

ВЫБОР ИСТОЧНИКОВ КВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Кунденко Н. П.¹, Сапрыка А. В.²

¹Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка,

²Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова

Проведенный анализ источников КВЧ излучения с целью создания высокочувствительной системы диэлектromетрии, которая возможна с применением высокостабильного источника излучений RDX диапазона на основе диэлектрического резонатора с колебаниями "шепчущей галереи".

Постановка проблемы Определение электрофизических параметров сред является одним из важных направлений современной радиофизики, радиотехники, медицины, биологии и других отраслей науки и промышленности. Создание приборов, работающих в СВЧ и КВЧ диапазонах, способных определять, контролировать и по данным наблюдений автоматически принимать решения относительно состояния физического объекта или окружающей среды, является основной тенденцией современного приборостроения. Это связано и с разработкой новых методов определения диэлектрической проницаемости (ДП) микрообъектов животноводства.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время разработаны различные методы и схемы построения высокостабильных диодных генераторов (диоды Ганна – ДГ, лавинно-пролётные диоды – ЛПД), основанные на применении параметрической стабилизации частоты высокочастотными резонаторами, на умножении частоты высокостабильных кварцевых генераторов, на использовании внешней синхронизации, на применении систем автоподстройки частоты и фазы [1]. Проведенные исследования показали, что одним из перспективных ОР в твердотельной КВЧ электронике является резонатор с уголковым эшелеттным зеркалом, обладающий свойством пространственной селекции типов колебаний. В работе [2] приведены результаты исследования генератора, состоящего из сферического зеркала и зеркала, составленного из двух эшелеттов, расположенных под углами 45° к оси резонатора.

К настоящему времени на базе ОР созданы квазиоптические диодные генераторы с высокими спектральными характеристиками как следствие высокой собственной добротности ОР. Однако такие генераторы характеризуются сложной конструкцией, большими габаритами, массой и критичными к внешним воздействиям. Достаточно полный обзор работ [3] по созданию квазиоптических резонансных систем мм-го диапазона длин волн свидетельствуют о перспективности использования идей квазиоптики в построении стабильных по частоте генераторов.

Среди ДР, используемых в мм диапазоне длин волн как резонансная система генераторов, особое внимание на первых этапах исследований привлечен цилиндрический диэлектрический резонатор [4].

Цель статьи - выбор высокочувствительной системы диэлектromетрии, которая возможна с применением высокостабильного источника излучений RDX

диапазона на основе диэлектрического резонатора с колебаниями "шепчущей галереи".

Основные материалы исследования. Признанными достоинствами в мм. диапазоне длин волн обладают ДР в форме полудиска и полушара, расположенные на плоской проводящей поверхности с азимутально-неоднородными колебаниями типа "шепчущей галереи", главными из которых являются высокая добротность и разреженный спектр частот колебаний. Обнаруженный в аномально низком уровне диэлектрических потерь в лейкосапфире ($Q^{-1} \leq 5 \cdot 10^{-6}$ при 300 К в 3-сантиметровом диапазоне волн) позволил получить уникальные результаты при создании сверхстабильных генераторов СВЧ диапазона.

Наиболее высокие результаты по стабильности частоты в диапазоне до 60 ГГц достигнуты при использовании диодных генераторов с объёмными цилиндрическими резонаторами. В то же время применение ЛПД позволяет значительно увеличить уровень выходной мощности. Максимальная стабильность частоты и, соответственно, минимальные фазовые шумы достигаются при оптимизации схемы построения ГЛПД, режима питания и увеличении добротности стабилизирующего резонатора.

С увеличением частоты ($f > 60$ ГГц) эффективность объёмных резонаторов падает, т.к. возрастают омические потери в материалах, из которых изготавливаются резонаторы, а также уменьшаются их размеры, а, следовательно, и их добротность.

