

# ВАКУУМНАЯ И ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК621.383.5

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАЗИОПТИЧЕСКОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

О. И. Белоус, О. Н. Сухоручко, А. И. Фисун

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова, НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: obel@ire.kharkov.ua*

Дано описание уголково-эшелетного открытого резонатора. Рассмотрена двумерная волноводная модель исследуемого резонатора и проведен анализ некоторых, в частности, квазисосновых типов колебаний с компрессией поля к оси резонатора. Исследованы характеристики генератора на диоде Ганна, стабилизированного по схеме с реактивно-отражающим резонатором, который возбуждается на квазисосновном типе колебаний. Кратковременная нестабильность частоты источника составляет  $\sim 10^{-9}$ %. Относительная долговременная стабильность частоты  $\Delta F/F \sim 10^{-8}$ . Ил. 7. Библиогр.: 14 назв.

**Ключевые слова:** открытый резонатор, диод Ганна, квазисосновой тип колебаний.

Стабилизация частоты и улучшение спектра твердотельных источников КВЧ диапазона волн осуществляется несколькими способами. Наиболее распространенные из них - метод автоматической подстройки частоты (АПЧ) по внешнему высокостабильному сигналу и затягивание частоты генератора на активном нелинейном элементе высокочастотным резонатором [1,2].

Отметим, что первый путь более сложный, поскольку здесь используется стабилизированный кварцевым резонатором множитель частоты с высокой кратностью умножения. К тому же, при использовании системы АПЧ частотные шумы источника подавляются только в полосе захвата. Стабилизация частоты внешним резонатором получила широкое распространение ввиду простоты ее реализации. Кратковременная и долговременная стабильности частоты генератора определяются добротностью резонансной колебательной системы, стабильностью ее размеров и параметрами нелинейного элемента. В СВЧ и КВЧ диапазонах наиболее распространенной является схема с реактивно отражающим резонатором [2]. Сейчас уже трудно установить приоритет применения этой системы тем или иным автором, сошлемся на работу [3]. В работе описан генератор 3-см диапазона волн на диоде Ганна, стабилизированный цилиндрическим объемным резонатором, который возбуждается на цилиндрической  $TE_{011}$  - моде щелью связи в боковой цилиндрической поверхности. Данная схема стабилизации частоты с успехом используется в КВЧ диапазоне вплоть до частот 50-60 ГГц. Однако при продвижении в более высокочастотную область (70 ГГц и выше) использование объемных стабилизирующих резонаторов наталкивается на ряд трудностей, которые связаны с падением добротности из-за уменьшения объема резонатора и возрастания омических потерь в стенках резонатора.

В работах [4,5] предложено использовать квазиоптические принципы развития схем стабилизации частоты и мощности твердотельных источников электромагнитных волн, т. е. использовать с этой целью открытые резонаторы со ступенчато-деформированными зеркалами.

Данная работа посвящена выбору типа квазиоптического открытого резонатора (ОР) для целей стабилизации частоты, для чего было проведено электродинамическое моделирование характеристик ОР. Нами исследованы спектральные и энергетические характеристики генераторов на диодах Ганна миллиметрового диапазона длин волн.

### 1. Выбор типа открытого резонатора.

Требования к колебательному контуру квазиоптического твердотельного источника сформулируем в следующем виде:

- достаточно высокое разрежение спектра собственных частот резонансной системы. В пределе необходимо стремиться к одночастотному режиму возбуждения ОР в полосе возбуждения колебаний активного элемента;

- высокая собственная добротность колебаний на рабочей частоте;

- возможность согласования импедансов нелинейного элемента (низкое сопротивление порядка нескольких Ом) и колебательного контура (высокое сопротивление, приближающееся к сопротивлению свободного пространства).

Кроме этих требований, необходимо обеспечить приемлемые габариты и вес колебательной системы, а также минимизировать влияние внешних условий (температура, влажность и т. д.) на спектральные характеристики и выходную мощность. ОР удовлетворяют основным перечисленным требованиям, однако, проблема согласования импедансов и габариты вынуждают провести поиск путей решения задачи согласова-

ния и создания малогабаритных квазиоптических резонансных систем.

