

МИКРОВОЛНОВЫЙ ГЕНЕРАТОР С РЕЗОНАТОРОМ "ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ"

*А.Я. Кириченко¹, Ю.Ф. Лонин², В.Г. Папкович², А.Г. Пономарев²,
Ю.В. Прокопенко^{1,2}, В.Т. Уваров², Ю.Ф. Филиппов¹*

¹*Институт радиопрофики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,
Харьков, Украина;*

²*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
Харьков, Украина*

E-mail: prokopen@ire.kharkov.ua; lonin@kipt.kharkov.ua

Исследована возможность генерации микроволнового излучения в системе с азимутально-периодическим током релятивистского электронного пучка, возбуждающего высокодобротный квазиоптический диэлектрический резонатор. Численно определены собственные параметры цилиндрического фторопластового резонатора. Детекторным приёмником 8 мм-диапазона зарегистрировано наличие излучения исследуемой системой. Приводятся проекты исследований микроволновых генераторов с высокодобротными резонаторами, в которых электромагнитные колебания "шепчущей галереи" возбуждаются потоком электронов. Идеология многорезонаторных генераторов базируется на принципах микроволновой генерации в клистродах как с докритическими, так и со сверхкритическими токами электронных пучков.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач вакуумной электроники является создание эффективных источников электромагнитных колебаний в коротковолновом диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн и, особенно, в диапазоне выше одного терагерца. В настоящее время генерирование колебаний в диапазоне миллиметровых длин волн обеспечивается классическими источниками: магнетронами, клистродами и лампами обратной волны. Однако уровень мощности излучения этих источников с переходом к субмиллиметровым длинам волн резко снижается [1, 2]. Несмотря на успехи в создании новых источников, таких как мазеры на циклотронном резонансе [3] и лазеры на свободных электронах [2], терагерцовый диапазон частот практически не имеет когерентных источников электромагнитных колебаний, которые можно было бы использовать в научно-исследовательских работах и микроволновой технике.

Развитие вакуумной электроники и её продвижение в коротковолновый диапазон длин волн сталкиваются с трудностями конструктивного характера, в основном, связанными с малыми размерами электродинамических структур по отношению к длинам волн. При этом возникает необходимость использования сильноточных электронных пучков [2]. В результате, с увеличением уровней мощностей источников возбуждения колебаний в электродинамических структурах, возникает необходимость преодоления трудностей, связанных с явлениями электрических пробоев. Это приводит к использованию в классических приборах сверхразмерных многомодовых электродинамических структур и, следовательно, к решению проблемы селекции возбуждаемой моды.

Целью работы является выяснение возможности использования новых принципов для создания источников электромагнитных колебаний в миллимет-

ровом диапазоне длин волн, не имеющих ограничений для продвижения в терагерцовый диапазон частот. Основной подход построен на использовании электродинамических свойств квазиоптического цилиндрического диэлектрического резонатора (ЦДР) [4], который используется в качестве основного элемента автоколебательной резонансной системы.

2. КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ ЦДР

Рассмотрим высокодобротный квазиоптический ЦДР (Рис.1), который является основой микроволнового генератора. Радиус и продольный размер ЦДР равны ρ_0 и L соответственно. Резонатор изготовлен из изотропного вещества с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1 = \varepsilon'_1(1 + itg\delta_1)$ и на торцах ограничен плоскими идеально проводящими поверхностями. Магнитная проницаемость вещества резонатора $\mu_1 = \mu'_1 + i\mu''_1$. Окружающая среда является изотропной и характеризуется электрофизическими параметрами ε_2 и μ_2 . В дальнейших исследованиях используются вещества с параметрами $\mu_1 = \mu'_1 = 1$, $\varepsilon_2 = \varepsilon'_2 = 1$ и $\mu_2 = \mu'_2 = 1$.

