частоты ω_0 ;
- принципиально важным условием нормальной работы умножителя является обеспечение эффективного теплоотвода от диода.

На рис. 10 приведена схема конструкции умножителя частоты высокой кратности на ЛПД миллиметрового диапазона. Изменяя длину короткозамкнутого шельфа коаксиальной линии 3 мож-

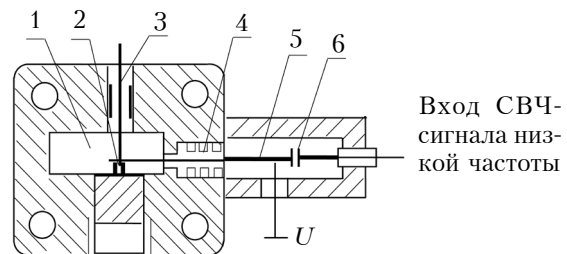


Рис. 10. Конструкция умножителя высокой кратности на ЛПД:

- 1 — волноводное окно; 2 — ЛПД; 3 — коаксиальная линия; 4 — фильтр низкой частоты радиального типа; 5 — полосковая линия; 6 — емкость

но добиться последовательного резонанса, способного расширить рабочую полосу умножителя.

На **рис. 11** показана конструкция умножителя частоты на ЛПД, применяемая в коротковолновой части миллиметрового диапазона, где коаксиальная линия, пересекающая волновод на узкой стенке волновода, нагружена на переменную емкость. Средняя длина кольца, образованного внутренней цилиндрической поверхностью и поверхностью внутреннего проводника, составляет $L_{\text{ср}} = n/\lambda$.

Активные умножительные модули на лавинно-пролетных диодах непрерывного и импульсного действия разработаны в НИИ «Орион» (г. Киев, Украина) для использования как в аппаратуре общего применения, так и в бортовой аппаратуре в диапазоне частот 80–150 ГГц. Умножительные модули используются в составе когерентных приемо-передатчиков W-диапазона, а также в аппаратуре цифровых радиорелейных станций. Функциональный однокаскадный активный умножительный модуль преобразует частоту сигнала сантиметрового диапазона (5–15 ГГц) в частоту миллиметрового диапазона (80–150 ГГц) с высокой эффективностью (потери преобразования соответствуют закономерности n^{-1}) без деградации фазы входного сигнала. Уровень вносимого фазового шума определяется соотношением $20 \lg n$. Конструктивно умножитель состоит из волноводной умножительной камеры,

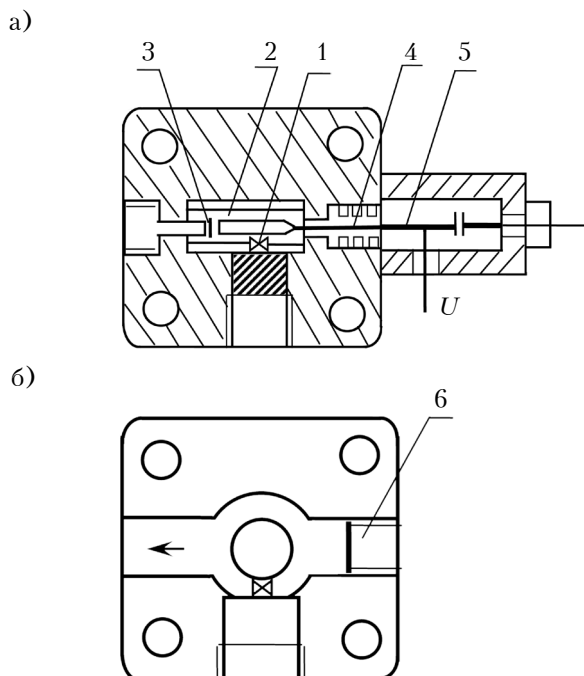


Рис. 11. Конструкция (а) и схема (б) умножителя высокой кратности на ЛПД:

1 — ЛПД; 2 — окно выходного волновода; 3 — настроечный винт; 4 — фильтр радиального типа; 5 — полосковая линия; 6 — короткозамыкающий поршень

транзисторного усилителя входного сигнала сантиметрового диапазона, волноводного вентиля, волноводного полосково-пропускающего фильтра и драйвера [22; 23, с. 201–222].

Умножители частоты на диодных гетероструктурах и квантовых сверхрешетках терагерцевого диапазона

В последнее три десятилетия обширным полем деятельности для разработчиков электронных компонентов стало освоение ТГц-области спектра электромагнитного излучения, лежащего между высокочастотным радиодиапазоном и дальним инфракрасным. Громадный интерес к этой области спектра обусловлен тем, что существует масса предложений по специальным, научным и коммерческим применениям этого излучения. В то же время, регистрация спектров поглощения газов и исследуемых сред требует наличия источников излучения, имеющих стабильность частоты 10^{-8} – 10^{-9} и перестраиваемых по диапазону [24, 25].

Традиционные методы создания таких источников, работающих в микроволновой части спектра, малоприемлемы, поскольку для увеличения частоты генерации требуется обеспечить как можно более короткое время жизни носителей в активной области. С другой стороны, оптические методы полупроводниковой электроники неприемлемы, поскольку используют межзонные переходы полупроводниковых материалов, энергия которых на порядок больше энергии кванта ТГц-излучения.

Мощными источниками терагерцевого излучения, основанными на переносе носителей заряда, являются синхротроны и лазеры на свободных носителях, однако дороговизна и габариты препятствуют их использованию даже для сугубо научных применений.