Один из возможных путей преодоления этих трудностей – переход к сверхразмерным волноведущим системам. Для согласования сосредоточенных нелинейных активных элементов, которыми являются ограниченные твердотельные – диоды Ганна, ЛПД, диоды Шоттки или СВЧ-транзисторы в квазиоптических источниках излучений СВЧ и КВЧ диапазонов, требуются специальные методы и специальные для данных источников открытые колебательные системы. В работе [2] описан твердотельный генератор с открытой электродинамической системой. В объёме полусферического ОР перпендикулярно его оси, расположена дифракционная решётка из прямоугольных металлических брусьев. Высота брусьев h , период ℓ и коэффициент заполнения θ выбирались из условия прозрачности решётки для Н-поляризованной волны ($h \sim \lambda/2$, $\ell < \lambda/2$, $\theta < \lambda/4$). Активный элемент устанавливался между двумя изолированными брусьями решётки вблизи оси резонатора.

При создании резонаторов с определёнными и заданными характеристиками пользуются форматом, определяемым отношением

$$\Phi = R / L, \quad (1)$$

где R - радиус резонатора,

L - продольный размер (толщина резонатора).

Цилиндрическими принято называть резонаторы с $\Phi \leq 2,5$ и дисковыми с $\Phi \geq 2,5$. Таким резонаторам присущи собственные гибридные колебания двух типов EH_{nml} и HE_{nml} , где первый индекс означает азимутальный индекс колебания, второй – радиальный, а третий – аксиальный (часть полуволны, укладываемой по высоте L резонатора). Спектр колебаний в резонаторе может быть настолько густым, что в рабочий диапазон частот попадает несколько резонансных колебаний. Плотность спектра ДР с данным типом колебаний определяется форматом резонатора, в основном радиусом и диэлектрической проницаемостью материала ε из которого резонатор изготовлен. В цилиндрическом диэлектрическом резонаторе интервал между частотами двух соседних мод по азимутальному индексу n при равенстве радиальных m и аксиальных l индексов приближённо выражается отношением $c / 2\pi R \sqrt{\varepsilon}$. Видно, что при больших значениях радиуса резонатора уменьшается частотный интервал между смежными колебаниями с индексами n и $n \pm 1$. Для достижения высокого значения собственной добротности резонатора стремятся к увеличению азимутального индекса n , что достигается увеличением радиуса резонатора. Таким образом, выбор формата ДР позволяет формировать модовый состав в резонаторе и, следовательно, определять его спектр.

В соответствии с известными исследованиями добротность ДР уменьшается приблизительно обратно пропорционально резонансной частоте. Так, известные наибольшие величины собственных добротностей цилиндрических ДР, возбуждаемых на основных типах H_{01l}, E_{01l} составляет 20000-30000 на частотах 1-2 ГГц и 2000 на частоте 60 ГГц. В связи с этим значительный интерес приобретают исследования по увеличению добротности ДР. Известным решением, позволяющим увеличить размеры ДР и его добротность, является возбуждение резонатора на типе колебаний "шепчущей галереи".

Разработки резонаторов в режиме «шепчущей галереи» показали возможность существенного увеличения добротностей по сравнению с ДР на основных типах колебаний. Так, при разработке полупроводникового аналога цезиевого стандарта частоты применен ДР на сапфировом стержне с волной EH_{50l} на резонансной частоте 4.85 ГГц; диаметр резонатора равен 5 см; собственная добротность резонатора $Q_0 = 290000$. Нагруженная добротность резонатора в схеме транзисторного генератора $Q_l = 60000$. С применением таких резонаторов созданы высокостабильные генераторы на гетеробиполярных транзисторах с

уровнем частотных шумов $S_f = -153 \text{ dB} / \text{Åö} / 10$ кГц и на отстройке 1кГц $S_f = -130 \text{ dB} / \text{Гц} / 1 \text{ кГц}$.

