

## ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ УМНОЖИТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ МИКРОГЕНЕРАТОРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

**Kremenets'ka Ya. A. The influence of the configuration of multiplier and amplifying circuits on the basis of micro-generators of millimeter range on the possibility of obtaining terahertz radiation.** Problems of development of sources of terahertz radiation are getting of power source greater than 100 mW, the possibility of frequency tuning, miniaturization generators. Getting low-noise signals and continuous frequency tuning in a wide range necessary for use of all information capacity terahertz signal, for example, for high-definition video.

Small size Semiconductor technology of less than 130 (65) nm for submillimeter waves are complex and require the costs of cooling, high vacuum, etc. Interconnected systems like the multiplier and amplifier, without external influence, which uses the phase difference between the generator to suppress of the lower harmonics (resonant frequency) and the allocation of higher harmonics (or vice versa) are also interesting. To implement a voltage controlled oscillator in a range of high power submillimeter wave signal source must be capable of generating high power harmonics and frequency adjustment mechanism should not adversely affect this requirement. Such requirements are suitable for cyclic configuration on the basis of coupled oscillators. The paper analyzes the results of lasing submillimeter cyclic configuration of interconnected micro-generators on the basis of 130 (65) nm CMOS transistors. It is shown that such cyclic patterns efficiently use nonlinear oscillators millimeter wave-based tunneling and avalanche.

**Keywords:** coupled oscillators, terahertz radiation, submillimeter range, harmonic oscillators, frequency multiplication, CMOS transistor, tunneling, avalanche breakdown

**Кременецка Я. А. Вплив конфігурації помножувально-підсилюючих схем на основі мікрогенераторів міліметрового діапазону на можливість отримання терагерцового випромінювання.** У роботі проаналізовано результати отримання генерації субміліметрового діапазону в циклічній конфігурації взаємопов'язаних мікрогенераторів на основі 130 (65) нм технології КМОН транзисторів. Показано, що в таких циклічних схемах ефективно використання нелінійних осциляторів міліметрового діапазону на основі тунелювання і лавинного пробію.

**Ключові слова:** зв'язані осцилятори, терагерцове випромінювання, субміліметровий діапазон, генератори гармонік, множення частоти, КМОН транзистори, тунелювання, лавинний пробій

**Кременецкая Я. А. Влияние конфигурации умножительно-усилительных схем на основе микрогенераторов миллиметрового диапазона на возможность получения терагерцового излучения.** В работе проанализированы результаты получения генерации субмиллиметрового диапазона в циклической конфигурации взаимосвязанных микрогенераторов на основе 130(65) нм технологии КМОП транзисторов. Показано, что в таких циклических схемах эффективно использование нелинейных осцилляторов миллиметрового диапазона на основе туннелирования и лавинного пробоя.

**Ключевые слова:** связанные осцилляторы, терагерцовое излучение, субмиллиметровый диапазон, генераторы гармоник, умножение частоты, КМОП транзисторы, туннелирование, лавинный пробой

### 1. 1. Введение и постановка задачи

Терагерцовое излучение, благодаря своим физическим свойствам [1, 2], все больше находит применение в различных областях, таких как медицинская диагностика, биохимическая расшифровка, системы безопасности, военная разведка и т.д. Большие перспективы для субмиллиметрового диапазона открываются в телекоммуникационных системах. Субмиллиметровое излучение обладает высокой информационной емкостью, высокой направленностью, по сравнению с микроволновыми. В средах где в ИК-диапазоне затруднено детектирование сигнала из-за фазового искажения фронта волн, возможно получение изображения высокого разрешения в субмиллиметровом диапазоне. Перечисленные выше свойства, открывают также перспективы для этого диапазона в

бесконтактной быстродействующей коммутации и гибридных оптических информационных системах.

Несмотря на последние достижения в этой области частот, остаются проблемы получения мощности источника сигнала выше 100 мкВт (или хотя бы в таких величинах), перестройки частоты, миниатюризации генераторов. Получение чистых (малошумных) сигналов и плавная перестройка частоты в широком диапазоне необходимы для использования всей информационной ёмкости терагерцового сигнала, например, для видеосъёмки высокого разрешения. К тому же для модуляции информационных сигналов терагерцового диапазона возможны сложные комбинированные методы. В сверхширокополосных системах связи и радиолокации перспективным является применение внутриимпульсной (амплитудно-кодовой) модуляции сигнала. При этом, как показано в работе эффективность радиолокационных систем в длинноволновой части субмиллиметрового диапазона начинается от 50 до 500...600 м, но не превышает величины 1 км [3, 4].