Относительно простой и эффективный путь получения излучения со стабильной частотой состоит в умножении частоты опорного источника. Основные успехи в повышении выходной мощности умножителей на сверхвысоких частотах связаны с применением диодов Шоттки планарной геометрии при использовании нескольких диодов, включенных по балансной схеме [26]. Твердотельные источники излучения на базе таких умножителей демонстрируют на частоте около 900 ГГц выходную мощность в непрерывном режиме на уровне 0,5–0,6 мВт [27].

В качестве альтернативного активного элемента для СВЧ-умножителя были предложены гетеробарьерные варакторные (ГБВ) диоды [28]. В таких диодах тонкий нелегированный слой более широкозонного материала (например, AlAs или AlGaAs), расположенный между двумя легиро-

ванными слоями узкозонного материала n -типа (например, GaAs), создает потенциальный барьер для электронов в зоне проводимости. При приложении внешнего напряжения с одной стороны широкозонного барьера происходит накопление электронов, а с другой формируется обедненная область, ширина которой увеличивается по мере роста напряжения, что обуславливает соответствующее уменьшение барьерной емкости. Нелинейное изменение комплексного сопротивления ГБВ-диодов используется для реализации умножения частоты. При этом симметричная форма вольт-фарадной характеристики позволяет реализовать генерацию только нечетных гармоник. Для улучшения теплоотвода используется монтаж кристалла ГБВ-диода на поверхность кремниевой подложки [29].

В [28] утроитель частоты с использованием ГБВ-диода имеет выходную мощность 185 мВт на частоте 107 ГГц в рабочей полосе 15% при коэффициенте преобразования 23%. ГБВ-диод выполнен с использованием выращенных на подложках InP гетероструктур InAlAs/InGaAs/AlAs с несколькими последовательно расположенными барьерными слоями.

В [30–32] описывается технология изготовления структур InGaAs/InAlAsAlAs для гетеробарьерных варакторов с толщиной AlAs-вставок 2 нм. Предварительные испытания умножителя частоты на варакторе такого типа при кратности 3 на частоте 94 ГГц показали, что в импульсном режиме $P_{\text{вых}} = 220$ мВт при уровне входной мощности $P_{\text{вх}} = 1$ Вт, в непрерывном режиме $P_{\text{вых}} = 80$ мВт при $P_{\text{вх}} \approx 500$ мВт.

На рис. 12 приведена экспериментальная вольт-фарадная характеристика типовых ГБВ-диодов.

В настоящее время интерес к частотному диапазону 0,3–10 ТГц возрос в связи с новыми возможностями для проведения исследований в об-

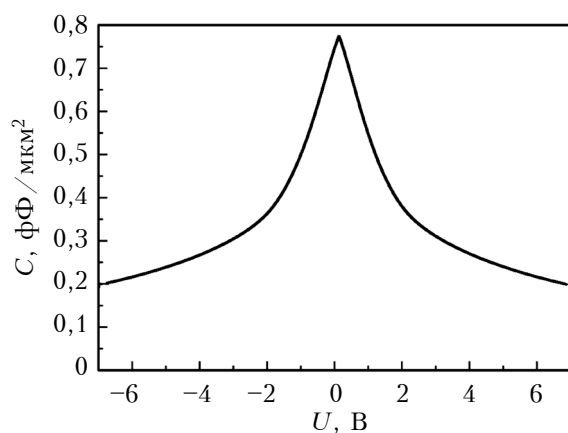


Рис. 12. Вольт-фарадная характеристика тестовых ГБВ-диодов, изготовленных на основе гетероструктур InGaAs/InAlAsAlAs с толщиной AlAs-вставок 2 мкм [31, 32]

ласти спектроскопии и радиоастрономии. С разработкой сверхпроводящих болометров появились условия для создания приемников с предельно низкими шумовыми характеристиками, близкими к квантовому пределу [24].

Для создания гетеродинов для таких приемных устройств терагерцевого диапазона частот перспективными являются умножители частоты с использованием квантовых полупроводниковых сверхрешеток [33–36]. В [35] показана возможность их применения для целей спектроскопии высокого разрешения. Сверхрешетка представляет собой периодическую полупроводниковую структуру, состоящую из тонких слоев двух полупроводников, повторяющихся в одном направлении. Период по толщине выбирается меньше длины свободного пробега электронов, но больше постоянной кристаллической решетки. Возникающий в результате периодический потенциал изменяет зонную структуру исходных полупроводников таким образом, что зона проводимости разбивается на совокупность энергетических мини-зон. Нелинейность тока сверхрешеток обусловлена брегговским отражением электронов проводимости и процессами релаксации электронов в мини-зоне.