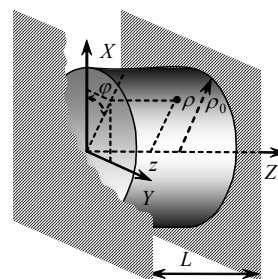


Рис.1. ЦДР с торцевыми проводящими поверхностями

Собственная частота $\omega_p = \omega'_p - i\omega''_p$ ЦДР с p -й модой определяется решением характеристического уравнения [4, 5]

$$(\alpha - \alpha_0)(\varepsilon_1 \alpha - \alpha_0) = a^2, \quad (1)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{1}{q_1 \rho_0} \frac{J_m'(q_1 \rho_0)}{J_m(q_1 \rho_0)}; \quad \alpha_0 = \frac{1}{q_2 \rho_0} \frac{H_m^{(1)'}(q_2 \rho_0)}{H_m^{(1)}(q_2 \rho_0)};$$

$$a = \frac{k_p k_z m (1 - \varepsilon_1)}{q_1^2 q_2^2 \rho_0^2}; \quad q_v^2 = \varepsilon_v \mu_v k_p^2 - k_z^2; \quad v = \begin{cases} 1, & \rho \leq \rho_0 \\ 2, & \rho > \rho_0 \end{cases},$$

в которых $k_p = \omega_p / c$ и $k_z = l\pi / L$. Цилиндрические функции $J_m(u)$ и $H_m^{(1)}(u)$ являются функциями Бесселя и Ханкеля первого рода соответственно. Штрих обозначает дифференцирование по аргументу. Под индексом p подразумевается совокупность трёх индексов msl . Радиальный индекс s , являясь порядковым номером корня характеристического уравнения (1), соответствует количеству вариаций поля вдоль радиальной координаты ρ . Аксиальный модовый индекс $l = 0, 1, 2, \dots$ соответствует числу вариаций поля вдоль продольного размера ЦДР. Азимутальный модовый индекс m принимает значения $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ и соответствует половине числа вариаций поля по углу φ .

Аксиальные компоненты электромагнитного поля собственного колебания ЦДР имеют вид [4, 6]:

$$E_{z\nu} = D_m \psi_c G_\nu(\rho); \quad H_{z\nu} = C_m \psi_s G_\nu(\rho), \quad (2)$$

где D_m и C_m – функционально связанные между собой постоянные; $\psi_c = \cos(k_z z) \exp i(m\varphi - \omega_p t)$ и $\psi_s = \sin(k_z z) \exp i(m\varphi - \omega_p t)$. Функции

$$G_\nu(\rho) = \begin{cases} J_m(q_1 \rho), & \nu = 1 \\ \frac{J_m(q_1 \rho_0)}{H_m^{(1)}(q_2 \rho_0)} H_m^{(1)}(q_2 \rho), & \nu = 2 \end{cases}$$

характеризуют распределения компонент поля по радиусу. Поперечные компоненты поля определяются через аксиальные (2):

$$q_v^2 E_{\rho\nu} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} \frac{\partial}{\partial z} E_{z\nu} - ik_p \mu_v \frac{\partial}{\partial \rho} H_{z\nu};$$

$$q_v^2 E_{\varphi\nu} = \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{\partial}{\partial z} E_{z\nu} + \frac{ik_p \mu_v}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} H_{z\nu}; \quad (3)$$

$$q_v^2 H_{\rho\nu} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} \frac{\partial}{\partial z} H_{z\nu} + ik_p \varepsilon_v \frac{\partial}{\partial \rho} E_{z\nu};$$

$$q_v^2 H_{\varphi\nu} = \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{\partial}{\partial z} H_{z\nu} - \frac{ik_p \varepsilon_v}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} E_{z\nu}.$$

В резонаторе существуют независимые ЕН- (Н-типа) и НЕ- (Е-типа) колебания [4, 6]. Однозначное соответствие решения уравнения (1) определенному типу колебания (Н или Е) можно идентифицировать только после определения доминирующей аксиальной компоненты поля, т. е. сравнения модулей максимальных значений $|H_z|_{\max}$ и $|E_z|_{\max}$. При выполнении условия [4] $|(\alpha - \alpha_0)^{1/2} (\varepsilon_1 \alpha - \alpha_0)^{-1/2}| \gg 1$ в резонаторе имеет место собственное НЕ-колебание, постоянная C_m которого определяется через D_m : $C_m = -D_m a / (\alpha - \alpha_0)$. В противном случае будет ЕН-колебание, для которого постоянная D_m определяется через C_m : $D_m = -C_m a / (\varepsilon_1 \alpha - \alpha_0)$.

