

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ КВЧ ГЕНЕРАТОР С ОТКРЫТЫМ РЕЗОНАТОРОМ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

к.т.н. А.В. Архипов, к.ф.-м.н. О.И. Белоус,
к.ф.-м.н. А.П. Корецкий, д.ф.-м.н. А.И. Фисун

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований квази-оптических полупроводниковых генераторов (ПГ) на диодах Ганна 8-миллиметро-вого (мм) диапазона с использованием стабилизирующего эллиптического открытого резонатора (ЭТОР). Показана перспективность использования подобных устройств для улучшения выходных параметров твердотельных источников излучения миллиметрового диапазона волн.

Введение. При создании сверхскоростных систем связи важную роль приобретает практическое освоение крайне высокочастотного (КВЧ) диапазона длин волн, в частности, миллиметрового. И в этом смысле на первый план выходит проблема разработки и создания частотно-стабильных низкоэнергетических источников КВЧ энергии – ПГ миллиметрового диапазона. Одним из методов повышения стабильности частоты и улучшения спектральных характеристик ПГ миллиметрового диапазона волн является затягивание частоты генератора внешним добротным резонатором. В большинстве случаев для этого используются объемные резонаторы [1, 2]. Однако в миллиметровом диапазоне их добротность значительно снижается, что влечет ухудшение качества спектра ПГ. Именно поэтому в полупроводниковой КВЧ технике возникла потребность в новых типах резонансных систем – открытых резонаторах (ОР) [3] с нетрадиционными электродинамическими свойствами. Анализ опубликованных работ [1 – 4, 7] показал, что применение добротных ОР улучшает спектральные характеристики ПГ, при этом их энергетические параметры оказываются вполне сравнимыми с волноводными конструкциями. Из этого вытекает цель представленной работы – теоретическое и экспериментальное исследование ОР, зеркала которых (или по крайней мере одно из зеркал) обладает дифференцированными в различных плоскостях фазокорректирующими свойствами (такими, на наш взгляд, являются отражающие поверхности эллипсоидального типа), а также в анализе взаимодействия активного КВЧ источника мощности с ОР данного типа и исследовании и спектральных и энергетических характеристик на их основе.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской комплексной программы ИРЭ НАН Украины "Фундаментальные исследования в области миллиметровых и субмиллиметровых волн и использование этих результатов в народном хозяйстве".

1. Одним из решений проблемы улучшения спектральных и энергетических характеристик квазиоптических ПГ является изменение геометрии пятна поля рабочей моды ОР, что диктует и изменение его конструкции [5]. В связи с этим нами проведены экспериментальные исследования квазиоптического генератора на диоде Ганна 8-ми миллиметрового диапазона на основе ОР существенно несферической геометрии, а именно – эллипсоторических открытых резонаторов (ЭТОР) полусимметричного типа с фокусирующими эллиптическими зеркалами, характерный профиль сечения которых описывается каноническим уравнением эллипса [6]. Цель этих исследований состояла в изучении и анализе взаимодействия активного источника КВЧ мощности с геометрически различными ОР, а также в исследовании их спектральных и энергетических характеристик.

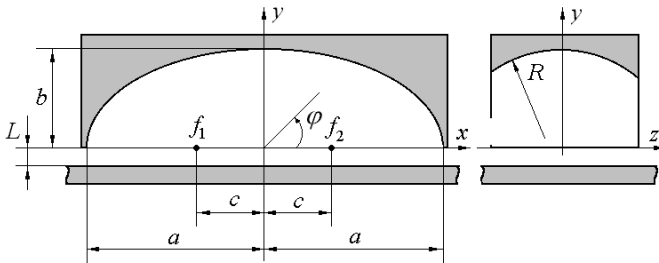


Рис. 1. Геометрические параметры исследуемого ЭТОР

Исследуемая квазиоптическая система представлена на рис. 1. Она образована плоским зеркалом с устройством связи и вогнутым зеркалом, поверхность которого имеет две ортогональные плоскости симметрии – азимутальную и радиальную. В азимутальной плоскости вогнутое зеркало обладает фокусирующими свойствами эллипса, а в радиальной – фокусирующими свойствами окружности. Способ формирования такой отражающей поверхности позволяет называть подобные зеркала эллипсоторическими (ЭТ), а открытые резонаторы – ЭТОР. В спектре вынужденных колебаний ЭТОР присутствуют волны типа TE_{mnp} , где m , n , q – количество фазовых вариаций полей собственных колебаний по азимутальной φ , радиальной R и аксиальной z координатам соответственно (рис. 1). Назовем возбуждение резонатора Е-поляризованным, если Е-компонента поля на раскрытие щели связи перпендикулярна фокальной оси образующего эллипса, и Н-поляризованным, если Е-компонента параллельна его фокальной оси.

