

07;10;12

Автоколебательная система на основе диэлектрического резонатора с модами „шепчущей галереи“

© А.В. Дормидонтов, А.Я. Кириченко, Ю.Ф. Лонин,
А.Г. Пономарев, Ю.В. Прокопенко, Г.В. Сотников,
В.Т. Уваров, Ю.Ф. Филиппов

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,
Харьков

Национальный научный центр „Харьковский физико-технический
институт“ НАН Украины, Харьков

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

Поступило в Редакцию 25 июля 2011 г.

Предложен способ генерации микроволнового излучения в системе с азимутально-периодическим током электронного пучка, возбуждающим высокодобротный квазиоптический диэлектрический резонатор. Определены собственные параметры цилиндрического фотопластового резонатора. Приводятся исследования генерации микроволнового излучения в системе на основе резонатора с модами „шепчущей галереи“, возбуждаемого азимутально-периодическим током релятивистского электронного пучка. Детекторным приемником восьмимиллиметрового диапазона длин волн зарегистрировано электромагнитное излучение исследуемой системы.

В последнее время среди разработчиков электронно-вакуумной техники наметилась тенденция продвижения в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн. Использование традиционных подходов к проектированию и построению электронных устройств испытывает большие трудности, которые обусловлены малыми геометрическими размерами основных элементов, генерирующих и стабилизирующих электромагнитные колебания. Решение данной проблемы приводит к использованию сверхразмерных (по отношению к длине волны) электродинамических структур, работающих в многомодовом режиме. Генерирование электромагнитных колебаний со стабильной частотой тесно связано с возбуждением и селекцией моды высокого порядка в таких структурах.

Возможность возбуждения слабозатухающих колебаний в диэлектрических резонаторах с цилиндрическими и сферическими поверхностями на модах высокого порядка — модах „шепчущей галереи“ [1–5] предопределяет их применение в устройствах вакуумной электроники коротковолнового диапазона миллиметровых и субмиллиметровых длин волн. При этом преодолевается отмеченная выше трудность конструктивного характера. Однако уровень мощности излучения источников традиционного построения с переходом к субмиллиметровым длинам волн резко снижается [6]. Следовательно, возникает необходимость использования высокоэнергетических осцилляторов, возбуждаемых в электронных потоках. Отметим, что использование сверхразмерных электродинамических структур, электромагнитные колебания в которых возбуждаются сильноточными релятивистскими пучками (РЭП), позволяет преодолеть проблему, связанную с явлениями электрических пробоев.

В данной работе выясняется возможность создания источников электромагнитных колебаний в миллиметровом диапазоне длин волн, не имеющих ограничений для продвижения в терагерцовый диапазон частот. Идеология построения исследуемого источника базируется на использовании электродинамических свойств квазиоптического цилиндрического диэлектрического резонатора (ЦДР) [2,7], который используется в качестве основного элемента автоколебательной резонансной системы.

Нами был использован цилиндрический фторопластовый резонатор с радиусом $\rho_0 = 3.9$ см и продольным размером $L = 0.9$ см. В табл. 1 приведены собственные частоты $\omega_p'/2\pi$ и добротности Q^E резонатора с модами Е типа, имеющими модовые индексы: азимутальный $m = 36$, радиальный $s = 1$ и аксиальный $l = 0; 1; 2$ ($p \equiv msl$). Вычисления были проведены по соотношениям, приведенным в работах [2,7]. Выбор размеров ЦДР и его мод обусловлен рабочим частотным диапазоном

Таблица 1. Частоты и добротности ЦДР

	Мода		
	TM _{36 10}	HE _{36 11}	HE _{36 12}
Частота, GHz	34.9916	36.8385	42.0046
Добротность	4870	6035	6056

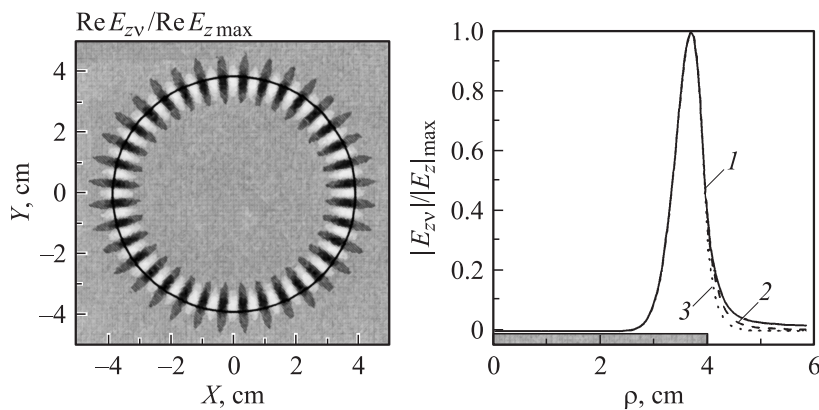


Рис. 1. Распределение $E_{z\nu}$ компонент полей $TM_{36 10}$ (1), $HE_{36 11}$ (2) и $HE_{36 12}$ (3) колебаний в ЦДР ($\nu = 1$ при $\rho \leq \rho_0$ или $\nu = 2$ при $\rho > \rho_0$).

