

Квазиоптическая резонансная система для твердотельного генератора

А. В. Архипов, О. И. Белоус, И. К. Кузьмичев, А. С. Тищенко

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

Статья поступила в редакцию 19 октября 2004 г.

Описан и проанализирован открытый резонатор, нагруженный на отрезок сверхразмерного коаксиального волновода. Резонатор может быть использован в качестве колебательной системы твердотельных генераторов миллиметрового диапазона длин волн.

1. Введение

В настоящее время открытые резонаторы (ОР) широко используются в качестве электродинамических систем твердотельных генераторов миллиметрового диапазона длин волн [1, 2]. Применение колебательной системы на базе ОР позволяет улучшить спектральные характеристики сигналов и существенно облегчить суммирование мощностей отдельных активных элементов. Вместе с тем при разработке твердотельных генераторов необходимо решать задачу согласования собственного колебания открытой резонансной системы с излучением активного нелинейного элемента, расположенного в объеме ОР. Другими словами, эта задача сводится к согласованию высокоомного ОР с низкоомным твердотельным генератором. Кроме этого, необходимо обеспечить подвод питания к активному элементу и, что не менее важно, отвод от него тепла. Поэтому твердотельный генератор либо помещается между ламелями H -поляризованной дифракционной решетки, расположенной в объеме ОР [3], либо закрепляется на поверхности одного из зеркал ОР [4]. В первом случае существенно усложняется конструкция генератора, поскольку решетка

должна перемещаться в объеме резонатора независимо от положения зеркал. С другой стороны, наличие дополнительных элементов в ОР приводит к росту потерь и, как следствие, к снижению добротности такой резонансной системы [2]. Во втором случае основная трудность состоит в согласовании поля излучения твердотельного генератора с полем рабочего колебания ОР. При этом подвод питания также представляет определенные сложности.

Как показано в работе [4], максимальная мощность твердотельного генератора с открытой резонансной системой получена при погружении активного элемента вглубь зеркала ОР. Таким образом, идея выноса полупроводникового диода из объема ОР является перспективной при разработке твердотельных генераторов миллиметрового диапазона длин волн. При этом довольно просто обеспечивается подвод питания, хотя вопрос согласования полей активного элемента и резонатора остается открытым.

Поэтому целью настоящей работы является анализ ОР, нагруженного на отрезок коаксиального волновода, который может быть использован в качестве электродинамической системы твердотельного генератора.

2. Согласование по полю

Оценим эффективность возбуждения колебания TEM_{01q} в полусферическом ОР с помощью коаксиального волновода, расположенного в центре плоского отражателя. В предположении, что волновод является одноименным с единственной распространяющейся волной TEM (см. рис. 1), компонента E_r последней в цилиндрической системе координат имеет вид [5]:

$$E_r = \frac{1}{r\sqrt{2\pi \ln \chi}}, \quad (1)$$

где $\chi = a/b$. Здесь и далее опущен множитель $\exp(-j\beta z)$, описывающий изменение E_r вдоль оси z . Апертуру плоского зеркала ОР считаем бесконечной, тогда распределение поля первого высшего колебания

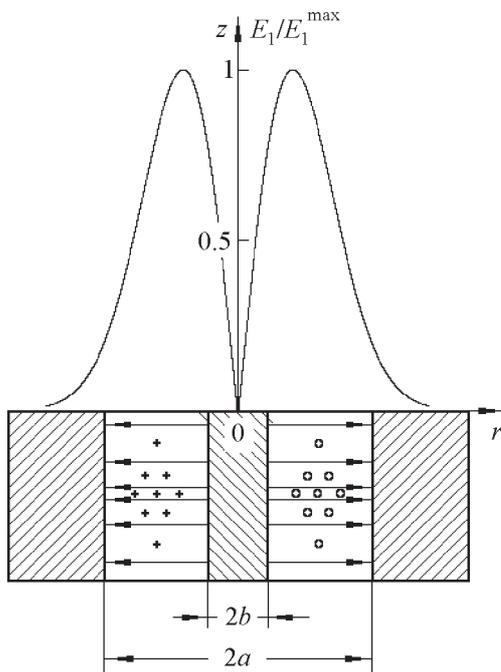


Рис. 1. Амплитудное распределение рабочего колебания ОР и волны TEM в коаксиальном волноводе, расположенном в центре плоского зеркала резонатора

TEM_{01q} в таком резонаторе в плоскости $z = 0$ описывается выражением [6]:

$$E_1(r, \varphi) = C_{01} \frac{\sqrt{2}r}{w_0} \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) \sin \varphi, \quad (2)$$

где C_{01} – амплитудный множитель, w_0 – радиус пятна поля низшего колебания TEM_{00q} на плоском зеркале ОР ($z = 0$). Амплитудное распределение рассматриваемого колебания TEM_{01q} в плоскости $z = 0$ приведено на рис. 1.