В работе [6] предложен сферуголково-эшелеттный ОР, в котором одно из зеркал выполнено из двух прямоугольных эшелеттов (рис. 1), а в [7] дано краткое описание метода теоретического анализа электродинамических качеств предложенного ОР.

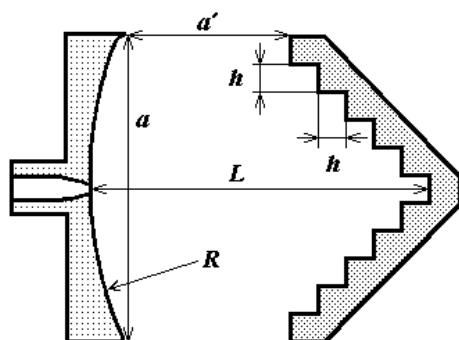


Рис. 1. Конфигурация сферуголково-эшелеттного ОР

При соответствующем выборе геометрических размеров и типа эшелетта (с прямоугольными ступенями) решетки можно установить в положение, при котором на некоторых частотах наблюдается автоколлимационное отражение. В этом случае зеркало-эшелетт можно представить в виде многоуровневой отражательной поверхности, которую можно заменить некоторой эквивалентной отражающей плоскостью. Однако, как показали исследования, такое упрощенное представление уголково-эшелеттного зеркала не дает полной картины электродинамических процессов в резонаторе. В работе [8] рассмотрены открытые резонаторы со скачком импеданса на краях зеркал и показано, что такие ОР обладают более высокой добротностью собственных колебаний, а спектр их более разрежен по сравнению с классическим ОР аналогичных размеров. Одним из способов формирования скачка импеданса является изменение геометрии зеркала. С этой точки зрения уголково-эшелеттное зеркало можно представить как набор скачкообразных деформаций, которые уменьшают боковую апертуру  $a'$  ОР, и ввести понятие дополнительного ограничения резонансного пространства [6] резонатора<sup>1</sup>. Поскольку спектр и добротность колебаний в ОР зависят от связи резонатора с внешним пространством [9] и определяются дифракцией электромагнитных волн на краях зеркал, можно предположить, что дополнительное огра-

<sup>1</sup> Под термином “дополнительное ограничение резонансного пространства ОР” авторы подразумевают случай, когда боковая апертура  $a'$ , через которую ОР связан с внешним пространством, меньше длины резонатора  $a' < L$ . В реальных сферуголково-эшелеттных ОР это соотношение составляет  $L \approx 2a'$ .

ничение резонансного пространства будет влиять на поведение этих параметров ОР. Дополнительное ограничение резонансного пространства ОР позволяет также трансформировать структуру полей собственных типов колебаний в призеркальной области, что используется для согласования активного элемента с полем ОР.

**2. Волноводная модель ОР с уголково-эшелеттным зеркалом. Моделирование возбуждения собственных колебаний ОР.** В основу реализованной волноводной модели<sup>2</sup> положена идея интерпретации собственных колебаний ОР как “запертых” при сильном отражении от открытых концов отрезка волновода, которым согласно [9] представлен ОР. В случае, рассматриваемом нами, эта модель модифицирована тем, что возбуждающий волновод представлен в виде волноводного тройника, сферическое зеркало аппроксимировано плоской стенкой волновода, а два симметрично расположенных эшелетта представлены как набор ступенек в волноводе, соединенных регулярными отрезками волновода. На рис. 2 (на вставке) показана модель ОР с уголково-эшелеттным зеркалом. Мы ограничились малоапертурной моделью, состоящей из семи граней, в которой апертура зеркала составляет  $a = 7h$ , а эквивалентная длина ОР равна  $L = 5h$ , где  $h$  - высота ступени. Решается неоднородная задача возбуждения ОР плоской волной внешнего источника, поступающей из возбуждающего волновода (показано стрелкой на вставке рис. 2). Рассмотрено возбуждение  $H$ -поляризованных колебаний (вектор  $\vec{E}$  лежит в плоскости рисунка). Следовательно, ширину возбуждающего волновода можно варьировать для изменения коэффициента связи и соблюдения одномодового режима в возбуждающем волноводе. Для анализа сложного электродинамического узла, которым представлена волноводная модель ОР, использован метод обобщенной матрицы рассеяния [10] и система электродинамического моделирования СЭМ-04 [11]. Детально этот подход к анализу ОР описан в работе [12].