автоколебательной системы (приведенной ниже), а тип мод — способом возбуждения резонатора.

На рис. 1 приведены структуры полей собственных колебаний E типа ЦДР. Видно, что поля слабозатухающих колебаний „шепчущей галереи“ сосредоточены внутри диэлектрика вблизи цилиндрической поверхности резонатора. Следовательно, 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 потока электронов, ориентированных параллельно боковой поверхности резонатора, позволяет возбудить в нем колебания E типа [5]. Для селекции мод с конкретным значением азимутального индекса m необходимо использовать азимутально-периодический электронный пучок. С учетом фазового синхронизма для возбуждения вышерассмотренных мод ЦДР необходим электронный пучок, состоящий из $m = 36$ потоков с угловым разносом между ними по азимутальной координате в $360^\circ/m = 10^\circ$.

На рис. 2 приведены структура автоколебательной системы на основе квазиоптического ЦДР и структурная схема экспериментальной установки. Электроны, эмитированные катодом (1) в результате дей-

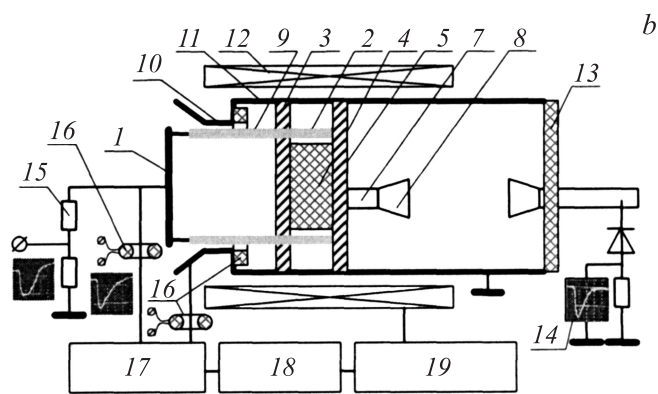
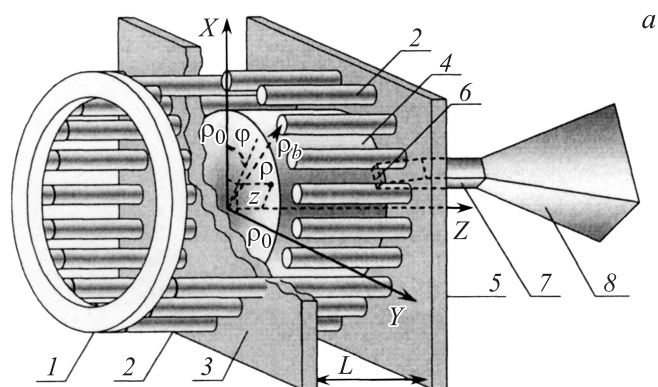


Рис. 2. Автоколебательная система на основе ЦДР с модами „шепчущей галереи“ (а) и экспериментальная установка (б): 1 — катод, 2 — азимутально-периодический электронный пучок, 3 — перфорированный анод-торцевая стенка ЦДР, 4 — ЦДР, 5 — коллектор-торцевая стенка ЦДР, 6 — щель, 7 — волновод, 8 — рупор, 9 — трубчатый РЭП, 10 — анод, 11 — лайнер, 12 — соленоид, 13 — диэлектрическое окно, 14 — детекторный приемник, 15 — делитель напряжения, 16 — датчик тока (пояс Роговского); 17 — генератор импульсного напряжения, 18 — система запуска и управления, 19 — система формирования внешнего магнитного поля.