Существуют хорошие перспективы использования сверхрешеток в умножителях частоты с высокой кратностью гармоник в качестве источника ТГц-излучения. В [36] проведено экспериментальное исследование умножителей частоты на основе полупроводниковых сверхрешеток в ТГц-диапазоне. Структура сверхрешетки состоит из 18 периодов, что соответствует длине 112 нм. Каждый период включает 18 монослоев GaAs и 4 монослоя AlGaAs. Структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии в установке Riber 32P на полуизолирующей подложке GaAs. Вольт-амперная характеристика диодов на основе сверхрешеток имеет участок с отрицательной дифференциальной проводимостью, сохраняющейся в терагерцевом диапазоне частот (рис. 13), что указывает на перспективность та-

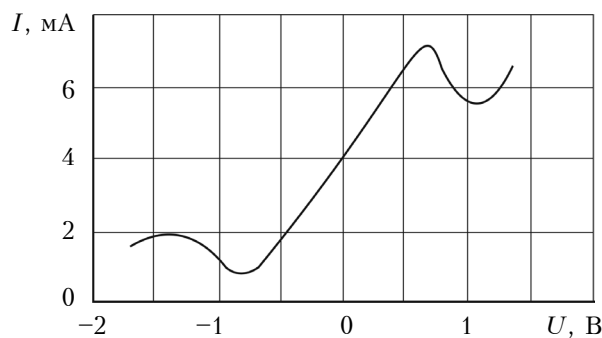


Рис. 13. Типичная зависимость тока диодов на основе полупроводниковых сверхрешеток от приложенного напряжения

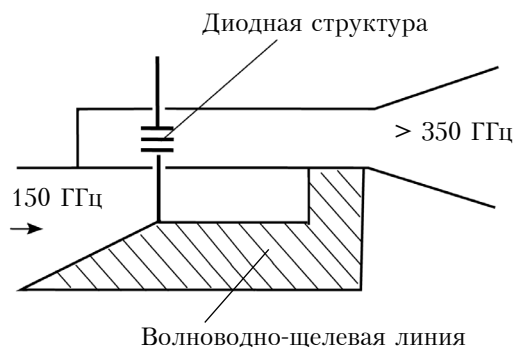


Рис. 14. Пример расположения планарного диода в волноводной камере

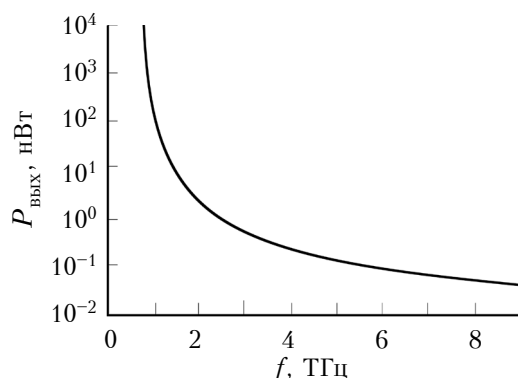


Рис. 15. Зависимость выходной мощности гармоник умножителя частоты от частоты излучения при $f_{\text{вх}} = 150$ ГГц [35]

ких диодов для создания на их основе умножителей частоты ТГц-диапазона.

На рис. 14, где приведена схема реализации умножителя частоты с полупроводниковыми диодами на основе сверхрешеток, показано расположение планарного диода в волноводной камере, которая имеет сечение $2,54 \times 1,27$ мм и выходной волновод с частотой отсечки более 350 ГГц с диагональным рупором [35]. Для согласования в широком диапазоне частот во входном волноводе помещается трансформатор сопротивлений, выполненный на основе волноводно-щелевой линии.

Для демонстрации результатов реализации умножителя частоты с диодами на основе сверхрешеток на рис. 15 приведена экспериментально полученная зависимость выходной мощности гармоник от частоты излучения умножителя частоты при входной частоте 150 ГГц. Величина поступающей на вход умножителя мощности составляла 5–10 мВт.

Генераторы гармоник

Преимуществом генераторов гармоник является их высокая добротность на частоте гармоники, т. е. высокая стабильность частоты по отношению к параметрам нагрузки на частоте гармоники. Эта особенность позволяет не применять

ферритовые элементы для развязки генератора с нагрузкой, что значительно упрощает конструкцию [37]. Для достижения наибольшей мощности сигнала гармоники высокочастотную конструкцию следует выполнять так, чтобы амплитуда колебаний на основной частоте была максимальной. С этой целью высокочастотная цепь реализуется без отбора мощности на основной частоте, т. е. в виде резонатора, активное сопротивление которого определяется только сопротивлением потерь. Такое решение обеспечивает не только максимальную амплитуду колебаний, но и максимальную добротность резонансной схемы генератора, необходимую для обеспечения высокой стабильности частоты автоколебаний. По своей эффективности генераторы гармоник, работающие в коротковолновой части миллиметрового диапазона на второй или третьей гармонике, не уступают комбинированным схемам с автономными умножителями частоты.

Важным элементом, применяемым практически во всех конструкциях генераторов гармоник миллиметрового диапазона, является крышка (диск) на торце диода, создающая радиальную линию, входной импеданс которой включен параллельно структуре диода. Входной импеданс радиальной линии и размер крышки выбираются так, чтобы трансформация импеданса диода в СВЧ-цепь генератора на основной частоте была оптимальной. На частоте второй гармоники электрическая длина линии меняется, что приводит к увеличению резонансной частоты диода.

На рис. 16 представлена конструкция генератора, которая получила наибольшее распространение. Здесь применен коаксиальный резонатор 1 для основной частоты, перестраиваемый поршнем 2. Резонатор 1 связан щелью с волноводом отбора мощности гармоники 3. Диод 4 установлен в волновод 3. Настройка на максимальный уровень выходной мощности производится волноводным поршнем 5 и диаметром радиальной линии 6.