Диэлектрические резонаторы, работающие в режиме возбуждения высших азимутальных колебаний создают из изотропных и анизотропных материалов с $\varepsilon = 2 \dots 20$. Использование при изготовлении дисковых диэлектрических резонаторов таких анизотропных материалов, как одноосные монокристаллы кварца, лейкосапфира, рутила, обладающих малыми значениями тангенса угла диэлектрических потерь (не более 5×10^{-6}), дало возможность повысить собственную добротность резонатора. Лучшим материалом с точки зрения уровня диэлектрических потерь для дисковых резонаторов является лейкосапфир (Al_2O_3). В 3-см диапазоне собственная добротность лейкосапфира около 2×10^5 при $T = 293 \text{ K}$ и примерно 5×10^7 при температуре жидкого азота ($T = 77 \text{ K}$) и $(1 \dots 10) \times 10^9$ при гелиевых температурах. Добротность дисковых диэлектрических резонаторов примерно равна добротности используемого диэлектрика. Таким образом, такой резонатор существенно превосходит в этом отношении все другие типы резонаторов, включая сверхпроводящие резонаторы.

Существенный недостаток дисковых диэлектрических резонаторов из лейкосапфира – сильная зависимость резонансных частот от температуры резонатора. С увеличением формата ТКЧ резонатора с EH_{n11} колебаниями возрастает, в то время как с HE_{n11} колебаниями заметно уменьшается. Это указывает на необходимость правильного выбора формата резонатора и типа колебаний.

Генераторы с ДР различаются способом стабилизации частоты, видом управления частотой, конструктивным исполнением и активным элементом. Автономные генераторы формируют стабильные по частоте колебания с неопределенной фазой. Генераторы с синхронизацией частоты включают в себя генератор, управляемый напряжением (ГУН), с диэлектрическим резонатором и встроенную систему ФАПЧ с внутренним или внешним источником частоты сравнения.

В качестве активного элемента могут применяться кремниевые биполярные и полярные GaAs транзисторы, диоды Ганна и ЛПД. Выбор полупроводникового активного элемента зависит прежде всего от требований, предъявляемых к энергетическим и спектральным характеристикам радиоаппаратуры. ЛПД являются наиболее мощными приборами во всём мм диапазоне волн и значительно превосходят диоды Ганна. Однако по шумовым характеристикам ЛПД уступают диодам Ганна. Так, например, результаты экспериментальных исследований шумовых характеристик ЛПД и ДГ показали, что мера шума N - параметр диода ответственный за частотный шум автогенератора в диапазоне доплеровских частот, составляет порядка 40 дБ для ЛПД и 25 дБ диода Ганна

Генераторы с перестройкой частоты необходимы для повышения стабильности частоты с использованием системы ФАПЧ. Они работают по принципу сравнения частоты или фазы подстраиваемого генератора с частотой или фазой эталона, в качестве которо-

го могут быть использованы как генераторы (активные эталоны), так и резонансные системы (пассивные эталоны). В системах ФАПЧ отклонение частоты от номинального значения приводит к появлению сигнала ошибки, который, воздействуя на частоту подстраиваемого генератора, приближает ее к эталонному значению. Создание частотно стабилизированных генераторов с перестройкой частоты основано на применении высокодобротных резонаторов, собственная частота которых управляется при помощи механической или электрической перестройки частоты. Основное требование, предъявляемое к таким генераторам - обеспечение минимального изменения добротности резонатора. Для механической перестройки частоты диэлектрических резонаторов применяют металлические или диэлектрические элементы в форме штырей, пластин или дисков. Изменяя расстояние между резонатором и таким элементом, осуществляют подстройку частоты на несколько процентов.

Электрическая перестройка частоты диодных генераторов осуществляется в двух направлениях. Первое направление – это диодные генераторы с широким диапазоном частоты без введения каких либо методов для снижения частотных шумов. Второе направление – это диодные генераторы с плавной перестройкой стабильной частоты сигнала, отличающегося низким уровнем частотных шумов.