На рис. 2 представлен спектр вынужденных колебаний при возбуждении ОР со стороны уголково-эшелеттного зеркала<sup>3</sup>. Не останавливаясь на анализе низкочастотных типов колебаний

<sup>2</sup> Рассматривается двумерная модель, которая легко обобщается на трехмерный случай, поскольку в направлении оси  $Z$  в реальных ОР с уголково-эшелеттным зеркалом нерегулярности отсутствуют.

<sup>3</sup> При  $a \ll \lambda$  (слабая связь) спектр собственных и вынужденных колебаний совпадает с достаточной степенью точности. Здесь мы рассматриваем возбуждение ОР со стороны уголково-эшелеттного зеркала через плоский волновод с апертурой  $a$ , поскольку такое моделирование ближе к реальности. Мы исследуем характеристики генератора, где активный элемент расположен вблизи уголково-эшелеттного зеркала.

( $\kappa < 2,5$ ), которые носят волноводный характер (здесь  $\kappa = L/\lambda$  - безразмерная частота), остано-

вившаяся на условиях возбуждения квазиоптических, присущих открытым системам, колебаний.

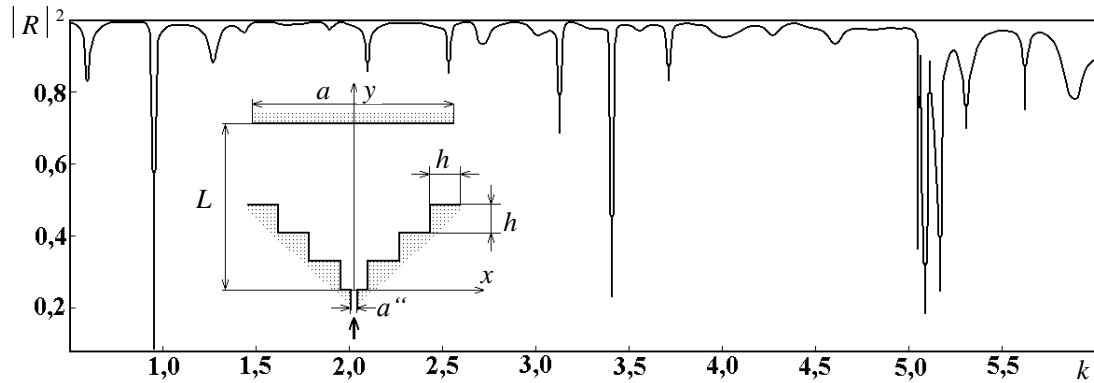


Рис. 2. Двумерная волноводная модель ОР с уголково-эшелеттным зеркалом и спектр вынужденных  $H$ -поляризованных колебаний при возбуждении со стороны уголково-эшелеттного зеркала

В резонаторах с дисперсионными элементами (решетками) дополнительные селективные свойства определяются пересечением двух условий резонанса:

- кратность длины резонатора целому числу полуволен

$$L = q \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где  $q = 1, 2, 3, \dots$  - продольный индекс колебаний;  
- автоколлимационное отражение  $n$ -й волны Флоке от периодической структуры [13]

$$\frac{\lambda}{l} = -2 \frac{\sin \varphi}{n}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  - угол автоколлимационного отражения волны с номером  $n$ , здесь  $n = 1, 2, 3$ ;  $l$  - период эшелеттной решетки.

В случае прямоугольного эшелетта и установке эшелетта под углом  $\varphi = 45^\circ$  к оси ОР второе условие можно записать через высоту ступени эшелетта

$$h = |n| \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

Одновременно условия (1) и (3) выполняются на безразмерной частоте

$$\kappa_r = \frac{|n|L}{2h}. \quad (4)$$

Для модели, показанной на рис. 2, где  $L = 5h$  в интервале изменения безразмерной частоты  $0 \leq \kappa \leq 5,5$ , ожидаемые резонансные колебания возбуждаются при  $\kappa_2 \approx 2,5$  ( $n = 1$ ) и  $\kappa_3 \approx 5$  ( $n = 2$ ), что подтверждается сингулярными точками  $\kappa_1 = 2,51$  и  $\kappa_2 = 5,16$ . На рис. 3, а представлена топология поля колебания, которое по традиционной классификации следует отнести к  $TEM_{05}$  основному типу, индекс 0 указывает на отсутствие вариаций поля вдоль оси  $x$ , а индекс 5 - на количество вариаций поля вдоль оси  $y$  (продольное число). Обратим внимание на резонансы при  $\kappa = 3,09$  и  $\kappa = 3,37$  (рис. 3, б, в).