Для получения высокой мощности на частоте гармоники в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн необходимо применять

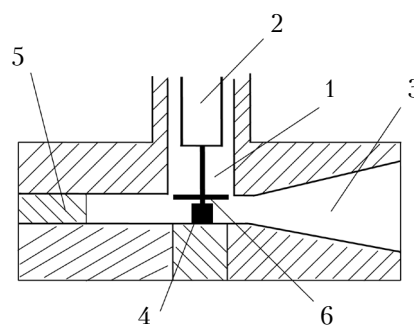


Рис. 16. Конструкция генератора гармоники

диоды, обладающие высокой нелинейностью. Для этого применяются диоды Ганна на основе InP, TUNNET диоды на основе GaAs [38], характеризующиеся высокой эффективностью на основной частоте в области 100–150 ГГц, уровень шума которых на 15–20 дБ меньше, чем кремниевых ЛПД, а существенные нелинейные свойства обеспечивают высокий уровень амплитуд основной гармоники.

Создание диодных генераторов гармоник позволяет расширить рабочий диапазон в область частот, где отрицательное сопротивление диода мало и поэтому не может обеспечить режим автоколебаний. Тогда работа диода на частоте гармоники происходит в лучшем случае в режиме усиления. В связи с этим генераторы гармоник на GaAs-диодах Ганна широко применяются для создания стабильных источников электромагнитных колебаний в области частот 60–100 ГГц. Этот режим успешно применен для получения мощности на частотах 200–300 ГГц при использовании InP-диодов Ганна. Генераторы гармоник являются в основном двухчастотными, развивающими мощность в двух полезных нагрузках на основной частоте и на частоте гармоники. При этом возможны различные режимы удвоения основной частоты автоколебаний:

- пассивного умножения частоты, когда вещественная часть импульса диода на частоте $2f$ положительна. Этот режим сводится к извлечению в полезную нагрузку мощности сигнала гармоники;
- усиления сигнала гармоники;
- синхронизации на частоте гармоники;
- бигармонический режим, когда расстройка частоты автоколебаний относительно частоты гармоники превышает ширину полосы синхронизации.

Реализация режима работы устройства определяется типом и параметрами применяемого диода, способом включения его в высокочастотную цепь, конструкцией электродинамической системы и настройкой генератора гармоник [39–41].

Выводы

Приведенный обзор результатов по созданию источников мощности на основе умножительных диодов свидетельствует о значительных успехах в этой области и быстром развитии электронной компонентной базы коротковолновой части СВЧ-спектра. Очевидно, что дальнейшее развитие умножительных диодов в технике СВЧ будет проявляться не только в повышении рабочей мощности, но и в решении проблем миниатюризации. В связи с этим следует отметить появление гетероэпитаксиальных многослойных варакторных структур, выполненных

с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии, обладающих всеми преимуществами составного варактора, но имеющих лучшие тепловые характеристики и хорошие перспективы их использования в терагерцевом диапазоне.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Siegel P. H. Terahertz technology // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2002. — Vol. 50, N 3. — P. 910–928. — <http://dx.doi.org/10.1109/22.989974>
2. Carpintero G., Garcia-Munoz E., Hartnagel H. et al. Semiconductor terahertz technology: devices and systems at room temperature operation. — USA, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2015. — <https://doi.org/10.1002/9781118920411.ch1>
3. Porterfield D. High-efficiency terahertz frequency triplers // IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. — Honolulu, USA. — 2007. — P. 337–340. — <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2007.380439>
4. Chattopadhyay G., Schlecht E., Ward J. et al. An all solid-state broadband frequency multiplier chain at 1500 GHz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2004. — Vol. 52, N 5. — P. 1538–1547. — <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.827042>
5. Maiwald F., Schlecht E., Maestrini A. et al. THz frequency multiplier chains based on planar Schottky diodes // Proc. SPIE: Astronom. Telescopes Instrum. Int. Conf. — Waikoloa, HI. — 2002. — Vol. 4855. — P. 447–458.
6. Wang H., Sengupta K. RF and mm-Wave Power Generation in Silicon. — Academic Press, 2015.
7. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Посадковский В. Н. и др. СВЧ умножители высокой кратности // Изв. Вузов России. Радиоэлектроника. — 2014. — Вып. 2. — С. 48–50.
8. Пильдон П. И., Визель А. А. Полупроводниковые диоды для умножения частоты. Полупроводниковые приборы и их применение // Сб. статей под ред. Я. А. Федотова. — Москва: Сов. Радио, 1970. — Вып. 23. — С. 82–100.
9. Irvin I. C., Swan C. B. A composite varactor for simultaneous high harmonic generation // IEEE Transactions on Electron Devices. — 1966. — Vol. 13, N 5. — P. 466–471. — <https://doi.org/10.1109/T-ED.1966.15713>
10. Staecker P. W., Hines M. E., Occhiuti R. F., Cushman I. R. Multi-watt power generation at millimeter-wave frequencies using epitaxially-stacked varactor diodes // IEEE MTT-S. International Microwave Symposium Digest. — Las Vegas, USA. — 1987. — Vol. 2. — P. 917–920.
11. Staecker P. W. MM-wave transmitters using power frequency multipliers // Microwave Journal. — 1988. — N 2. — P. 175–181.
12. Cushman R., Occhiuti F., McDonagh E. M. et al. High power epitaxially-stacked varactor diode multipliers // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. — Dallas, TEX, USA. — 1990. — Vol. 2. — P. 923–926. — <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1990.99729>
13. Courtney W. E., Chen C. L. et al. Monolithic analog phase shifters and frequency multipliers for mm-wave phased array applications // Microwave Journal. — 1966. — N 12. — P. 105–119.
14. Патент 20485 Украины. Мощный СВЧ полупроводниковый умножитель частоты / Касаткин Л. В., Карушкин Н. Ф., Белкин В. В., Косинский А. С. — 1997.
15. Rolland P. A., Waterkowski J. L., Constant E., Salmer G. New model of operation for avalanche diodes:

- frequency multiplication and conversion // IEEE Trans. MTT. — 1976. — N 11. — P. 768–775.
16. Соболев Л. И., Котов Ю. А., Модестов Л. А. Умножители частоты сверхвысокой кратности // Полупроводниковые приборы и их применение. — 1970. — Вып. 23. — С. 109–132.
17. Венгер А. З., Ермак А. Н., Якименко А. М. Умножитель частоты на лавинно-пролетном диоде // ПТЭ. — 1980. — № 3. — С. 138–139.
18. Kasatkin L. V., Novozhilov V. V. Effective high order frequency multipliers on IMPATT diodes // Applied Microwave and Wireless. — 1994. — Vol. 6. — P. 32–36.
19. Дворниченко В. П., Карушкин Н. Ф., Мальцев С. Б., Чайка В. Е. Работа ЛПД в режиме радиоимпульсного умножения частоты // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. — 1985. — Вып. 4 (376). — С. 40–44.
20. Григулович В. И., Иммереев И. Я. Радиоимпульсное преобразование частоты. — Москва: Сов. Радио. 1966.
21. Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Балабанов В. М., Смирнова Е. А. Твердотельные модули для генерации СВЧ-излучения в диапазоне частот до 200 ГГц // Труды 26-й Междунар. Крымской конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2016). — 2016. — г. Севастополь, Крым. — С. 289–295.
22. 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. — <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.1.03>
23. Чайка В. Е., Касаткин Л. В. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. — Севастополь: Вебер, 2006.
24. Вакс В. Л., Анфертьев В. А., Гольдман Г. Н. и др. ТГц-спектроскопия высокого разрешения на основе наноструктурированных полупроводниковых и сверхпроводниковых устройств // Журнал радиоэлектроники. — 2006. — № 1.
25. Шашкин В. И. Отчет о научно-исследовательской работе. Формирование и исследование многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GN для пассивных и активных элементов миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн // Институт физики микроструктур РАН. — Нижний Новгород. — 2012.
26. Божков В. Г. Полупроводниковые детекторы, смесители и умножители частоты терагерцевого диапазона // Изв. Вузов. Радиофизика. — 2003. — Т. 46, № 8–9. — С. 702–731.
27. Erickson N. R. High efficiency submillimeter frequency multipliers // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. — Dallas. — 1990. — P. 1301–1304.
28. Malko A., Bryllert T., Vukusic J., Stake J. High Efficiency and broad-band operation of monolithically integrated W-Band HBV frequency tripler // 24th International Conf. on Indium Phosphide and Related Material. — Santa Barbara, USA. — 2012. — P. 92–94.
29. Malko A., Bryllert T., Vukusic J., Stake J. A 474 GHz HBV frequency quintupler integrated on a 20 mkm thick silicon substrate // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. — 2015. — N 5. — P. 85. — <https://doi.org/10.1109/THZ.2014.2378793>
30. Беляков В. А., Оболенский С. В., Фефелова Е. Л. и др. Гетеробарьерные варакторы на основе гетероструктур на подложках фосфида индия // Труды 2-й Рос.-белорус. научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники». — Нижний Новгород, РФ. — 2015. — С. 199–201.
31. Малеев Н. А., Беляков В. А., Васильев А. П., Кулагина М. М. Молекулярно-пучковая эпитаксия структур гетеробарьерных варакторов в системе материалов InGaAs-InAlAs-InP // Электроника и микроэлектроника СВЧ. — 2016. — Т. 1. — С. 68–72.
32. Малеев Н. А., Беляков В. А., Васильев А. П. и др. Молекулярно-пучковая эпитаксия структур InGaAs/InAlAs/AlAs для гетеробарьерных варакторов // Физика и техника полупроводников. — 2017. — Т. 51, вып. 11. — С. 1484–1487. — <https://doi.org/10.21883/FTP.2017.11.45095.09>
33. Романов Ю. А., Романова Ю. Ю. Блоховские колебания в сверхрешетках. Проблемы терагерцевого диапазона // ФТП. — 2005. — Т. 39. — Вып. 1. — С. 162–170.
34. Павельев Д. Г., Васильев А. П., Козлов В. А. и др. Диодные гетероструктуры для приборов терагерцевого диапазона частот // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. — 2016. — № 1.
35. Павельев Д. Г., Кошуринов Ю. И., Иванов А. С. и др. Экспериментальные исследования умножителей частоты на полупроводниковых сверхрешетках в терагерцевом диапазоне // Физика и техника полупроводников. — 2012. — Т. 46, вып. 1. — С. 125–129.
36. Schomburg E., Hofbeck K., Scheuerer R. et al. Control of the dipole domain propagation in GaAs/AlAs super lattice with a high-frequency field // Phys. Rev. B. — 2002. — Vol. 65(15). — 155320. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.155320>
37. Ракитин С. П., Карушкин Н. Ф., Касаткин Л. В. и др. Твердотельные компоненты для перспективной радиоэлектронной аппаратуры миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн (26,5–300 ГГц) // Труды 10-й Междунар. Крымской конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2000). — Украина, г. Севастополь. — 2000. — С. 33–36.
38. Eisele H., Rydberg A., Haddad G. Recent advances in the performance of InP Gunn devices and GaAs TUNNET diodes for the 100–300 GHz frequency range and above // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2000. — Vol. 48, N 4. — P. 626–631. — <https://doi.org/10.1109/22.841952>
39. Jones S., Lybura M., Carlstrom J., O'Brien T. A 63–170 GHz second harmonic operation of an InP transferred electron device // IEEE Transactions on Electron Devices. — 1999. — Vol. 46, N 1. — P. 17–23. — <https://doi.org/10.1109/16.737436>
40. Косов А. С., Еленский В. Г. Генераторы гармоник миллиметрового диапазона на основе диодов Ганна // Зарубежная радиоэлектроника. — 1987. — № 2. — С. 54–65.
41. Зубович Н. А., Цвирко Ю. А. Моделирование бигармонического режима генерации в двухконтурном генераторе Ганна // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. — 1991. — Вып. 6. — С. 26–29.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 02.05 2018 г.*