ствия 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 сохраненных структурах полей колебаний в ЦДР. Вторая торцевая стенка (5) ЦДР является коллектором электронного пучка и имеет потенциал анода. Возбуждение ЦДР осуществляется в результате резонансного взаимодействия его собственных HE_{msl} мод и переходного или/и черенковского излучения электронов в пространственно-периодическом по азимутальному углу пучке, распространяющемся вблизи цилиндрической поверхности [5], на собственных частотах резонатора (табл. 1). Энергия HE_{msl} моды ЦДР преобразуется в излучение при возбуждении ее полем щелевого излучателя (или системы щелевых излучателей как элементов фазированной решетки), расположенного (расположенных) в максимуме (максимумах) одной вариации („однополярных“ вариаций) поля как по радиальной, так и по азимутальной координатам. При этом прямоугольный щелевой излучатель в торцевой стенке ЦДР ориентируется так, чтобы его длинная сторона была перпендикулярна радиусу резонатора. Излучатель через трансформаторное сочленение согласуется с прямоугольным волноводом, соединенным с пирамидальным рупором.

Экспериментальные исследования автоколебательной системы были проведены на сильноточном электронном ускорителе „Темп-А“ (рис. 2), технические параметры которого приведены в табл. 2. В ускорителе формировался РЭП с энергией 300 keV при длительности импульса 3 μ s по уровню половинной мощности. Формирование азимутально-периодического электронного пучка осуществлялось при прохождении трубчатого РЭП через перфорированную торцевую стенку ЦДР. В результате формировались 36 электронных потоков, синхронизированных по фазе. Радиус ρ_b азимутально-периодического РЭП равен 4.1 см, а диаметр каждого электронного потока — 0.4 см. Пространственно-периодический по азимутальному углу РЭП, распространяясь вблизи цилиндрической поверхности фторопластового резонатора, возбуждал

Таблица 2. Характеристики экспериментальной установки

Энергия ГИНа Маркса (при зарядке 8 ступеней напряжением ± 40 kV)	10 kJ
Диаметр кромочного цилиндрического катода (из нержавеющей стали)	10 cm
Диаметр входного цилиндрического анода	15 cm
Диаметр лайнера транспортировки электронов	15 cm
Напряжение магнитоизолированного диода магнетронного типа	300 kV
Максимальная индукция магнитного поля соленоида	0.8 T
Величина индукции магнитного поля в области катода от максимального значения индукции поля внутри соленоида	$\sim 75\%$
Период внешнего магнитного поля	12.5 ms
Предельный ток электронного пучка в вакууме	~ 4 kA
Эмиссионный ток трубчатого электронного пучка	3–4 kA
Длительность импульса РЭП (по уровню половинной мощности)	~ 3 μ s
Средний диаметр трубчатого РЭП	8.2 cm
Толщина стенки трубчатого пучка 5 mm	0.5 cm

в нем собственную HE_{361l} моду с частотой в диапазоне 35–42 GHz при $0 \leq l \leq 2$.

Электромагнитное излучение исследуемой системы зарегистрировано детекторным приемником 8-mm диапазона длин волн. На рис. 3 приведены осциллограммы импульсов тока РЭП (*a*), напряжения магнитоизолированного сильноточного диода (*b*) и нормированной мощности (P/P_{\max}) электромагнитного излучения (*c*). Их длительности равны ~ 3 μ s, а амплитуды тока и напряжения соответственно равны 2.2 kA и 300 kV.

Таким образом, обоснована и разработана автоколебательная система на основе ЦДР с колебаниями „шепчущей галереи“. Сформирован многоструйный азимутально-периодический электронный пучок, позволяющий возбудить моды „шепчущей галереи“, отличающиеся аксиальными и радиальными индексами. Возбуждение высокооборотного ЦДР с проводящими торцевыми стенками осуществлено релятивистским электронным пучком. Осуществлен вывод электромагнитной энергии из резонатора при возбуждении щелевого излучателя в его торцевой стенке, расположенного в максимуме одной локализации поля HE_{361l}