## **2. 2. Анализ результатов научных исследований в области создания генераторов субмиллиметрового диапазона**

Разработка источников терагерцового диапазона идет двумя путями [5, 6] :

– разработкой новых принципов генерирования, связанных с миниатюризацией структур приборов до нескольких нанометров и новыми физическими моделями описания процессов в таких структурах, с применением новых материалов и новых технологий;

– использование уже разработанных полупроводниковых источников миллиметрового диапазона в умножителях частоты на основе гармоник – сигналов, кратных основной частоте.

Пути построения умножителей частоты, эффективных в миллиметровом диапазоне:

– на основе нелинейных зависимостей их реактивных параметров от напряжения;

– умножителей частоты высокой кратности на ЛПД, действующих в режиме радиоимпульсного возбуждения колебаний в области высоких частот и их синхронизации.

Способность твердотельных материалов генерировать электромагнитные волны высокой частоты лимитируется структурой вещества. Кроме того, базовая частота обычно задаётся колебательным контуром на основе конденсатора переменной ёмкости, и в случае терагерцовых волн его не удаётся точно подстроить. Генерируемый сигнал размывается в широком спектре, и мощность в необходимом диапазоне сильно падает. В работах проанализированы ГУН с LC-резонатором с переменной емкостью для настройки частоты колебаний, и показано что этот метод настройки хорошо работает и достигает умеренной перестройки частоты при низких мм волновых частот (100 ГГц) [7, 8]. Показано, что при увеличении рабочей частоты, паразитные емкости, ограничивают возможности настройки варикапов, также снижается выходная мощность сигнала. Поэтому в КМОП осцилляторах выше 100 ГГц с высокой выходной мощностью лучше не использовать варакторы так как в результате их частота не может быть настроена.

В миллиметровых интегральных схемах генерация высокой мощности сигнала и перестройка частоты получают, главным образом, путем увеличения частоты среза КМОП транзисторов. Продвижение радиосистем в субмиллиметровый диапазон является перспективным, но пока технологически трудно осуществимым. Полупроводниковые малоразмерные технологии менее 130(65) нм для субмиллиметровых волн сложны, требуют затрат, охлаждения, глубокого вакуума и т.д. Умножительные системы с внешним сигналом налагают определенные сложности к внешнему сигналу также по технологии и синхронизации. Представляют интерес взаимосвязанные системы (как умножительные так и усилительные) без внешнего воздействия, где используются разности фаз между генераторами для подавления нижних гармоник (гармоник соответствующих резонансной частоте) и выделения высших гармоник (или наоборот). На определенных фазах между

генераторами одни гармоники подавляют друг друга, другие – усиливают. Строгий расчёт умножителей частоты связан с интегрированием нелинейных дифференциальных уравнений.

Влияние на ширину захвата частоты оказывает добротность, отношение входящего тока к выходящему из осциллятора и разность фаз между осцилляторами. Поэтому представляется интересным проанализировать возможности увеличения полосы захвата исходя из расчетов амплитуд осцилляций тока, временные задержки формирования импульсов, временного(фазового) прироста на соединительных элементах.

Создание генераторов гармоник эффективно при использовании активных элементов, для которых характерна значительная нелинейность импеданса, приводящая к увеличению амплитуд высших гармоник. Основная проблема при создании умножителей частоты – уменьшение фазовой нестабильности выходных колебаний, обусловленной случайным характером изменения их фазы приводящей к увеличению относительной нестабильности частоты на выходе по сравнению с соответствующей величиной на входе.

### 3. 3. Модели конфигурации взаимосвязи осцилляторов

Конфигурации взаимосвязи генераторов (способом соединения активных элементов) могут быть последовательного, параллельного, смешанного типа, кольцевого, каждый с каждым и т.д. (Рис.1). На рисунке круги представляют основные осцилляторы с фазами  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$ , треугольные блоки – фазосдвигающие  $\varphi_c$  схемы соединения.

Связанные системы генераторов могут генерировать и усиливать сигналы высших гармоник с использованием внешнего источника (резонатора) или без него, полагаясь на параметры взаимосвязи для синхронизации (режим взаимного захвата частот). Способ внутреннего соединения и его динамика, а также геометрия связанной системы могут быть спроектированы для разнообразных функций.