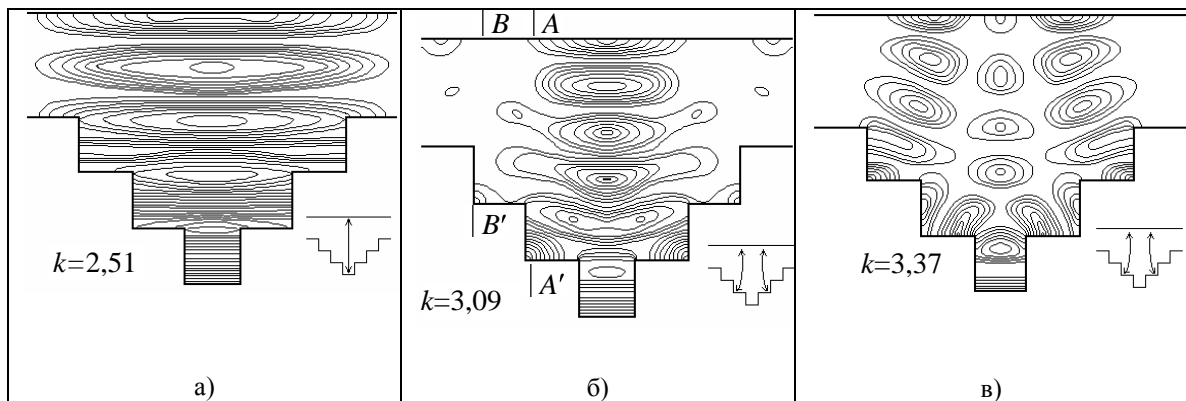


Рис. 3. Топология  $H_z$ -компоненты основного (а), квазиосновного (б) и высшего (в) типов колебаний

Добротность их превышает добротность основного типа. При этом выполняется одно условие продольного резонанса (1), а высота ступенной эшелетта  $h$  резонансной не является. Детально механизм формирования топологии поля квазиклассических типов колебаний изучен в работе [12]. Укажем, что отражение волноводных волн, формирующих эти типы, в самих себя больше, чем трансформация их в волны, идущие на периферию ОР. Следовательно, до края зеркал энергия практически не доходит (сечения  $AA'$  и  $BB'$  рис. 3, б). Дифракционные потери на этих типах колебаний значительно ниже, чем основного классического. Поскольку поле типов колебаний с компрессией поля стянуто к оси резонатора, этот факт может послужить предпосылкой для уменьшения апертуры зеркал без существенного увеличения дифракционных потерь.

Для экспериментальной проверки численного анализа спектров ОР с уголково-эшелеттным зеркалом был изготовлен резонатор, геометрические размеры которого близки к волноводной модели ОР. С другой стороны, геометрия исследуемого резонатора была практически тождественной резонансной системе генератора на диоде Ганна, характеристики которого исследуются во второй части работы. Размеры ОР (см. рис. 1) следующие: апертура зеркал  $a = 44$  мм; радиус кривизны сферического зеркала  $R = 80$  мм, высота ступеней эшелеттов  $h = 4,7$  мм; длина резонатора  $L = 52 \div 54$  мм.

Измерение спектра ОР проводилось с применением панорамного измерителя КСВН и ослабления типа Р2-65, встроенного в установку для исследования характеристик квазиоптических устройств и систем, а идентификация типов колебаний проведена методом пробного тела на автоматизированном сканаторе. Данные о резонансах и распределении поля в ОР обрабатывались на ПЭВМ.

На рис. 4 представлены результаты экспериментального исследования характеристик ОР. Резонатор возбуждался  $H$ -поляризованной волной (вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен граням эшелетта). Проведено исследование спектра в диапазоне 26-38,5 ГГц.