Плотность электромагнитной энергии поля в резонаторе с собственным колебанием j типа (под j подразумевается Н или Е) определяется соотношением [4]:

$$w_v^j = \frac{1}{16\pi} (\vec{E}_v \vec{D}_v^* + \vec{H}_v \vec{B}_v^*) + \text{к.с.},$$

где "*" и к.с. обозначают комплексно-сопряжённое значение и выражение соответственно. Компоненты векторов \vec{E}_v и \vec{H}_v определяются соотношениями (2) и (3), а $\vec{D}_v = \varepsilon_v \vec{E}_v$ и $\vec{B}_v = \mu_v \vec{H}_v$.

Численно был исследован цилиндрический фторопластовый ($\varepsilon_1 = 2,04(1+1,7 \times 10^{-4}i)$ [4]) резонатор с радиусом $\rho_0 = 3,9$ см и продольным размером $L = 0,9$ см. В Таблице приведены собственные частоты $\omega_p' / 2\pi$ и добротности Q^E резонатора с модами Е-типа, имеющими модовые индексы $m = 36$, $s = 1$ и $l = 0; 1; 2$. Выбор размеров ЦДР и его мод обусловлен рабочим частотным диапазоном ниже рассматриваемого микроволнового генератора, а тип мод – способом возбуждения резонатора.

Собственные частоты и добротности ЦДР с модами Е-типа

Мода	ТМ _{36 1 0}	НЕ _{36 1 1}	НЕ _{36 1 2}
Частота, ГГц	34,9916	36,8385	42,0046
Добротность	4870	6035	6056

На Рис.2 приведены структуры полей собственных колебаний Е-типа ЦДР. Двумерные представления $E_{z\nu}$ -компоненты и плотности энергии w_v^E поля отображают его топологию на плоскости (X, Y). Значения соответствующих величин ($E_{z\nu}$ и w_v^E) представлены уровневой градацией белого и черного цветов, соответствующей максимальным значениям поля, сдвинутым по фазе на π . Трёхмерные представления аксиальных компонент $E_{z\nu}$ и $H_{z\nu}$ электромагнитных полей отображают их распределения в резонаторе с учётом функциональных зависимостей от ρ и z координат.

Из Рис.2 видно, что энергии полей слабозатухающих колебаний "шепчущей галереи" сосредоточены внутри диэлектрика вблизи цилиндрической поверхности резонатора. Для возбуждения колебаний в ЦДР необходимо ввести в спадающее поле его собственного колебания источник переменной энергии, частота флуктуаций которой равна ω_p' .

Использование в качестве возбудителя штыревой антенны [4] или потока электронов, ориентированных параллельно боковой поверхности резонатора, позволяет возбудить в нем колебания Е-типа. Для селекции мод с конкретным значением азимутального индекса m необходимо использовать систему штырей или азимутально-периодический электронный пучок. С учётом фазового синхронизма для возбуждения вышерассмотренных мод ЦДР необходим электронный пучок, состоящий из 36 потоков с угловым разнесом между ними в 10° .