ПОМНОЖУВАЧІ ЧАСТОТИ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ НА ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДНИХ СТРУКТУР

Очевидні переваги техніки міліметрових хвиль — велика інформаційна ємність, висока спрямованість випромінювання, можливості діагностики та спектроскопії різних середовищ, включаючи методи електронного парамагнітного резонансу і ядерного магнітного резонансу високої роздільної здатності — зумовили швидкий розвиток техніки цього діапазону в усьому світі. Ці переваги визначають привабливість практичного застосування міліметрових довжин хвиль для створення швидкісних ліній зв'язку, високо-точних РЛС, пристроїв ідентифікації хімічних речовин та іншої техніки.

Важливу роль в освоєнні міліметрового і субміліметрового діапазонів хвиль відіграють помножувачі частоти. У даній роботі проведено аналіз основних напрямків сучасного розвитку ефективних помножувачів частоти, виповнених на основі напівпровідникових діодних структур, ефективних у міліметровому та субміліметровому діапазонах довжини хвиль. Розглянуто діодні генератори гармонік; помножувачі на основі нелінійних залежностей їх реактивних параметрів від напруги; помножувачі високої кратності на основі лавинно-пролітних діодів, що діють в режимі радіоімпульсного збудження коливань в області високих частот; помножувачі на основі складених гетероструктур і квантових надрешіток в терагерцевому діапазоні.

Наведено особливості конструктивних рішень помножувачів частоти різних конфігурацій, показано шляхи оптимізації параметрів діодних структур і режимів роботи, що забезпечують ефективність їх функціонування в режимі множення частоти. Встановлено зв'язок електричних параметрів помножувачів частоти з вихідними характеристиками НВЧ-пристроїв.

Наведений огляд результатів робіт по створенню джерел потужності на основі помножувальних діодів свідчить про значні успіхи в цій галузі і швидкий розвиток електронної компонентної бази в короткохвильовій частині НВЧ-спектра. Подальший розвиток помножувальних діодів у техніці НВЧ буде проходити не тільки в напрямку підвищення робочих потужностей, але і в рішенні проблем мікромініатюризації. У зв'язку з цим слід відзначити появу гетероепітаксійних багатопшарових варакторних структур, виконаних за допомогою молекулярно-променевої епітаксії, що мають всі переваги складеного варактора, але мають кращі теплові характеристики і хороші перспективи їх використання в терагерцевому діапазоні.

Ключові слова: міліметровий діапазон, варактор, діод Ганна, ISIS-діод, лавинно-пролітний діод, діод з бар'єром Шотткі, InP-діод, кратність множення частоти, гетероструктури і квантові надрешітки, ТГц-випромінювання.

DOI: 10.15222/TKEA2018.3.22
UDC 621.314.26:621.382.64

M. F. KARUSHKIN

Ukraine, Kiev, Research Institute «Orion»
E-mail: orion@ri-orion.kiev.ua

MILLIMETER-WAVE FREQUENCY MULTIPLIERS BASED ON SEMICONDUCTOR DIODE STRUCTURES

Obvious advantages of the millimeter wave technology including a large information capacity, high directivity of radiation, diagnostics and spectroscopy capabilities of different environments, including the methods of electron paramagnetic resonance and high resolution nuclear magnetic resonance have led to the rapid development of techniques for that range throughout the world. These advantages determine the attractiveness of the practical application of millimeter wavelengths to create high-speed communication links, high-precision radar, chemicals identification device and other equipment.

Important role in the development of millimeter and sub-millimeter wave ranges belongs to the frequency multipliers development. This paper analyzes the main trends of modern development of efficient frequency multipliers on semiconductor diode structures, which are based on different physical principles, namely diode harmonic generators; frequency multipliers based on nonlinear dependencies of their reactive parameters on the voltage; frequency multipliers of high multiplicity on IMPATT diodes operating in mode of pulse exciting

oscillations at high frequencies; multipliers on complex heterostructures and quantum super lattices in the terahertz range.

The paper presents design solutions for frequency multipliers with various configurations and ways of optimizing the diode structures and operation modes that ensure their effective functioning in the frequency multiplication mode. The connection of electric parameters of frequency multipliers with output characteristics of microwave devices is determined.

The given review of the results on designing power sources based on multiplying diodes indicates significant advances in this field and rapid development of the electronic component base in the short-wave part of the microwave spectrum.