При длине резонатора  $L = 52$  мм в указанном интервале частот возбуждались два резонанса на  $f_1 = 34,9$  ГГц и  $f_2 = 35,47$  ГГц, что соответствует длинам волн  $\lambda_1 = 8,60$  мм и  $\lambda_2 = 8,46$  мм. На вставке (1) рис. 4 показано распределение поля в плоскости, перпендикулярной оси ОР. Это распределение соответствует квази- $TEM_{0012}$  типу колебаний (1), а распределение, показанное на вставке (2) рис. 4, соответствует квази- $TEM_{1012}$  типу колебаний (2). Сравнение с

топологией полей, показанной на рис. 3, б, в подтверждает идентичность результатов, полученных при численном и натурном экспериментах. В пользу этого утверждения говорит также и то, что высота ступени  $h$  не является полуволновой, т. е. режим автоколлимационного отражения не наблюдается [13].

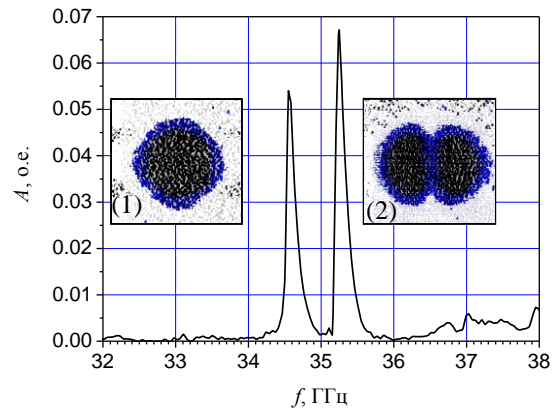


Рис. 4. Спектр уголково-эшелеттного ОР и топология полей квазиосновного (1) и высшего (2) типов колебаний.

Отметим, что в спектре исследуемого ОР не возбуждаются иные (классический основной и другие) типы колебаний, кроме квазиосновного с компрессией поля к оси ОР и сопутствующего ему высшего. Измеренная нагруженная добротность этих типов равна  $Q_1 = 657$  и  $Q_2 = 646$  соответственно. Незначительное различие в величине добротности говорит о том, что дифракционные потери этих двух типов практически одинаковы и незначительны, что подтверждается численным экспериментом [12].

**3. Исследование характеристик квазиоптического твердотельного генератора.** Генератор выполнен на диоде Ганна и работает в диапазоне  $\lambda \sim 8$  мм. Стабилизация генератора осуществляется сфероуголково-эшелеттным ОР по схеме с реактивно-отражающим резонатором [3]. Конструкция исследуемого генератора в сечении по плоскости, проходящей через ось резонатора и перпендикулярной образующим эшелеттов, показана на рис. 5.

Диод 1 на столбике с резьбой установлен в волноводной вставке 2 сечением  $7,2 \times 3,4$  мм. Корпус диода Ганна и диск 3 образуют первичный резонансный контур. Напряжение питания подается через штырь 4 с высокочастотным фильтром. Такая конструкция источника излучения на диоде Ганна или ЛПД в виде волноводной вставки отработана в деталях и различия могут быть в креплении диода, первичном контуре и других непринципиальных деталях. В зависимости от степени требуемой стабильности частоты и

согласования генератора с нагрузкой в источнике используется короткозамыкающий поршень или цилиндрический резонатор [2].