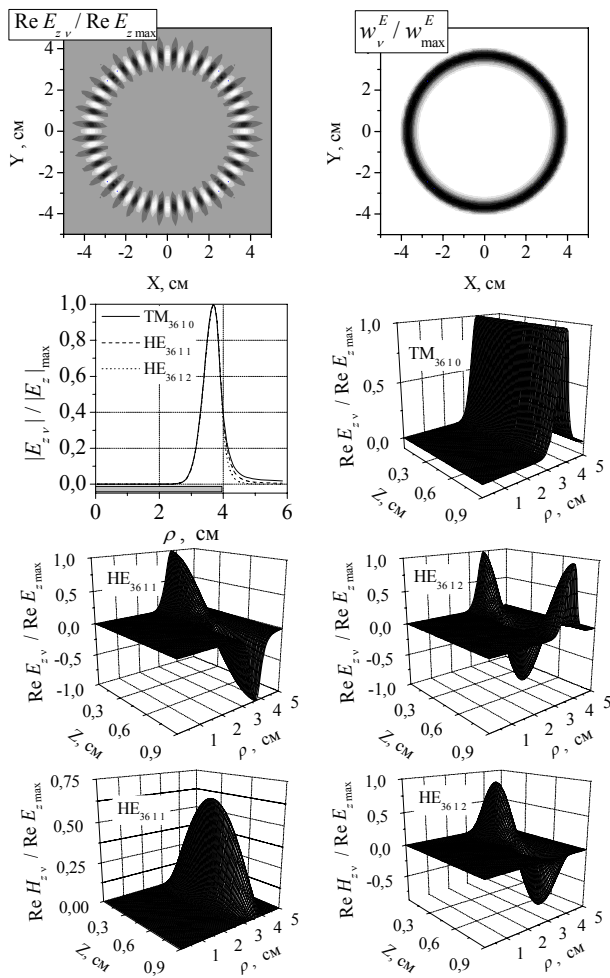


Рис.2. Распределение E_{zv} - и H_{zv} -компонент и плотности w_v^E энергии HE_{3611} -колебаний в ЦДР

3. МИКРОВОЛНОВЫЙ ГЕНЕРАТОР

Рассмотренный выше ЦДР может быть использован в качестве колебательной системы в электронных приборах с кратковременным взаимодействием, в которых время пролёта электрона между торцевыми стенками резонатора меньше полупериода (или соизмеримо с нечётным количеством полупериодов) его собственного колебания.

3.1. АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

На Рис.3 приведена структура автоколебательной системы на основе квазиоптического ЦДР. Электроны, эмитированные катодом (1) в результате действия ускоряющего поля диода, образованного катодом и анодом (3), проходят через отверстия в торцевой стенке ЦДР и формируют азимутально-периодический пучок с радиусом $\rho_b > \rho_0$. Радиус ρ_b выбирается таким, чтобы, с одной стороны, осуществлялось взаимодействие спадающих полей в радиальных направлениях электронного пучка и собственных колебаний резонатора. С другой стороны, расстояние между пучком и цилиндрической поверхностью резонатора должно мало влиять на его собственные частоты. В противном случае, частоты автоколебаний будут отличаться от ω'_p при сохранённых структурах полей колебаний в ЦДР.

Вторая торцевая стенка (5) ЦДР является коллектором электронного пучка и имеет потенциал анода. Вследствие флуктуаций электронов в сформированном пучке в резонаторе наводятся слабые колебания. В результате резонансного взаимодействия на собственных частотах ЦДР осуществляется возбуждение HE_{msl} -мод за счёт отбора энергии от электронов пучка.

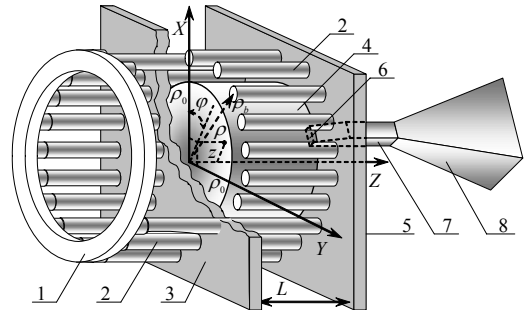


Рис.3. Автоколебательная система на основе ЦДР с модой "шнечущей галереи":

- 1 – катод; 2 – азимутально-периодический электронный пучок; 3 – анод-торцевая стенка ЦДР; 4 – ЦДР; 5 – коллектор-торцевая стенка ЦДР; 6 – щель; 7 – волновод; 8 – рупор

Энергия HE_{msl} -моды ЦДР преобразуется в излучение при возбуждении её полем щелевого излучателя, расположенного в максимуме одной локализации (вариации как по радиальной, так и по азимутальной координатам) поля. При этом прямоугольный щелевой излучатель в торцевой стенке ЦДР ориентируется так, чтобы его длинная сторона была перпендикулярна радиусу резонатора [4]. Излучатель через трансформаторное сочленение согласуется с прямоугольным волноводом, соединённым с пирамидальным рупором.