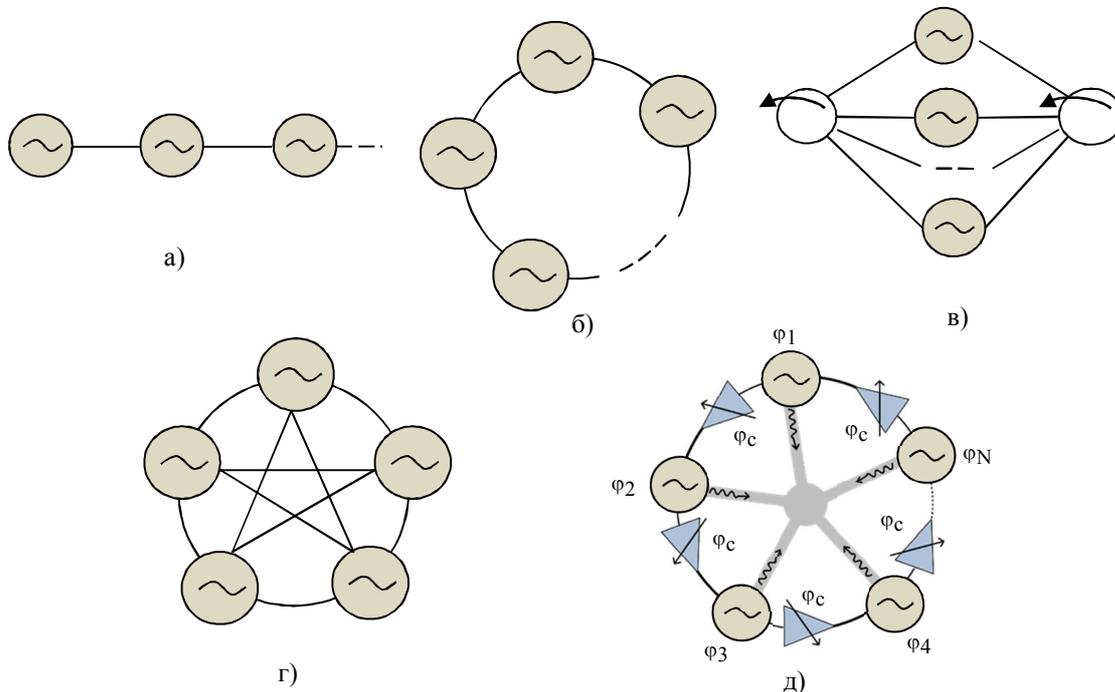


Рис. 1. Конфигурации взаимосвязи осцилляторов:

- а) последовательная, б) циклическая, в) параллельная, г) каждый с каждым, д) циклическая конфигурация, предложенная Афшари [9].

Аналізу роботи взаємоз'язаних генераторів посвячено велике число робіт (наприклад, [7-9]). Відомі системи складання потужностей з взаємною синхронізацією автогенераторів такі як:

- устройство Раккера (Рис. 2), содержащее пять СВЧ автогенераторов на ЛПД, симметрично связанных с общей нагрузкой. Включение позволяет снизить добротность системы для несинфазных режимов;
- циклические схемы на основе КМОП транзисторов (Рис. 3);
- устройство Курокавы (эквивалентная схема устройства на примере трех автогенераторов показана на Рис. 4).

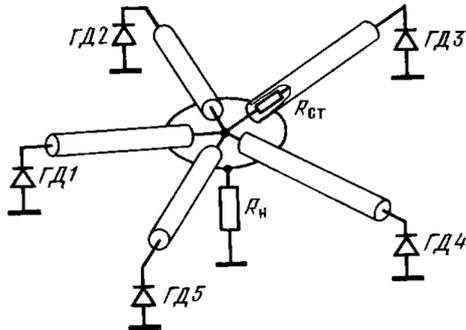


Рис. 2. Устройства Раккера

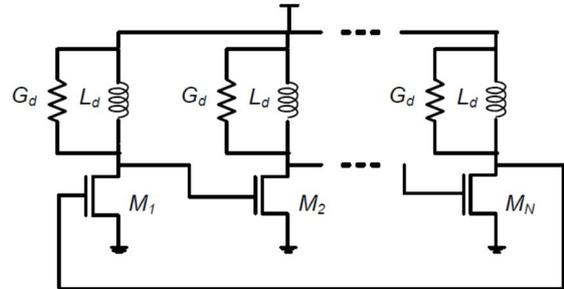


Рис. 3. Схема генератора циклической конфигурации на транзисторах [9]