В данной работе исследованы две конструкции ЭТОР с металлическими фокусирующими зеркалами со следующими геометрическими параметрами: радиус кривизны зеркал в радиальной плоскости сечения – $R = 175$ мм; размер апертуры в этой же плоскости – $Z = 40$ мм; размер апертуры в плоскости эллиптического сечения – $2a = 50$ мм. Эллиптические параметры: ЭТОР № 1 – $\varepsilon = 0,41$; ЭТОР № 2 – $\varepsilon = 0,778$. Второе металлическое зеркало было плоским (заведомо большего диаметра – 130 мм, что было необходимо для уменьшения дифракционных потерь на краях его апертуры), с одиночной щелью связи $7,2 \times 0,1$ мм² на торце выведенного на его поверхность сужающегося по узкой стенке прямоугольного волновода.

2. Исследования спектральных характеристик ЭТОР проведены с помощью стандартного измерителя КСВН и ослаблений в диапазоне 30 – 37 ГГц. Функциональная схема измерительной установки, работающей по схеме "на отражение", показана на рис. 2. Оба зеркала ЭТОР устанавливались в юстировочных узлах, позволяющих плавно изменять расстояния Y между ними, пространственное расположение щели связи (координата X) относительно центра эллипса сечения, а также изменять поляризацию колебаний путем поворота ЭТ зеркала относительно щели связи на плоском зеркале. В процессе измерений был использован специально разработанный для этих целей АЦП, предназначенный для сопряжения и обработки информации на РС, поступающей от измерителя КСВН, и соответствующего преобразования ее с последующей передачей на принтер.

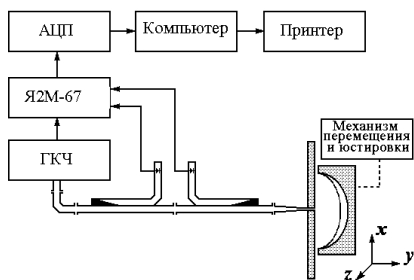


Рис. 2. Функциональная схема измерительной установки для исследования ЭТОР в пассивном режиме

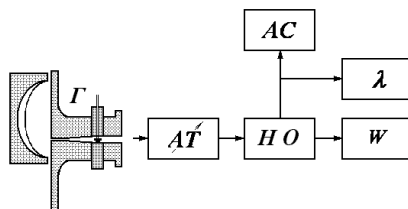


Рис. 3. Функциональная схема измерительной установки для исследования энергетических и частотных характеристик квазиоптического ПГ с ЭТОР

Вблизи резонансной частоты исследуемого резонатора коэффициент его передачи резко возрастает и достигает максимума на частоте резонанса. На экране индикатора Я2М-67 наблюдаем кривую, амплитуда

которой пропорциональна коэффициенту передачи по мощности ЭТОР в функции частоты возбуждения, в виде резонансных откликов, соответствующих различным типам колебаний ЭТОР. Обработка данных на РС позволяет определить резонансные частоты, коэффициенты передачи и нагруженные добротности различных типов колебаний, полученные экспериментальными методами. На рис. 3 показана установка для исследования энергетических и частотных характеристик квазиоптического ПГ с внешним ЭТОР, включенным по схеме "на отражение". Здесь Г – исследуемый генератор, АТ – аттенюатор, НО – направленный ответвитель, АС – анализатор спектра, λ – волномер, W – ваттметр. Исследования амплитудного распределения полей в объеме ЭТОР проведены методом пробного тела [7].