3.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА. ФОРМИРОВАНИЕ РЭП

Предварительные экспериментальные исследования автоколебательной системы были проведены на сильноточном электронном ускорителе "Темп-А", который формирует релятивистский электронный пучок (РЭП) с энергией 500 кэВ при длительности импульса 5 мкс по уровню половинной мощности. На Рис.4 приведена структура экспериментального микроволнового генератора.

Запасаемая энергия в генераторе импульсного напряжения (ГИН) Маркса равна 10 кДж при зарядке его ступеней напряжением ± 40 кВ. Импульс высокого напряжения ГИНа прикладывается к магнитоизолированному диоду, цилиндрический изолятор которого состоит из чередующихся изоляционных и градиентных колец. Кромочный цилиндрический катод изготовлен из нержавеющей стали и имеет диаметр 100 мм. Трубчатый электронный пучок формируется диодом магнетронного типа. Величина эмиссионного тока электронного пучка, равная 3...4 кА, определяется диаметром входного цилиндрического анода, величина которого равняется 150 мм. Диаметр цилиндрического лайнера транспортировки электронов также равен 150 мм.

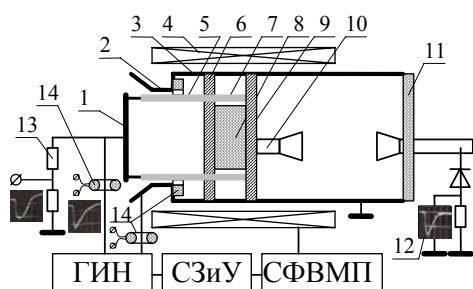


Рис. 4. Экспериментальная установка:

1 – катод; 2 – анод; 3 – лайнер; 4 – соленоид;
 5 – трубчатый пучок; 6 – перфорированная торцевая стенка ЦДР; 7 – азимутально-периодический РЭП; 8 – квазиоптический ЦДР; 9 – коллектор-торцевая стенка ЦДР; 10 – излучатель; 11 – диэлектрическое окно; 12 – детекторный приёмник; 13 – делитель напряжения; 14 – датчик тока (пояс Роговского);
 ГИН – генератор импульсного напряжения; СЗиУ – система запуска и управления; СФВМП – система формирования внешнего магнитного поля

В такой системе предельный вакуумный ток электронного пучка составляет величину ~ 4 кА. Электронный пучок транспортируется продольным внешним магнитным полем соленоида с максимально возможной индукцией до 0,8 Тл, обеспечиваемой системой формирования внешнего магнитного поля. Период внешнего магнитного поля равен 12,5 мс. В области катода значение индукции магнитного поля составляет величину $\sim 75\%$ от значения индукции внутри соленоида. При такой конфигурации магнитного поля в лайнере формируется трубчатый РЭП со средним диаметром 79 мм и толщиной стенки 5 мм (Рис.5,а).



Рис. 5. Отпечатки трубчатого (а) и сформированного азимутально-периодического (б) РЭП

Формирование азимутально-периодического электронного пучка (Рис.5,б) осуществляется при прохождении трубчатого РЭП через перфорированную торцевую стенку ЦДР. В результате формируются 36 электронных потоков, синхронизированных по фазе. Радиус ρ_b азимутально-периодического РЭП равен 41 мм, а диаметр каждого электронного потока – 4 мм.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пространственно-периодический по азимутальному углу РЭП, распространяясь вблизи цилиндрической поверхности фторопластового резонатора, возбуждал в нём собственную $HE_{36,1}$ -моду с частотой в диапазоне 35...42 ГГц при $0 \leq l \leq 2$. Вывод энергии микроволнового излучения осуществлялся

через прямоугольную щель в проводящей торцевой стенке резонатора, которая через трансформаторное согласующее сочленение переходила в металлический прямоугольный 8 мм-волновод, соединённый с пирамидальным рупором.