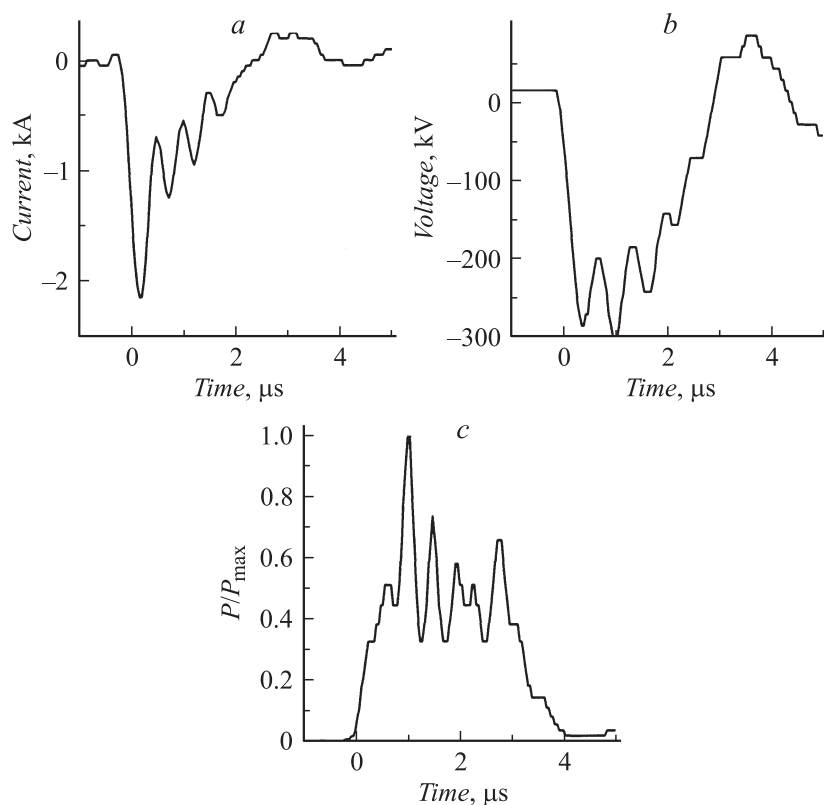


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока РЕП (*a*), напряжения сильноточного диода (*b*) и нормированной мощности микроволнового излучения (*c*).

моды. Экспериментально зарегистрировано микроволновое излучение исследуемой системы в диапазоне 7–9 мм.

Исследованная автоколебательная система может быть модифицирована, например, в микроволновые генераторы черенковского или клистронного (пролетного, многорезонаторного, отражательного) типов с высокодобрными квазиоптическими резонаторами. При этом электромагнитные колебания „шепчущей галереи“ могут возбуждаться как докритическими, так и сверхкритическими токами азимутально-

периодических электронных пучков. В случае использования сверхкритического РЭП в генераторе будет формироваться виртуальный катод (например, между его резонаторами), что автоматически обеспечит обратную связь в автоколебательной системе. В таких генераторах возможна реализация управляемой обратной связи, осуществляемой вводом части энергии возбуждаемой моды резонатора как в область ускорения электронов, так и в смежные резонаторы. Использование ЦДР с колебаниями „шепчущей галереи“ позволяет осуществлять синфазное возбуждение системы щелевых излучателей. В этом случае вывод электромагнитной энергии излучения реализуется фазированной антенной решеткой. Отметим, что при сохранении структуры электромагнитного поля между длиной волны собственных колебаний ЦДР и его диаметральной размером имеет место линейная зависимость, а при нарушении структуры поля между длиной волны собственных колебаний резонатора и азимутальным модовым индексом — обратно пропорциональная зависимость [2]. Следовательно, уменьшение радиуса резонатора и/или использование мод „шепчущей галереи“ более высокого порядка по азимутальному индексу позволят реализовать рассмотренную или модифицированную автоколебательную систему с приемлемыми геометрическими параметрами в терагерцовом диапазоне частот.

Таким образом, заложены принципы построения микроволновых источников с высокочастотными квазиоптическими ЦДР, в которых электромагнитные колебания „шепчущей галереи“ возбуждаются азимутально-периодическими потоками электронов.

Список литературы

- [1] Ильченко М.Е., Взятыхшев В.Ф., Гасанов Л.Г. и др. Диэлектрические резонаторы. М.: Радио и связь, 1989. 328 с.
- [2] Кириченко А.Я., Прокопенко Ю.В., Филиппов Ю.Ф., Черпак Н.Т. Квазиоптические твердотельные резонаторы. Киев: Наукова думка, 2008. 286 с.
- [3] Прокопенко Ю.В., Филиппов Ю.Ф., Яковенко В.М. // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 5. С. 107–112.
- [4] Barannik A.A., Bunyaev S.A., Cherpak N.T., Prokopenko Yu.V., Vitusevich S.A., Kharchenko A.A. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2010. V. 58. N 10. P. 2682–2691.

- [5] Galaydych K.V., Lonin Yu.F., Ponomarev A.G., Porokopenko Yu.V., Sotnikov G.V. // Problems of Atomic Science and Technology. Series: „Plasma Physics“. Issue 16. 2010. N 6. P. 123–125.
- [6] Parker R.K., Abrams R.H., Danly B.G., Levush B. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2002. V. 50. N 3. P. 835–845.
- [7] Прокопенко Ю.Ф., Филиппов Ю.Ф. // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 6. С. 79–84.