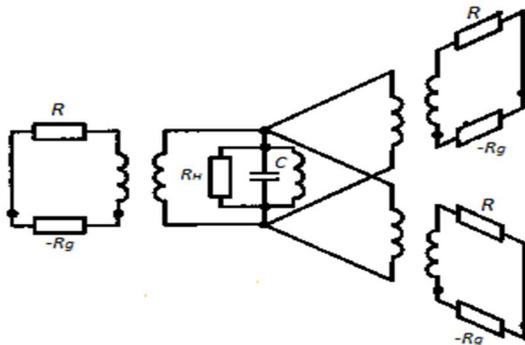


Рис. 4. Схема на основе трех автогенераторов, предложенная Курокавой [7].

В кольцевой соединительной топологии между основными генераторами расположены волноводы, которые осуществляют сдвиг фазы. Предложенные в [8, 10] конфигурации из связанных осцилляторов способны создать и объединить гармоники основной частоты из нескольких основных генераторов. При определённой настройке пики и спады разных гармоник уравнивали друг друга, одновременно усиливая мощность основного сигнала на следующем (в данном случае – четвёртом) микроблоке (Рис.1,д). Постоянный сдвиг фазы имеет решающее значение в гармоническом отборе: сначала происходит умножение частоты на самих генераторах, а затем их синхронизация на умноженной частоте. В такой кольцевой конфигурации генератор вводит энергию в другой генератор во время приема энергии от предыдущего генератора. Связь между последовательными осцилляторами осуществляется фазовым сдвигом перестраиваемого. В этом решении является проблемой фазовая стабильность. С другой стороны, манипулируя фазовой расстройкой между генераторами найдена возможность регулировать частоту. Однако в экспериментах такая простая схема обеспечивает в итоге формирование чистого терагерцового сигнала с приростом мощности в 10000 раз. Кроме того, характер распространения терагерцового излучения вдоль оси кольца предоставляет уникальную возможность создать узкий и мощный сканирующий луч.

#### 4. 4. Математическая модель динамики взаимосвязанных осцилляторов

Динамику взаимодействия между двумя электрическими осцилляторами изучил Адлер в контексте инъекционного захвата [11]. Полученные результаты основаны на анализе, когда один осциллятор с частотой  $\omega_1$  вводит энергию к другому осциллятору частотой  $\omega_2$ , при

некоторых условиях, второй осциллятор следует за первым с равной частотой и фазой, где фазовая разница развивается в результате частотной разницы:

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\Delta\omega - \frac{I_1}{I} \frac{\omega_0}{2Q} \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $d\varphi$  – сдвиг фазы между соседними генераторами;

$\Delta\omega$  – частотная разница, которая развивается в результате фазовой разницы  $d\varphi$ ;

$\omega_0$  – резонансная частота контура и  $Q$  – его добротность;

$I_1$  и  $I$  – амплитуды генерируемого и внешнего сигнала, соответственно;

$\frac{I_1}{I} \frac{\omega_0}{2Q} > \Delta\omega$  – режим захвата частоты, а  $\frac{I_1}{I} \frac{\omega_0}{2Q} < \Delta\omega$  – режим биений.

Важное следствие заключается в том, что если сдвиг фаз составляет  $90^\circ$  или его нечетное кратное, то эффективная полоса захвата равна нулю и генераторы не могут быть синхронизированы. Верхняя граница и нижняя граница  $\Delta\omega$  определяется, когда  $d\varphi = \pm \pi/2$ . Динамика  $d\varphi$  включает в себе разницу фаз генераторов  $\varphi_{i-1} - \varphi_i$  и фазу вносимую соединением генераторов –  $\varphi_c$ :

$$d\varphi = \varphi_{i-1} - \varphi_{i+} + \varphi_c \quad (2)$$

Показано в [8], что для синхронизации необходимо постоянство  $d\varphi$ , а также сумма фаз за цикл должна равняться

$$\sum d\varphi = 2\pi k. \quad (3)$$

Для  $N$  осцилляторов  $\varphi_{i-1} - \varphi_{i+} + \varphi_c = \frac{2\pi k}{N}$ .