Теперь по аналогии с результатами работы [7] найдем эффективность возбуждения исследуемого колебания в ОР с помощью функционала:

$$\eta = \frac{\left| \int_S E_b E_p^* dS \right|^2}{\int_S |E_b|^2 dS \int_S |E_p|^2 dS}, \quad (3)$$

где E_b и E_p – структуры возбуждающего и рабочего полей, которые определяются выражениями (1) и (2) соответственно, а интегрирование ведется по бесконечной плоскости вблизи плоского зеркала резонатора. Значок “*” обозначает комплексное сопряжение. Этот функционал фактически показывает, какая доля мощности возбуждающей волны TEM коаксиального волновода переходит в рабочее колебание TEM_{01q} ОР.

При использовании коаксиального волновода с диаметрами наружного и внутреннего проводников соответственно $2a$ и $2b$ эффективность η возбуждения колебания TEM_{01q} в ОР с учетом (1) – (3) определяется выражением:

$$\eta = \frac{16}{\pi^2 \ln \chi} \left(e^{-k^2} - e^{-k^2 \chi^2} \right)^2, \quad (4)$$

где $k = b/w_0$.

Методика расчета η по формуле (4) состоит в следующем: для каждого значения χ меняем k в пределах $0 < k \leq 1$, находим η_{\max} и соответствующее ему значение k_{opt} для заданного χ . Здесь необходимо отметить, что при $k > 1$ эффективность возбуждения колебания TEM_{01q} с помощью волны TEM стремится к нулю. Это обусловлено тем, что радиус внутреннего проводника коаксиального волновода становится больше радиуса пятна поля колебания TEM_{00q} на плоском зеркале и этот проводник фактически становится вторым зеркалом резонатора не только для низшего колебания, но и для рассматриваемого TEM_{01q} .

Результаты расчета представлены на рис. 2, где приведены зависимости $\eta(k)$ для трех значений χ : $\chi = 1.5$ (кривая 1); $\chi = 4.441$ (кривая 2) и $\chi = 10$ (кривая 3). Максимальная величина $\eta = 0.712$ достигается при $\chi = 4.441$ и $k_{\text{opt}} = 0.399$ (кривая 2). Если размеры коаксиального волновода выбраны из условий $3.6 \leq \chi \leq 5.8$ и $0.328 \leq k \leq 0.463$, то эффективность возбуждения исследуемого колебания уменьшается незначительно и во всем диапазоне изменения χ будет не ниже 0.7.

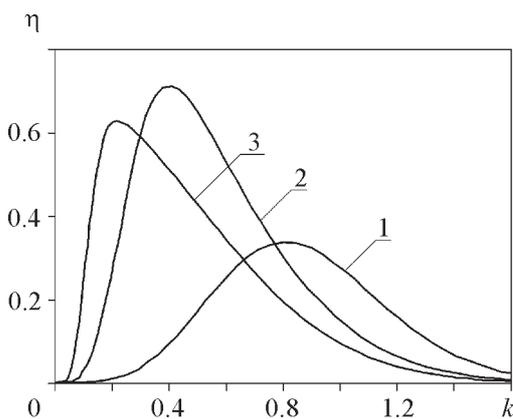


Рис. 2. Зависимости эффективности возбуждения исследуемого колебания $\eta(k)$ для различных значений параметра χ