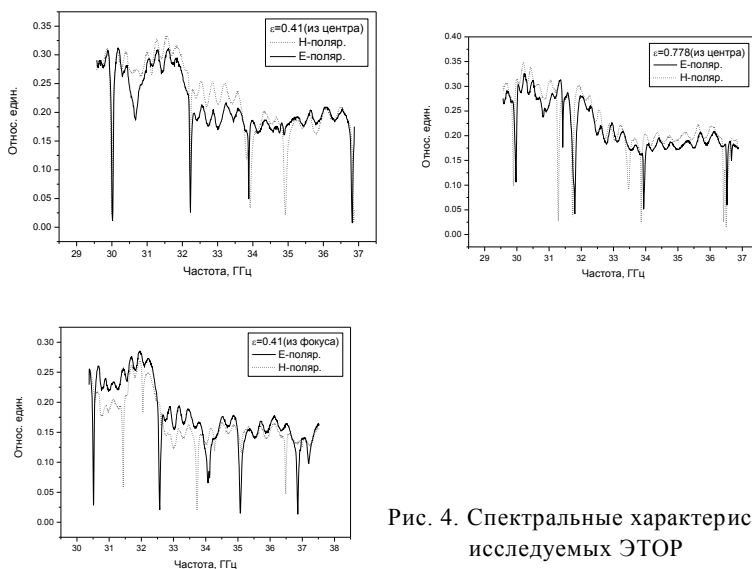


Рис. 4. Спектральные характеристики исследуемых ЭТОР

3. Результаты измерения спектральных характеристик исследуемых ЭТОР представлены на рис. 4. Спектральный состав ЭТОР зависит от пространственного положения щели связи как относительно фокальной оси (Y) эллипса сечения, так и от координат (X) его фокусных центров. Этот экспериментальный результат хорошо коррелирует с картинами распределения полей, полученными расчетным путем. При расположении щели связи в междофокусном пространстве возбуждаются колебания типа "прыгающий мячик" с гиперболической каустикой, свойственные классическим полусферическим ОР (см. рис. 5, а). При этом спектр ЭТОР с меньшим ϵ более густой, а добротность возбуждаемых мод

практически не превышает $Q_n \sim 600$. Такие значения добротностей присущи объемным и малогабаритным ОР, хотя и заметно их превышают. Если же возбуждать ЭТОР, располагая щель связи между фокусом и краем апертуры ЭТ зеркала, то получаем более разреженный спектр с колебаниями, имеющими добротность не ниже $Q_n = 1400$, что превосходит аналогичную величину для объемных резонаторов и вполне сравнимо с полусферическими ОР. Для ЭТОР с большим ε характерны колебания, имеющие топологию поля, показанную на рис. 5, б. Подобные колебания принято называть колебаниями типа "шепчущей галереи", поскольку они обладают свойством распространяться вдоль некоей направляющей поверхности с малым затуханием. В целом результаты расчета и эксперимента по определению распределения полей показывают, что в ЭТОР возможно возбуждение высокодобротных типов колебаний, позволяющих использовать их в качестве резонансных систем для стабилизации частоты твердотельных источников колебаний.

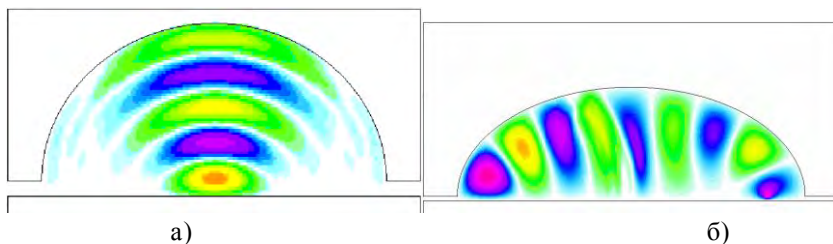


Рис. 5. Топология полей в ЭТОР:

- а – колебание с гиперболической каустикой;
- б – колебание типа "шепчущая галерея"

Активный источник квазиоптического ПГ на диоде Ганна изготовлен в виде волноводно-коаксиальной секции; сам генераторный диод установлен на специальном металлическом держателе в центре широкой стенки волновода сечением $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$. Частоту и мощность генерации можно было изменять путем механического перемещения держателя диода по высоте волновода. При этом частота генерации изменялась от 30 до 36 ГГц, а максимальная выходная мощность составляла 60 мВт на частоте 32 ГГц.

Подача запитывающего напряжения на диод Ганна (ЭТОР включен "на отражение", см. рис. 3), совместно с изменением расстояния L между плоскостями апертур зеркал, приводит к возникновению зон генерации на частотах, близких к резонансным частотам собственных колебаний ЭТОР. На рис. 6 приведены зависимости перестройки частоты f и мощности P для ЭТОР №1 и ЭТОР №2 от изменения расстояния L между

зеркалами. Наблюдаемый эффект затягивания частоты генератора характеризуется перескоками частоты, что объясняется междутиповым взаимодействием колебаний. Устойчивым режимом является такой, при котором от включения-выключения источника питания диода Ганна частота генерации не изменяется. При сравнении результатов измерений видно, что амплитудно-частотные характеристики ЭТОР с $\varepsilon = 0.778$ превосходят эти же характеристики ЭТОР с $\varepsilon = 0.41$ и составляют устойчивый диапазон генерации – 400 МГц, потери мощности на стабилизацию порядка – 2 дБ. На рис. 7 представлены характеристики электронной перестройки генератора стабилизированного ЭТОР № 2, здесь же для сравнения приведены характеристики генератора волноводно-коаксиальной конструкции. Видно, что коэффициент стабилизации у генератора, стабилизированного ЭТОР, выше, чем у генератора волноводно-коаксиальной конструкции, в данной работе он составляет 5 – 6.