Further development of the technique of multiplying diodes will move forward not only in the direction of increasing the working capacity, but also in solving the problem of microminiaturization. In this regard, the emergence of heteroepitaxial multilayer varactor structures should be noted. Such structures are made with molecular beam epitaxy and have all the advantages of a composite varactor, but at the same time have better thermal characteristics and good prospects for their applications in the terahertz range.

Keywords: millimeter wave band, varactor, Gunn diode, ISIS diode, IMPATT diode, Schottky barrier diode, InP diode, frequency multiplication, heterostructures and quantum superlattices, THz radiation.

REFERENCES

1. Siegel P. H. Terahertz technology. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, 2002, vol. 50, no. 3, pp. 910-928. <http://dx.doi.org/10.1109/22.989974>
2. Carpintero G., Garcia-Munoz E., Hartnagel H., Preu S., Räisänen A. *Semiconductor TeraHertz Technology: Devices and Systems at Room Temperature Operation*. John Wiley & Sons, 2015, 408 p. <https://doi.org/10.1002/9781118920411.ch1>
3. Porterfield D. High-efficiency terahertz frequency triplers. *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, Honolulu, HI, USA, 2007, pp. 337-340. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2007.380439>
4. Chattopadhyay G., Schlecht E., Ward J., Gill J., Javadi H., Maiwald F. and Mehdi I. An all solid-state broadband frequency multiplier chain at 1500 GHz. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, vol. 52, no. 5, pp. 1538-1547. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.827042>
5. Maiwald F., Schlecht E., Maestrini A., Chattopadhyay G., Pearson J.C., Pukala D., Mehdi I. THz frequency multiplier chains based on planar Schottky diodes. *Proc. SPIE: Astronom. Telescopes Instrum. Int. Conf.*, Waikoloa, HI, 2002, vol. 4855, pp. 447-458.
6. Wang H., Sengupta K. *RF and mm-Wave Power Generation in Silicon*. Academic Press, 2015, 576 p.
7. Usanov D.A., Skrypal A.V., Posadovskiy V.N., Tyaglov V.S., Grigoriev D.V. [Microwave multipliers with high multiplicity]. *Izvestiya VUZov. Radiophysics*. 2014, no 2, pp. 48-50. (Rus)
8. Pildon P.I., Vizel A.A. [Semiconductor diodes for frequency multiplication. Semiconductor devices and its application]. *Collection of articles by ed. Ya.A. Fedotova*. Moscow, Sov. Radio, 1970, iss. 23, pp. 82-100. (Rus)
9. Irvin I.C., Swan C.B. A composite varactor for simultaneous high harmonic generation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1966, vol. 13, no 5, pp. 466-471. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1966.15713>
10. Staecker P.W., Hines M.E., Occhiuti R.F., Cushman I.R. Multi-watt power generation at millimeter-wave frequencies using epitaxially-stacked varactor diodes. *IEEE MTT-S, International Microwave Symposium Digest*, Las Vegas, USA, 1987, vol. 2, pp. 917-920.
11. Staecker P.W. MM-wave transmitters using power frequency multipliers. *Microwave Journal*, 1988, no. 2, pp. 175-181.
12. Cushman R., Occhiuti F., McDonagh E.M., Hines M.E., Staecker P.W. High power epitaxially-stacked varactor diode multipliers. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. Dallas, TEX, 1990, vol. 2, pp. 923-926. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1990.99729>
13. Courtney W.E., Chen C.L. et al. Monolithic analog phase shifters and frequency multipliers for mm-wave phased array applications. *Microwave Journal*, 1966, no. 12, pp. 105-119.
14. Kasatkin L.V. et al. *Power microwave frequency multipliers*. Patent 20485 of Ukraine, 1997. (Rus)
15. Rolland P.A., Waterkowski J.L., Constant E., Salmer G. New model of operation for avalanche diodes: frequency multiplication and conversion. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1976, no 11, pp. 768-775.
16. Sobolev L. I., Kotov U. A., Modestov L. A. [Frequency multipliers with high multiplicity] *Poluprovodnikovye pribory i ikh primeneniye*, Moscow, 1970, iss. 23, pp. 109-132. (Rus)
17. Venger A.Z., Ermak A.N., Yakimenko A.M. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Frequency multiplier based on IMPATT]. 1980, no. 3, pp. 138-139. (Rus)
18. Kasatkin L.V., Novozhilov V.V. Effective high order frequency multipliers on IMPATT diodes. *Applied Microwave Wireless*, 1994, no. 6, pp. 32-36.
19. Dvornichenko V.P., Karushkin M.F., Maltsev S.B., Chajka V.E. [Operation of IMPATT in the radio pulse frequency multiplication mode] *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1. Elektronika SVCh*, 1985, iss. 4 (376), pp. 40-44. (Rus)
20. Grigulovich V.I., Immoreev I.Ya. [Radio pulse conversion of frequency]. Moscow, Soviet Radio, 1966, 335 p. (Rus)
21. Karushkin M.F., Obuhov I.A., Balabanov V.M., Smirnova E.A. [Solid-state modules for microwave radiation generating in the frequency range up to 200 GHz]. *Proc. of the 26th Int. Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2016)*, 2016, Sevastopol, Crimea, pp. 289-295. (Rus)