Изменяя малыми шагами  $\varphi_c$  можно переключать частотные режимы генерации.

### 5. 5. Математическое моделирование гармоник тока и коэффициента преобразования частоты в различных микрогенераторах

В работах [8-10] показана возможность реализации КМОП-транзистров 65(130) нм технологии в циклической конфигурации взаимосвязанных микрогенераторов (без внешнего сигнала) для получения терагерцового излучения. Где экспериментально получена частота генерации 290(320) ГГц с шагом перестройки 13(8,4) ГГц с усилением мощности сигнала в 10000 раз, мощностью 0,76(0,46) мВт. Авторы отмечают, что точный диапазон настройки частоты требует численного моделирования с подбором параметров соединяющих волноводов изменяющих фазу, настраивая на резонансы конденсаторы. Аналитически из формулы Адлера можно предположить, что для плавной перестройки лучше не уменьшать добротность контура, так как это увеличит фазовые шумы, а силу входящего тока.

Для реализации ГУН высокой мощности в диапазоне субмиллиметровых волн и ТГц в работе [8] отмечают необходимость таких требований: Во-первых, источник сигнала должен быть способен генерировать высокую мощность гармоники. Во-вторых, генерируемая мощность должна быть эффективно доставлены к выходной нагрузке. В-третьих, механизм перестройки частоты должны быть предложен такой, что не будет отрицательно влиять первые два требования. Такие требования подходят для конфигурации петли на основе связанных осцилляторов и, которая подходит для генерации терагерцового тока. Предложенный способ обеспечивает эффективный способ создания и объединить гармоник основной частоты из нескольких основных генераторов. Точный диапазон настройки частоты требует численного моделирования с подбором параметров соединяющих волноводов изменяющих фазу, настраивая на резонансы конденсаторы (Рис. 6, 7).

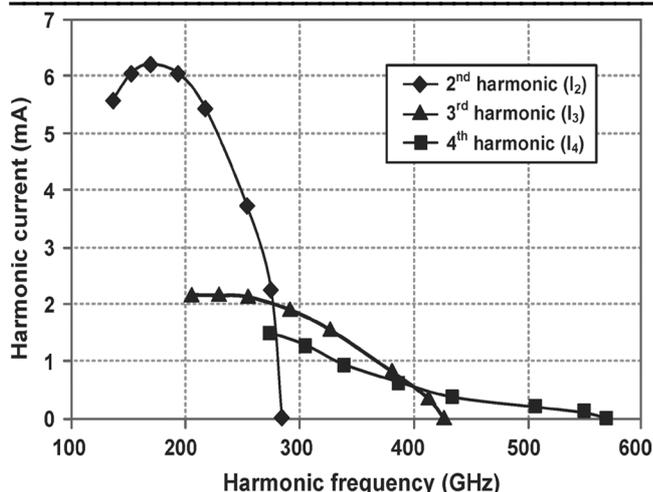


Рис. 6. Моделирование гармоник тока, генерируемого на стоке 65 нм КМОП-транзистора [8]

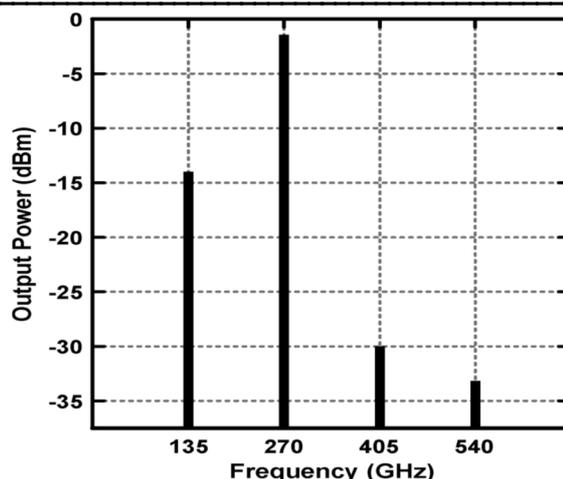


Рис. 7. Моделирование типичного выходного спектра: входная частота 135 ГГц и мощность 5 дБм [9]

Диоды, по сравнению с транзистором, требуют меньших затрат на изготовление, менее сложную структуру. Различные физические процессы генерирования сигнала в диодах дают различную характеристику излучения в миллиметровом диапазоне. Поэтому представляется интересным: рассчитать гармоники для туннельного диода (ТД), резонансно-туннельного диода (РТД), лавинно-пролетного диода (ЛПД), диода Ганна (ДГ) с лавинно-пролетным эффектом, КПЧ, сравнить с транзистором; рассмотреть взаимную и внешнюю синхронизацию двух трех четырех генераторов; влияние параметров взаимной связи; проанализировать зависимость частоты и выходной мощности.