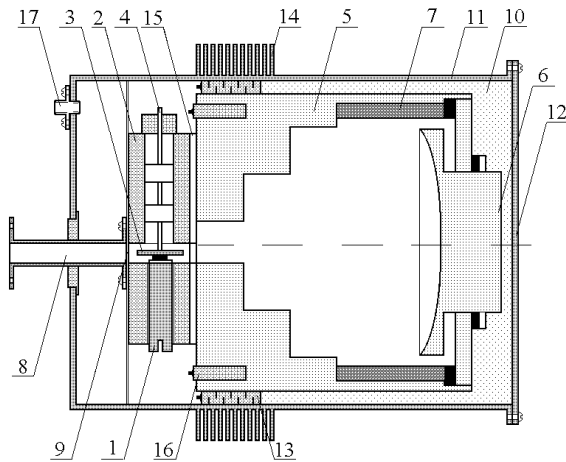


Рис. 5. Конструкция квазиоптического твердотельного генератора

В данном генераторе для стабилизации частоты используется малогабаритный квазиоптический сферуголково-эшелетный ОР. Он образован уголково-эшелетным зеркалом 5, состоящим из двух ступенчато-деформированных поверхностей. Это зеркало для улучшения механической жесткости резонатора изготовлено как единое целое с корпусом ОР. Второе зеркало 6 с радиусом кривизны  $R = 80$  мм составляет единое целое с механизмом перемещения, который служит для настройки резонатора на требуемую частоту. Апертуры зеркал одинаковы и равны  $a = 44$  мм ( $5,3 \lambda_{cp}$ ). Длина резонатора  $L = 52-54$  мм выбиралась из соображений минимизации массы и габаритов прибора и не критична к условиям устойчивости, которые необходимо выполнить для эквивалентного ОР с плоским и сферическим зеркалом [6,9] вследствие того, что исследуемый ОР возбуждается на квазиосновном типе, поле которого стянуто к оси резонатора (дифракционные потери минимальны). Цилиндрическая вставка 7, изготовленная из поглощающего материала, играет роль открытого пространства. Такая конструкция ОР обеспечивает виброустойчивость и простоту настройки. Вывод энергии осуществляется через отрезок волновода 8, выполненного из нейзильбера. Между волноводом 8 и волноводной вставкой установлено герметичное СВЧ прозрачное окно 9, которое обеспечивает изоляцию объема генератора от внешнего атмосферного воздействия. Корпус и эшелетты ОР выполнены из суперинвара с коэффициентом линейного температурного расширения  $K = 2,61 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а зеркало 6 - из меди с  $K = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Регулировочный винт зеркала, кроме роли механизма на-

стройки, играет роль температурного компенсатора.

Частота генерации на квазиосновном типе колебаний зависит от длины резонатора  $L$ , высоты ступени  $h$  и радиуса кривизны зеркала  $R$ :  $F_g = f(L, h, R)$ . Уход частоты, вызванный изменением температуры резонатора, является функцией линейного расширения материала  $\alpha$  и изменением показателя преломления заполнителя  $\Delta F_g / \Delta T = f(\alpha, L, \epsilon)$ , при этом изменение кривизны зеркала и высоты ступени не учитывается.

С целью улучшения долговременной стабильности источника излучения в конструкции, кроме герметизации, предусмотрена система температурной стабилизации. Корпус ОР помещен в теплоизолятор 10 (коэффициент теплопроводности  $K = 0,04$ ). В наружном корпусе 11 предусмотрена съемная крышка 12 для облегчения процесса настройки ОР. Величина теплового потока и его направление в процессе стабилизации температуры ОР регулируется двумя батареями элементов Пельтье 13, установленными между корпусом ОР и внешним радиатором 14, изготовленным из алюминия ( $K = 209$ ).

Фазовое расстояние между диодом Ганна и ОР регулируется подбором толщины волноводной вставки 15. Все выводы от электрических цепей питания диода, элементов Пельтье, датчиков температуры 16 собраны в одном разьеме 17, установленном на внешнем корпусе 11.

Измерение характеристик генератора проведено с помощью стандартной аппаратуры: частота измерялась гетеродинным частотомером ЧЗ-66, для измерения мощности использовался измеритель МЗ-53 и спектр генерации исследовался анализатором спектра С4-28.

На рис. 6 представлены частота и выходная мощность генератора в зависимости от длины резонатора  $L$  при механической перестройке ОР.

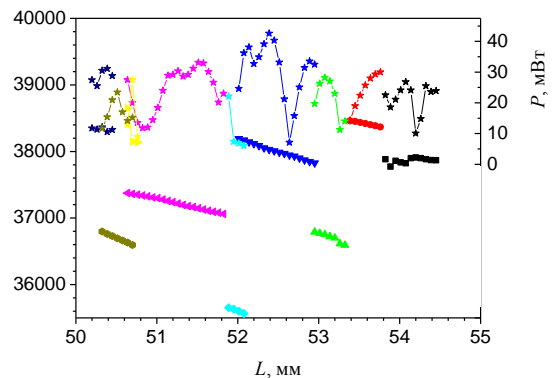


Рис. 6. Зависимость частоты и выходной мощности от длины сферуголково-эшелетного ОР