Контроль и измерение параметров сильноточного ускорителя электронов производились высоковольтным делителем напряжения и индуктивными датчиками токов, которые располагались в цепях входного и обратного токопроводов магнитоизолированного диода и в области транспортировки трубчатого РЭП. Индукция внешнего магнитного поля соленоида измерялась индуктивным магнитным зондом. Коэффициент деления напряжения, равный 10^3 с учётом работы ГИНа в аperiodическом режиме, подбирался из условия регистрации сигнала на широкополосном осциллографе с применением низковольтного делителя напряжения, входное и выходное сопротивления которого имели значения 50 Ом.

На Рис.6 приведены осциллограммы импульсов тока РЭП и напряжения магнитоизолированного сильноточного диода. Их длительности равны ~ 5 мкс, а амплитуды соответственно равны 3 кА и 500 кВ.

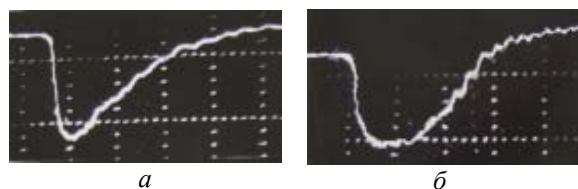


Рис. 6. Осциллограммы импульсов тока РЭП (а) и напряжения сильноточного диода (б)

Наличие микроволнового излучения исследуемой системой зарегистрировано детекторным приёмником 8 мм-диапазона длин волн.

5. МОДИФИКАЦИИ ГЕНЕРАТОРА

В рассмотренной выше автоколебательной системе (см. Рис.3) электроны взаимодействуют с высокочастотным электромагнитным полем, сосредоточенным между стенками ЦДР. Это поле осуществляет модуляцию электронных потоков по скорости. При дальнейшем движении электронов вне поля резонатора, в результате разности их скоростей, в потоках образуются сгущения и разрежения, т.е. осуществляется модуляция по плотности. Следовательно, разумно модифицировать рассмотренную автоколебательную систему в многорезонаторный генератор клистронного типа с высокодобротными резонаторами, в которых электромагнитные колебания "шепчущей галереи" возбуждаются потоком электронов. На Рис.7 приведена структура двухрезонаторной колебательной системы, в которой первый ЦДР является модулятором, а второй – улавливателем. В ЦДР такой системы возбуждаются $HE_{m,s,\delta}$ моды, в которых аксиальный индекс может принимать нецелочисленные значения.

В случае использования сверхкритического РЭП в генераторе, приведенном на Рис.7, между его резонаторами формируется виртуальный катод, что автоматически обеспечивает обратную связь в авто-

колебательной системе. Кроме того, управляемая обратная связь может быть осуществлена вводом части энергии возбуждаемой моды резонатора-улавливателя как в область ускорения электронов, так и в резонатор-модулятор по внешним каналам передачи.

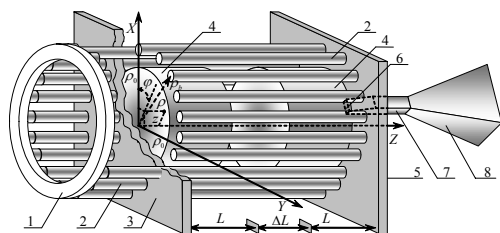


Рис. 7. Генератор с двумя квазиоптическими ЦДР: 1 – катод; 2 – азимутально-периодический электронный пучок; 3 – анод-торцевая стенка ЦДР; 4 – ЦДР; 5 – коллектор-торцевая стенка ЦДР; 6 – цель; 7 – волновод; 8 – рупор