На каждом элементарном генераторе действует напряжение основной частоты и для  $n$ -ой гармоники:

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1} U_n (-1)^n \sin \left[ n\omega t + \frac{\pi}{2}(n+1) \right] \quad (4)$$

Постоянная составляющая  $I_0$  и амплитуда  $n$ -ой гармоники тока  $I_g(n)$  определяется из разложения формы тока  $I(t)$  в ряд Фурье:

$$I(t) = I_0 + I_g(1) \sin(\omega t + \varphi_1) + I_g(2) \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + I_g(n) \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (5)$$

$$I_g(n) = \sqrt{I_{gs}(n)^2 + I_{gc}(n)^2}, \quad I_{gs}(n) = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \sin n\omega t dt, \quad I_{gc}(n) = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \cos n\omega t dt. \quad (6)$$

Фаза гармоники определяется из  $\text{tg} \varphi_n = \frac{I_{gc}(n)}{I_{gs}(n)}$ ,

$$I_0(U_0) = \frac{1}{T} \int_0^T I(U(t)) dt, \quad (7)$$

$$I_g(n) = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \sin \left[ n\omega t + \frac{\pi}{2}(n+1) \right] (-1)^n dt. \quad (8)$$

Коэффициент преобразования частоты (КПЧ):

$$\text{КПЧ} = \frac{I_g(n)U_g}{I_g(1)U_1} 100 \%. \quad (9)$$

ТД способны генерировать и преобразовывать электромагнитные колебания до нескольких сотен гигагерц, что соответствует миллиметровому диапазону волн. Их усилительные свойства сохраняются до +400°C. К указанным достоинствам также можно добавить практическую нечувствительность ТД к радиации. Основное отличие ТД от транзисторов заключается в том, что они являются двухполюсниками с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) и поэтому генераторы на ТД не требуют положительной внешней обратной связи. Диод с туннельными границами может эффективно преобразовывать входные сигналы мм диапазона в сигналы коротковолновой части мм и субмм диапазонов даже на частотах, на которых в диоде отсутствует ОДП. КПЧ таких диодов [12] может составлять 20 %.

Для резонансно-туннельного тока

$$i = \frac{gm^*}{2\pi^2\hbar^3} \int_0^{E^F} |D|^2 (E^F - \varepsilon) d\varepsilon, \quad (10)$$

где  $q$  и  $m$  – заряд и эффективная масса электрона;  
 $2\pi\hbar$  – постоянная Планка;  
 $E^F$  – уровень Ферми;  
 $D$  – прозрачность барьерной структуры;  
 $\varepsilon$  – энергия туннелирующего электрона.

Для первой гармоники 100 ГГц выбрана толщина барьеров 5 нм. Коэффициент преобразования частоты рассчитанный по формулам (4)-(10) и результатам работы [13] составляет на второй гармонике 30%.

В работе [14] рассматривается умножение частоты в диодах с междолинным переносом электронов с развитием ударной ионизации, что вносит дополнительную нелинейность и способствует улучшению в преобразовании частоты. Ток в режиме ограниченного накопления объемного заряда с развитием ударной ионизации определяется выражением:

$$I(E) = en_0v(E) \left[ 1 + \int_0^{W_a} a(E(x)) dx \right],$$

где  $W_a$  – ширина зоны умножения;  
 $\alpha$  – коэффициент ионизации;  
 $n_0v(E)$  – ток насыщения.

Для генерации излучения 100 ГГц выбрана  $W_a = 1 \cdot 10^{-7}$  м. Показано, что при развитии ударной ионизации в таких диодах коэффициент преобразования частоты существенно возрастает и составляет, например, на второй гармонике до 40% (первая гармоника до 100 ГГц). ЛПД характеризуются большой мощностью выходного сигнала, но требуют индивидуальной частотной настройки.