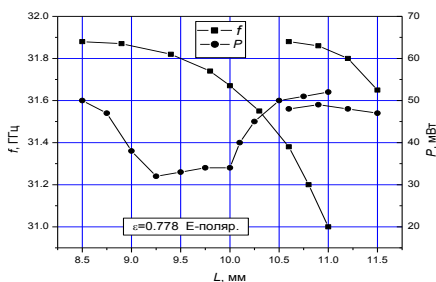
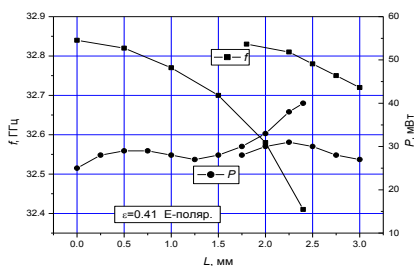


Рис. 6. Зависимость выходной частоты f и мощности P генератора от расстояния L между плоскостями апертур зеркал

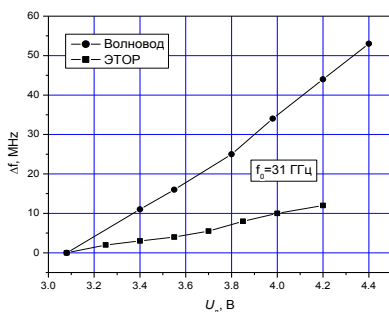


Рис. 7. Электронная перестройка по частоте для волноводного ПГ и ПГ, стабилизированного ЭТОР

Заключение. Эллипсоторический резонатор занимает промежуточное положение между малогабаритными и классическими открытыми резонаторами сферической геометрии. Одним из характерных и полезных свойств ЭТОР является возможность возбуждения высокодоброт-

ных типов колебаний с эллиптической каустикой (колебания типа "шепчущая галерея") при возбуждении системы из области между краем апертуры эллиптического зеркала и его ближайшим фокусом. Уменьшенные габариты ЭТОР, жесткая конструкция и высокая добротность позволяют использовать его в качестве колебательной системы твердотельных источников излучения миллиметрового диапазона с улучшенными спектральными характеристиками. Направленность дальнейших исследований связана с оптимизацией генерационных и конструктивных параметров и использованием ЛПД в колебательных системах подобного типа с целью повышения уровня выходной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минакова И.И., Панов В.И. Стабильные генераторы СВЧ с высокодобротными резонаторами. // *Радиотехника и электроника*. – 1988. – Т. 33, № 8. – С. 1696 – 1705.
2. Архипов А.В. Стабилизация частоты ГЛПД мм диапазона волн внешними объемным и открытым резонаторами. // В кн.: *Физика и техника мм и субмм волн. Сб. научн. тр.* – К.: Наук. думка, 1982. – С. 261 – 266.
3. Булгаков Б.М., Макаров В.Н., Скресанов В.Н., Шубный А.И. Исследование ГЛПД квазиоптического типа в трехмиллиметровом диапазоне. // В кн.: *Твердотельные генераторы и преобразователи мм и субмм диапазонов*. – Х.: ИРЭ АН УССР, 1989. – С. 5 – 9.
4. Кириченко А.Я., Харьковский С.Н. Твердотельный генератор с квазиоптическим диэлектрическим резонатором // В кн.: *Твердотельные генераторы и преобразователи мм и субмм диапазонов*. – Х.: ИРЭ АН УССР, 1989. – С. 62 – 66.
5. Корецкий А.П., Шестопалов В.П. Резонансные свойства эллипсоторического открытого резонатора // *ДАН СССР*, Т.307. – 1989. – № 4. – С. 857 – 861.
6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. *Справочник по математике*. – М.: Наука, 1986. – 554 с.
7. Шестопалов В.П. *Дифракционная электроника*. – Х.: Изд. ХГУ, 1976. – 231 с.

Поступила 31.03.2003

АРХИПОВ Александр Васильевич, канд. техн. наук, с.н.с. ИРЭ НАН Украины. В 1969 году окончил Харьковский государственный университет. Область научных интересов – исследование квазиоптических генераторов и усилителей миллиметрового диапазона волн.

БЕЛОУС Олег Игоревич, канд. физ.-мат. наук, с.н.с. ИРЭ НАН Украины. В 1982 году окончил Харьковский государственный университет. Область научных интересов – электродинамика открытых резонансных систем.

КОРЕЦКИЙ Анатолий Павлович, канд. физ.-мат. наук, с.н.с. ИРЭ НАН Украины. В 1974 году окончил Харьковский государственный университет. Область научных интересов – электродинамика открытых резонансных структур, генераторная и антенная техника миллиметрового диапазона волн.

ФИСУН Анатолий Иванович, доктор физ.-мат. наук, ведущий научн. сотр. ИРЭ НАН Украины. В 1967 году окончил Харьковский государственный университет. Область научных интересов – электродинамика открытых резонансных систем, квазиоптические твердотельные источники электромагнитных волн миллиметрового диапазона.