При использовании ЛПД наиболее простой способ основан на изменении тока питания диода I_0 . В этом случае частота лавинного резонанса пропорциональна $(I_0)^{0.5}$, что приводит при изменении I_0 к изменению частоты автоколебаний. Реализуемый диапазон перестройки составляет 15 -20 %. Существенным недостатком такого способа перестройки является значительное изменение мощности в полосе перестройки частоты и малая частотная стабильность. При создании частотно стабилизированных генераторов и систем ФАПЧ для перестройки частоты используются варакторные диоды. Полоса перестройки частоты зависит от добротности резонатора, величины связи диода с высокодобротным резонатором, параметров варактора и схемы его включения, волнового сопротивления волноводной секции.

Возможности реализации частотно стабилизированного электрически перестраиваемого источника излучения КВЧ диапазона зависит от наличия соответствующих полупроводниковых диодов, которые могут обеспечить необходимую выходную мощность, стабильность частоты и диапазон перестройки. В настоящее время в диапазоне частот $f = 70-77$ ГГц серийно выпускаются корпусированные ЛПД типа 2А 757 А, Б, В выходной мощностью $P = 200-300$ мВт и варакторные диоды типа 3А 639 А, Б, В на основе которых, при правильном выборе резонансной системы, возможно создание высокостабильного источника излучений КВЧ диапазона длин волн с электрической перестройкой частоты.

Выводы. Собственная добротность ДР с колебаниями "шепчущей галереи" в мм диапазоне длин волн соизмерима с добротностью ОР с металлическими зеркалами; отсутствуют результаты исследований и разработки диодных генераторов, стабилизированных

ДР, в диапазоне свыше 40 ГГц; большая добротность и особенности распределения мод азимутальных колебаний в лейкосапфировых ДР позволяет их использовать при создании резонансных систем с повышенной стабильностью частоты и низким уровнем частотных шумов; применение полудисковой конструкции диэлектрического резонатора с металлической проводящей поверхностью позволяет расположить активные элементы для возбуждения резонатора.

Список использованных источников

1. Гвоздев Б. Н. Частотные шумы твердотельных генераторов в режимах комбинированной параметрической и электрической стабилизации частоты / Б. Н. Гвоздев, В. Н. Ештокин, С. С. Зырин, А. А. // Электронная техника. - Сер. 1. Электроника СВЧ. - 1980. - № 4. - С. 24-28.
2. Бородкин А. И. Полупроводниковый генератор с колебательной системой - открытый резонатор с отражательной решеткой / А. И. Бородкин, Б. М. Булгаков, В. В. Смородин // Письма в ЖТФ. - 1980. - Т. 6. - № 10. - С. 1189-1193.
3. Фисун А. И. Квазиоптические твердотельные источники излучения: принципы построения, тенденции развития и перспективы приложений / А. И. Фисун, О. И. Белоус // Зарубежная электроника. Успехи современной радиоэлектроники. - 1999. - № 4. - С. 41-64.
4. Царапкин Д. П. Применение диэлектрических резонаторов с волнами типа "шепчущей галереи" для стабилизации частоты автогенераторов СВЧ / Д. П. Царапкин // Радиотехника. - 2002. - № 2. - С. 28-35.

Анотація

ВИБІР ДЖЕРЕЛ КВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ВИМІРІ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Кунденко М. П., Саприка О. В.

Проведений аналіз джерел КНЧ випромінювання з метою створення високочутливої системи діелектрометрії, яка можлива при застосуванні високостабільного джерела випромінювань RDX діапазону на основі діелектричного резонатора з коливаннями "шепчучої галереї".

Abstract

CHOICE OF SOURCES OF KVCH OF RADIATION AT MEASURING OF DIELECTRIC PARAMETERS OF BIOLOGICAL OBJECTS

N. Kundenko, A. Sapryka

The analysis of sources of radiation to create EHF highly sensitive system dielectrometry, which you can use high-stable sources of radiation RDX range on the foundations of dielectric resonator with variations of "makes the gallery".