**6. Выводы.** Проведенные выше расчеты и анализы результатов исследовательских работ показывают, что для дальнейшего моделирования генератора субмиллиметровых колебаний в циклической конфигурации осцилляторов является необходимым:

- проанализировать возможности увеличения полосы захвата исходя из расчетов амплитуд осцилляций тока, временных задержек формирования импульсов, временного(фазового) прироста на соединительных элементах (формулы (1)-(3));
- провести сравнительный анализ умножения частоты в источниках миллиметрового диапазона: транзистор, лавинно-пролетный диод, туннельный диод, резонансно-туннельный диод, диод Ганна (каждый из этих нелинейных осцилляторов имеет свои характеристики и преимущества либо по мощности, либо по чистоте сигнала,...);
- численно промоделировать амплитуды осцилляций тока (входящий и выходящий токи, резонансные частоты), амплитуды гармоник, коэффициенты преобразования частоты на гармониках, возможный теоретический прирост частоты, мощности в циклической конфигурации взаимосвязанных осцилляторов.

**Литература**

1. Манько О. О. Розширення призначення субміліметрового діапазону та досягнення в галузі радіотехніки / О. О. Манько, Я. А. Кременецька, С. В. Морозова // Зв'язок. – 2015. – № 2. – С. 40-45.
2. Майская В. На пути к достижению субмиллиметрового диапазона длин волн / В. Майская // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2013. – № 6. – С.44-58.
3. Ушаков В. А. Обеспечение радиолокационной селекции малоразмерных объектов терагерцовыми устройствами в зоне ответственности аэропорта: дис. канд. техн. наук ; автореферат дис. к.т.н : 05.12.14 .– Радиолокация и радионавигация / В. А. Ушаков. – Москва, 2012. – 184 с.
4. Булгаков Б. М. Направления создания телекоммуникационных радиосистем миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Б. М. Булгаков, С. А. Кравчук, Т. Н. Нарытник // "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", междунаrod. Крым.конф. (КрыМиКо'2003): материалы конф. / Севастополь : Вебер. – 2003. – С. 305-308.
5. Быстров Р. П. Методика оценки характеристик терагерцовых радиолокационных устройств обнаружения наземных объектов // Р. П. Быстров, И. Л. Масленникова, А. В. Соколов, Г. К. Чистова // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 4. – С. 4-9.
6. Касаткин Л. В. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн / Л. В. Касаткин, В. Е. Чайка // Севастополь: Вебер. – 2006. – 319 с.
7. Заенцев В.В. Устройства сложения и распределения мощностей высокочастотных колебаний / В.В. Заенцев и др. ; под ред. З.И. Моделя. – Москва : Сов. Радио, 1980. – 294 с.
8. Tousi Y. M. Delay coupled oscillators for frequency tuning of solid-state terahertz sources / Y. M. Tousi, V. Pourahmad, and E. Afshari // Physical Review Letters. – 2012. – 108(23):234101.
9. Tousi Y. M. A novel CMOS high-power terahertz VCO based on coupled oscillators: Theory and implementation / Y. M. Tousi., O. Momeni, and E. Afshari // IEEE J. Solid-State Circuits. – 2012. – Vol. 47.– No. 12. – P. 3032-3042.
10. Дунаева М. А. Связанные генераторы субмиллиметрового диапазона / М. А. Дунаева // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60, № 1. – С. 61-71.
11. Adler R. // Proc. IEEE. – 1973. – V. 61. – № 10. – P. 1380.
12. Прохоров Э. Д. Эффективность генерации планарных диодов  $n^+n^-n^+$  с туннельными границами / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Реутина // Доповіди Національної академії наук України. – 2014. – № 3. – С. 82-89.
13. Кременецька Я. А. Використання ефектів сильних полів в нанорозмірних діодних структурах / Я. А. Кременецька // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2013. – № 1. – С. 37-41.
14. Прохоров Э. Д. Влияние междолинного переноса электронов на эффективность генерации диодов с туннельными границами на основе GaAs / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко // Доповіди Національної академії наук України. – 2012. – № 4. – С. 75-80.

**Автор статьи**

**Кременецкая Яна Адольфовна**, канд. техн. наук, доцент кафедры телекоммуникационных технологий, Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев. Тел. +380 67 302 22 42. E-mail: ya.cremen@mail.ru.

Дата надходження в редакцію: 4.10.2015 р. Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Чепілко М. М.