Из графиков видно, что генерация носит зонный характер. Однако в отличие от генераторов, в которых использовались ОР без дополнительных дисперсионных элементов (зеркала гладкие) [4], периодичности зон генерации не наблюдается. Наиболее выраженными являются зоны, в которых выполняются условия возбуждения квазиосновного типа (при длине резонатора  $L = 52,7-52,2$  мм;  $\lambda \sim 7,8$  мм; продольные числа  $q = 13$ ; квазиосновной  $TEM_{0013}$ ) и квазивысшего типа (длина резонатора  $L = 51,75-50,85$  мм;  $\lambda \sim 8,06$  мм; продольные числа  $q = 12$ ; квазивысший  $TEM_{1012}$ ). Относительная перестройка частоты в этих зонах составляет около 0,5-0,6%. Другие зоны генерации, в которых источник излучения возбуждается, носят неустойчивый характер и менее пригодны для разработки источников излучения на фиксированную частоту с подстройкой в пределах нескольких десятых процента.

Долговременная стабильность генерации в данных условиях обеспечивается стабильностью геометрических размеров ОР и согласующих цепей, а также герметизацией всего узла в целом. При разных режимах стабилизации при колебании внешней температуры элементы Пельтье могут работать как охлаждающие или нагревательные элементы. На рис. 7 показано отклонение частоты, измеренное с помощью частотомера типа ЧЗ-66.

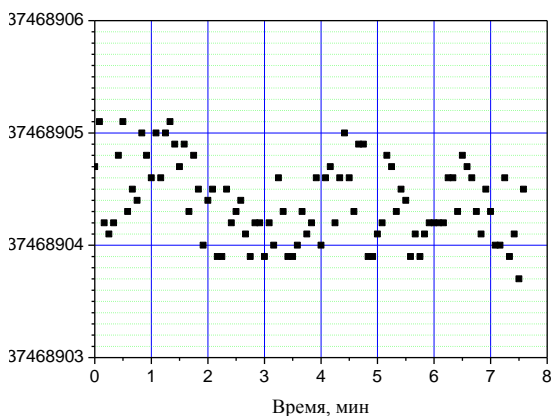


Рис. 7. Девиация частоты после выхода на стабильный температурный режим термостата

Основные характеристики генератора: частота генерации  $F_r = 37,47$  ГГц; кратковременная нестабильность частоты  $\Delta F/F = 1,6 \cdot 10^{-8}$ , измеренная за секунду; уровень частотных шумов - не более 105 дБ/Гц при расстройке на 20 кГц от несущей; ширина спектральной линии не превышает 0,25 кГц; выходная мощность составила 30 мВт. Электронная перестройка генератора составила величину порядка 8 МГц/В, что свиде-

тельствует о высокой добротности колебательной системы и хорошем согласовании нелинейного элемента. Долговременная нестабильность, оцененная по измерениям частоты гетеродинным частотомером  $\Delta F/F \sim 3 \cdot 10^{-7}$ , сохраняется при времени измерения более 1 ч. при активном термостатировании температуры  $\Delta T \sim 0,1$  К при поддержании температуры генератора  $34^\circ\text{C}$ .

**Выводы.** Таким образом, описаны характеристики квазиоптического источника излучения на диоде Ганна, генерирующего в 8-мм диапазоне волн. Методом масштабного моделирования [14] был разработан ряд источников излучения на диодах Ганна и ЛПД. В коротковолновой части миллиметрового диапазона волн источники излучения на ЛПД с квазиоптической резонансной системой по устойчивости генерации, стабильности частоты и шумовым характеристикам конкурентоспособны с генераторами на диодах Ганна, а по выходной мощности превосходят их.