3. Экспериментальные исследования

Нами был изготовлен полусимметричный ОР восьмимиллиметрового диапазона длин волн. Апертуры обоих зеркал равны 90 мм, радиус кривизны сферического отражателя $R = 180$ мм. Диаметры наружного и внутреннего проводников коаксиального волновода, расположенного в центре плоского зеркала резонатора, выбираются из условия получения максимальной величины $\eta = 0.712$, и поэтому $2a = 56.2$ мм, $2b = 12.7$ мм ($L/R = 0.611$, где L – расстояние между зеркалами ОР). На сферическом отражателе симметрично относительно плоскости, проходящей через ось резонатора, расположены два щелевых элемента связи, предназначенные для ввода и вывода сигнала. Оба элемента связи представляют собой плавные переходы с основного сечения волновода 7.2×3.6 мм на пониженное 7.2×0.2 мм. Расстояние, на котором элементы связи расположены симметрично относительно центра сферического зеркала, определяется положением максимумов напряженности электрического поля колебания TEM_{0125} ($L/R = 0.611$) на этом зеркале и равно 17.3 мм. В этом случае эффективность возбуждения колебания TEM_{0125} в ОР должна быть максимальной. Поскольку задачи электродинамики обладают принципом взаимности, мы рассматриваем возбуждение волны TEM в коаксиальном волноводе с помощью колебания TEM_{01q} ОР. Здесь необходимо подчеркнуть, что первостепенное значение приобретает ориентация электрического поля исследуемого колебания. Она должна максимально совпадать с ориентацией электрического поля волны TEM в коаксиальном волноводе. Поэтому возбуждающий и приемный волноводы ориентированы таким образом, что вектор \vec{E} волны H_{10} в этих волноводах лежит в плоскости, проходящей через ось резонатора.

Измерения проведены с помощью панорамного измерителя КСВН Р2-68. Сначала исследовался резонатор, у которого плоское зеркало глухое. Расстояние между зер-

калами оставалось неизменным и, как было сказано выше, $L/R = 0.611$. Спектр колебаний такого резонатора приведен на рис. 3, а. Как видно, во всем диапазоне перестройки частоты $f = 29 \div 38$ Гц наряду с колебанием TEM_{01q} в ОР возбуждается низшее колебание TEM_{00q} . Исследуемое колебание TEM_{0125} обозначено цифрой 1, цифрой 2 обозначено колебание TEM_{0025} . На этом же рисунке, на вставке, приведена в увеличенном масштабе резонансная кривая рассматриваемого колебания, по которой была вычислена нагруженная добротность колебания TEM_{0125} $Q_H = 2200$. Сравнительно невысокое значе-

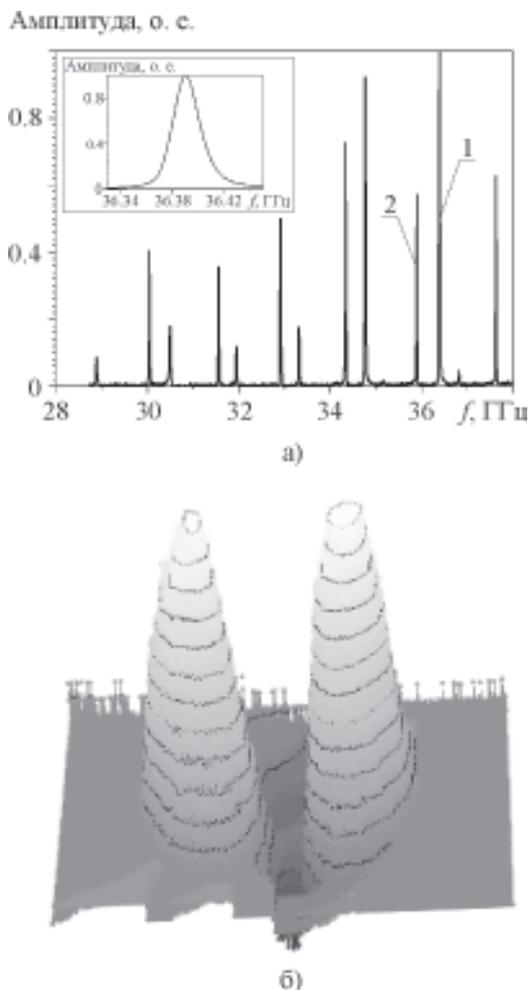


Рис. 3. Спектр колебаний полусферического ОР (а) и распределение поля TEM_{0125} типа колебаний (б)

ние величины Q_H для ОР таких геометрических размеров, по-видимому, можно объяснить двумя причинами. Во-первых, довольно сильной связью резонатора с нагрузкой, а во-вторых, тем, что сферическое зеркало было изготовлено из инвара. Это приводит к тому, что омические потери в таком ОР значительно выше, чем в резонаторе, зеркала которого изготовлены из меди или латуни. На рис. 3, б приведено распределение поля колебания TEM_{0125} , измеренное методом пробного тела [8] в третьей пучности электрической компоненты поля стоячей волны в резонаторе, считая от плоского зеркала. Как видно, распределение поля исследуемого колебания имеет вид двух четко выраженных пятен с нулем интенсивности в центре.