Использование ЦДР с колебаниями "шепчущей галереи" позволяет осуществлять синфазное возбуждение системы щелевых излучателей. В этом случае вывод электромагнитной энергии излучения реализуется фазированной антенной решёткой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснована и разработана автоколебательная система на основе ЦДР с колебаниями "шепчущей галереи". Сформирован азимутально-периодический электронный пучок, позволяющий возбудить в цилиндрическом фторопластовом резонаторе HE_{361l} моды с частотой в диапазоне 35...42 ГГц при $0 \leq l \leq 2$. Осуществлён вывод электромагнитной энергии из высокочастотного ЦДР при возбужде-

нии щелевого излучателя, расположенного в максимуме одной локализации поля HE_{361l} моды. Экспериментально зарегистрировано наличие микроволнового излучения исследуемой системой в 8 мм-диапазоне длин волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. K. Parker, R. H. Abrams, B. G. Danly, B. Levush. Vacuum electronics // *IEEE Trans. on Microwave theory and techniques*. 2002, v.50, №3, p.835-845.
2. J. H. Booske. Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation // *Physics of plasmas*. 2008, v.15, (055502).
3. В. Е. Запечалов. Гиротрон: пределы роста выходной мощности и КПД // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2006, т.49, № 10, с.864-871.
4. А. Я. Кириченко, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак. *Квазиоптические твердотельные резонаторы*. Киев: "Наукова думка", 2008, с.286.
5. В. Н. Егоров, И. Н. Мальцева. Колебания в анизотропном диэлектрическом резонаторе с торцевыми отражателями // *Электронная техника. Серия I. Электроника СВЧ*. 1984, № 1, с.3-8.
6. Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов. Анизотропный дисковый диэлектрический резонатор с проводящими торцевыми стенками // *Журнал технической физики*. 2002, т.72, № 6, с.79-84.
7. Л. А. Вайнштейн. *Электромагнитные волны*. М.: "Сов. радио", 1957, с.581.

Статья поступила в редакцию 08.12.2009 г.

MICROWAVE OSCILLATOR WITH "WHISPERING GALLERY" RESONATOR

A. Ya. Kirichenko, Yu. F. Lonin, V. G. Papkovich, A. G. Ponomarev,
Yu. V. Prokopenko, V. T. Uvarov, Yu. F. Filippov

It was presented researches of a generation of microwave radiation into system with azimuthally periodical relativistic electron beam current that excites a high-Q quasi-optical dielectric resonator. The eigen parameters of cylindrical Teflon resonator were determined by numerical computation. Registration of the microwave radiation realizes by a crystal set of 8-mm wavelength range. Research projects of microwave oscillators with high-Q resonators, in which "whispering gallery" oscillations are excited by an electron flow, are presented. Multiresonator oscillators ideology is based on principles of microwave generation in klystrons with both subcritical and supercritical electron beams currents.

МІКРОХВИЛЬОВИЙ ГЕНЕРАТОР З РЕЗОНАТОРОМ "ШЕПОЧУЧОЇ ГАЛЕРЕЇ"

О. Я. Кириченко, Ю. Ф. Лонін, В. Г. Папкович, А. Г. Пономарьов,
Ю. В. Прокопенко, В. Т. Уваров, Ю. Ф. Філіппов

Досліджено можливість генерації мікрохвильового випромінювання в системі з азимутально-періодичним струмом релятивістського електронного пучка, який збуджує високодобротний квазіоптичний діелектричний резонатор. Чисельно визначено власні параметри циліндричного фторопластового резонатора. Детекторним приймачем 8 мм-діапазону зареєстровано наявність випромінювання системою, що досліджується. Наводяться проекти досліджень мікрохвильових генераторів з високодобротними резонаторами, в яких електромагнітні коливання "шепчучої галереї" збуджуються потоком електронів. Ідеологія багаторезонаторних генераторів базується на принципах мікрохвильової генерації в клістронах як з докритичними, так і надкритичними струмами електронних пучків.