1. Макаренко В. Т., Пинчук Г. А., Хайкин В. Б. Генератор на диоде Ганна для формирования СВЧ-радиолограмм с внутренним опорным сигналом // Приборы и техн. эксперимента. - 1990. - №3. - С.124-128.
2. Выровой С. И., Гуменный С. Н., Цирко Ю. А. Сравнение одноконтурных систем стабилизации генераторов на активных двухполосниках // Электронная техника. Сер.1 Электроника СВЧ. - 1976. - №3. - С.47-57.
3. Nagano S. and Ohnaka S. A highly Stabilized Ka-Band Gunn Oscillator // IEEE Transaction. - 1972. - MTT-18. - P. 885-890.
4. Belous O. I., Fisun A. I., Olchovskiy I. P. and Sirenko S. P. One-circuit Stabilization of Millimeter-Wave Solid-State Oscillator by Quasi-Optical Resonator // II IR&MMW. - 2000. - 21, N9. - P.1451-1460.
5. Belous O. I. and Fisun A. I. Long-Term Frequency Stabilization of Quasi-Optical Solid-State UHF-Oscillator // Electromagnetic Waves & Electronic Systems. - 1998. - 3, N4. - P.56-57.
6. Fisun A. I. Millimeter-wave open resonator with additional restriction of resonant space // II IR&MMW. - 1997. - 18, N12. - P.2353-2367.
7. Fisun A. I. Method for analysis of open resonators with step-like deformation of mirrors // Electronics Letter. - 1998. - 34, №2. - P.192-193.
8. Фиалковский А. Т. Открытые резонаторы, образованные плоскими зеркалами со скачком импеданса у краев // Журн. техн. физики. - 1966. - 36, №6. - С.1100-1108.
9. Вайнштейн Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. - М.: Сов. радио, 1966. - 323 с.
10. Mitra R. and Lee S. W. A. I. Analytical Techniques in the theory of guided waves. - New York, 1971.
11. Кириленко А. А., Луханин В. М., Ткаченко В. И. Теория, элементы и узлы антенно-волноводных трактов. - Харьков: Тест. Радио, 1991. - Вып.1. - 146 с.
12. Фисун А. И., Ткаченко В. И., Белоус О. И., Кириленко А. А. Возбуждение колебаний в открытых резонаторах с эшелетными и уголково-эшелетными зеркалами // Радиотехника и электроника. - 2000. - 45, №5. - С.632-639.
13. Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. Дифракционные решетки. - Киев: Наук. думка, 1986. - 232 с. (резонансное рассеивание волн: в 2-х т.; Т.1)
14. Архипов А. В., Белоус О. И., Булгаков Б. М. и др. Квазиоптические генераторы на диодах Ганна и лавинно-пролетных диодах с открытым резонатором // Приборы и техн. эксперимента. - 1991. - №3. - С.106-109.

POWER AND SPECTRUM PERFORMANCE  
OF QUASI-OPTICAL SOLID-STATE  
MM-WAVE OSCILLATOR

O. I. Belous, A. I. Fisun, and O. N. Sukhoruchko

Description of the corner-eshellette resonator has been presented. A two-dimensional model of resonator under consideration is presented and some operating modes, in particular, quasi-fundamental mode with a field compression have been analysed. Gunn-diode oscillator characteristics are investigated. Oscillator is stabilised by the reactive-reflected resonator which excited at the quasi-fundamental mode. Short-time frequency instability is no less than  $10^{-8} \text{ sec}^{-1}$ . Relative long-term instability  $\Delta F/F \sim 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Key words:** open resonator, Gunn-diode, quasi-fundamental mode.

ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА СПЕКТРАЛЬНІ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАЗІОПТИЧНОГО  
ТВЕРДОТІЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА  
МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНА  
ДОВЖИНИ ХВИЛЬ

О. И. Білоус, О. М. Сухоручко, А. І. Фісун

Описано кутово-ешелетній відкритий резонатор. Розглянута двовимірна хвилевідна модель резонатора, що досліджується, та проведено аналіз деяких, зокрема квазіосновних типів коливань з компресією поля до осі резонатора. Досліджено характеристики генератора на діоді Ганна, стабілізованого по схемі з реактивно-відбиваючим резонатором, який збуджується на квазіосновному типі коливань. Короткочасова нестабільність частоти джерела становить  $\sim 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ . Відносна довгочасова стабільність частоти  $\Delta F/F \sim 10^{-7}$ .

**Ключові слова:** відкритий резонатор, діод Ганна, квазіосновний тип коливань.

*Рукопись поступила 7 июня 2006 г.*