На рис. 4, а приведен спектр колебаний ОР, у которого в центре плоского зеркала расположен отрезок коаксиального волновода, имеющий указанные выше размеры. Глубина этого волновода равна 25.2 мм. Из рисунка видно, что во всем диапазоне перестройки частоты $f = 29 \div 38$ ГГц в резонаторе заданной геометрии существует только один тип колебаний. Здесь же в увеличенном масштабе приведена резонансная кривая этого колебания, благодаря которой было определено значение $Q_H = 1400$. Таким образом, нагруженная добротность ОР с отрезком сверхразмерного коаксиального волновода в центре плоского зеркала ухудшилась всего в 1.44 раза по сравнению с Q_H полусимметричного пустого резонатора. Это можно объяснить увеличением потерь в ОР за счет возбуждения волны TEM в отрезке коаксиального волновода. Косвенным подтверждением того, что в отрезке коаксиального волновода возбуждается волна TEM , может служить тот факт, что его глубина равна трем длинам волн резонансной частоты ОР $f_0 = 35.645$ ГГц. При этом необходимо учитывать, что волна TEM не имеет критической частоты.

На рис. 4, б приведено распределение поля исследуемого колебания, измеренное в той же пучности электрической компоненты поля стоячей волны, что и в случае пустого ОР. При возбуждении в отрезке коак-

сиального волновода волны TEM и при излучении ее обратно в объем резонатора за счет отражения от поршня колебание TEM_{0125} должно было преобразоваться в колебание TEM_{0125} с круговой симметрией [9], поскольку такую симметрию имеет волна TEM . Однако на практике произошло лишь частичное преобразование (см. рис. 4, б). Исследуемое колебание имеет вид подковы. Это можно объяснить, по-видимому, неидеальностью юстировки зеркал резонатора и центрального проводника отрезка коаксиального волновода.

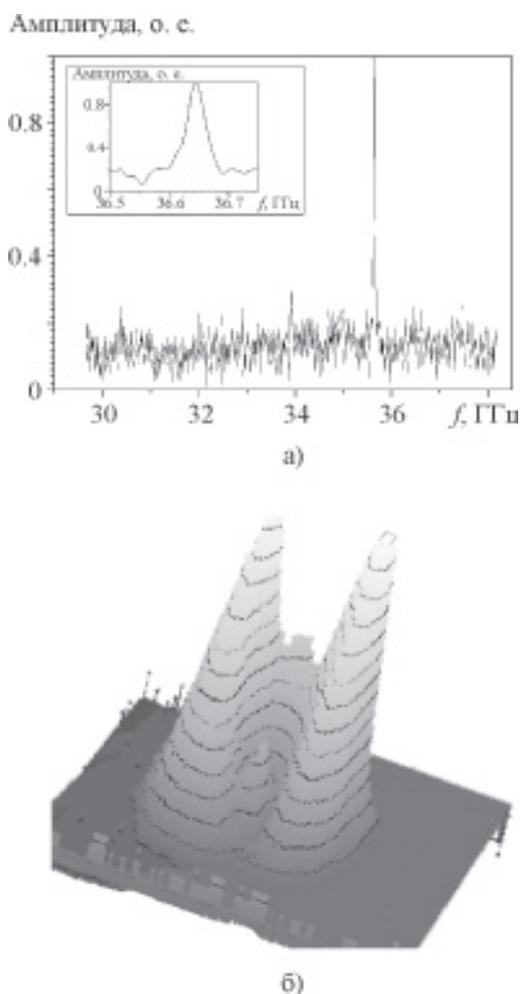


Рис. 4. Спектр колебаний ОР с отрезком сверхразмерного коаксиального волновода в центре плоского зеркала (а) и распределение поля TEM_{0125} типа колебаний в таком резонаторе (б)