22. Karushkin M.F., Maltsev S.B., Hitrovskiy V.A. [Solid-state microwave modules for radio equipment and systems of millimeter wavelength range]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy aparature*, 2016, no 1, pp. 3-7. (Rus) <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.1.03>
23. Chajka V.E., Kasatkin L.V. [Semiconductor devices in the millimeter wave range]. Sevastopol, Veber, 2006, 319 p. (Rus)
24. Vaks V.L., Anfertiev V.A., Goldman G.N., Pentin I.V., Tretyakov I.V. [THz-spectroscopy with high resolution on the basis of nanostructured semiconductor and super-semiconductor devices]. *Zhurnal radioelektroniki*, 2006, no. 1. (Rus)
25. Shashkin V.I. [Report on research work. Formation and investigation of multilayer nanostructures based on Si, GaAs and GN for passive and active elements of millimeter and infrared wavelength ranges]. *Institute of Microstructure Physics*, RAS, Nizhny Novgorod, 2012. (Rus)
26. Bozhkov V.G. [Semiconductor detectors, mixers and frequency multipliers of the terahertz range]. *Izvestiya VUZov. Radiophysics*, 2003, vol. 46, no. 8-9, pp. 702-731. (Rus)
27. Erickson N.R. High efficiency submillimeter frequency multipliers. *IEEE MTT-S, International Microwave Symposium Digest*, 1990, pp. 1301-1304. <https://doi.org/10.1007/BF02995124>
28. Malko A., Bryllert T., Vukusic J., Stake J. High Efficiency and Broad-Band Operation of Monolithically Integrated W-Band HBV Frequency Tripler. *24th Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Material*, Santa Barbara, USA, 2012, pp. 92-94.
29. Malko A., Bryllert T., Vukusic J., Stake J. A 474 GHz HBV frequency quintuplier integrated on a 20 μ m thick silicon substrate. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, no. 5, pp. 85. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2014.2378793>
30. Belyakov V.A., Obolenskiy S.V., Fefelova E.L., Ladenkov I.V. et al. [Heterobarrier Varactors Based on Hetero structures on Indium Phosphide Substrates]. *Trudy 2-i Rossiisko-belorusskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elementnaya baza otechestvennoi radioelektroniki»*, Nizhniy Novgorod, 2015, pp. 199-201. (Rus)
31. Maleev N.A., Belyakov V.A., Vasiliev A.P., Kulagina M.M. [Molecular beam epitaxy of structures of hetero barrier varactors in a material system InGaAs–InAlAs–InP]. *Elektronika i mikroelektronika SVCh*, 2016, vol. 1, pp. 68-72. (Rus)
32. Maleev N.A., Belyakov V.A., Vasiliev A.P., Bobrov M.A. et al. Molecular-beam epitaxy of InGaAs/InAlAs/AlAs structures for heterobarrier varactors. *Semiconductors*, 2017, vol. 51, iss. 11, pp. 1431-1434. <https://doi.org/10.1134/S1063782617110185>
33. Romanov Y.A., Romanova Y.Y. Bloch oscillations in superlattices: The problem of a terahertz oscillator. *Semiconductors*, 2005, vol. 39, iss. 1, pp. 147-155. <https://doi.org/10.1134/1.1852666>
34. Paveliev D.G., Vasiliev A.P., Kozlov V.A. et al. [Diode hetero structures for terahertz frequency devices]. *Zhurnal radioelektroniki: elektronnyi zhurnal*, 2016, no 1. (Rus)
35. Paveliev D.G., Koshurinov Y.I., Ivanov A.S., Panin A.N., Vax V.L. et al. Experimental study of frequency multipliers based on a GaAs/AlAs semiconductor superlattices in the terahertz frequency range. *Semiconductors*, 2012, vol. 46, iss. 1, pp. 121-125. <https://doi.org/10.1134/S1063782612010150>
36. Schomburg E., Hofbeck K., Scheuerer R. et al. Control of the dipole domain propagation in GaAs/AlAs super lattice with a high-frequency field. *Phys. Rev. B*, 2002, vol. 65(15), 155320. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.155320>
37. Rakitin S.P., Karushkin N.F., Kasatkin L.V., Tsvirko U.A. et al. Solid state components for perspective electronic equipments of MM and sub MM wavelength range (26,5–300 GHz). *Proc. of the 10th International conference “Microwave Telecommunication Technology”*, Ukraine, Sevastopol, 2000, pp. 33-36. (Rus)
38. Eisele H., Rydberg A., Haddad G. Recent advances in the performance of InP Gunn devices and GaAs TUNNET diodes for the 100-300 GHz frequency range and above. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, vol. 40, no. 4, pp 626-631. <https://doi.org/10.1109/22.841952>
39. Jones S., Lybura M., Carlstrom J., O'Brien T. A 63–170 GHz second harmonic operation of an InP transferred electron device. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1999, vol. 46, no. 1, pp. 17-23. <https://doi.org/10.1109/16.737436>
40. Kosov A.S., Elensky V. [MM wave harmonic oscillators based on Gunn diodes] *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1987, no. 2, pp. 54-65. (Rus)
41. Zubovich N.A., Tsvirko U.A. [Modeling of the biharmonic generation mode in a double-circuit Gunn oscillator]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1. Elektronika SVCh*, 1991, iss. 6, pp. 26-29. (Rus)

Описание статьи для цитирования:

Карушкин Н. Ф. Умножители частоты миллиметрового диапазона на основе полупроводниковых диодных структур. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 3, с. 22—37. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.3.22>

Cite the article as:

Karushkin M. F. Millimeter-wave frequency multipliers based on semiconductor diode structures. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2018, no. 3, pp. 22-37. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.3.22>