4. Заключение

Проведенные исследования показали перспективность применения ОР с отрезком сверхразмерного коаксиального волновода для создания твердотельных генераторов миллиметрового диапазона длин волн. При этом нагруженная добротность предложенной электродинамической системы ухудшается всего в 1.44 раза по сравнению с нагруженной добротностью пустого полусимметричного ОР. В то же время, что особенно важно, во всем диапазоне перестройки рассматриваемого резонатора в нем возбуждается только один тип колебаний. Таким образом, ОР с отрезком коаксиального волновода обладает хорошими селективными свойствами. Это является положительным фактором при разработке твердотельных генераторов, поскольку не требуется дополнительных мер для селекции паразитных колебаний резонансной системы. При этом, учитывая размеры центрального проводника коаксиального волновода, в его разрыве в однородном электрическом поле можно разместить не один полупроводниковый диод, а целый ансамбль диодов. Изменяя величину зазора, в котором установлен диод (диоды), можно согласовывать низкоомный твердотельный генератор с высокоомным ОР. В то же время довольно просто решается задача теплоотвода.

Предложенная авторами электродинамическая система для твердотельных генераторов будет, по-видимому, перспективна и в коротковолновой части миллиметрового диапазона, когда уменьшаются все геометрические размеры элементов крепления диода. Это связано с тем, что размеры отрезка коаксиального волновода однозначно определяются геометрическими размерами ОР и рабочей длиной волны. Поэтому, изменяя радиус кривизны сферического зеркала и расстояние между отражателями резонатора для данной длины волны, можно сделать диаметр центрального проводника коаксиального волновода равным или даже большим длины волны.

Литература

1. Коцержинский Б. А., Мачусский Е. А., Першин Н. А., Тараненко В. П. Твердотельные генераторы с квазиоптическими резонансными системами // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1987. – Т. 30, №10. – С. 13-23.
2. Фисун А. И., Белоус О. И. Квазиоптические твердотельные источники излучения: принципы построения, тенденции развития и перспективы приложения // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – №4. – С. 41-64.
3. Бородин А. И., Булгаков Б. М., Смородин В. В. Исследование полупроводникового генератора с квазиоптическим выводом энергии // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1981. – Т. 24, №10. – С. 32-35.
4. Вертий А. А., Коцержинский Б. А., Першин Н. А., Попенко Н. А., Тараненко В. П., Шестопалов В. П. Исследование амплитудного распределения полей открытых резонаторов ГЛПД // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1981. – Т. 24, №10. – С. 35-38.
5. Фельдман А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. – М.: Сов. Радио, 1967. – 652 с.
6. Коэффициенты связи и коэффициенты преобразования волн в оптических системах. Квазиоптика / Х. Когельник / Пер. с англ. и нем. Под ред. Б. З. Каценеленбаума и В. В. Шевченко. – М: Мир, 1966. – С. 210-225.
7. Кузьмичев И. К. Согласование квазиоптических открытых резонаторов с волноводной линией передачи // Изв. вузов. Радиофизика. – 2000. – Т. 43, №4. – С. 325-334.
8. Техника субмиллиметровых волн // Под ред. Р. А. Валитова. – М: Сов. Радио, 1969. – 480 с.
9. Введение в физику лазеров / А. Мэйтлэнд, М. Данн / Пер. с англ. В. А. Батанова. Под ред. С. И. Анисимова. – М: Наука, 1978. – 408 с.

Квазіоптична резонансна система для твердотільного генератора

**О. В. Архипов, О. І. Білоус,
І. К. Кузьмичов, А. С. Тищенко**

Описано та проаналізовано відкритий резонатор, навантажений на відрізок надрозмірного коаксіального хвилевода. Резонатор може бути використаним як коливальна система твердотільних генераторів міліметрового діапазону довжин хвиль.

Quasioptical Resonant System for Semiconductor Oscillators

**A. V. Arkhipov, O. I. Belous,
I. K. Kuzmichev, and A. S. Tischenko**

An open resonator loaded with the section of the oversize coaxial waveguide is described and analyzed. The resonator can be used as an oscillating system for solid-state millimeter wave generators.