

# ВОЗБУЖДЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН СИЛЬНОТОЧНЫМ РЭП В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

К.В. Галайдыч<sup>1</sup>, Ю.Ф. Лонин<sup>1</sup>, А.Г. Пономарев<sup>1</sup>, Ю.В. Прокопенко<sup>2</sup>, Г.В. Сотников<sup>1</sup>,  
В.Т. Уваров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина;

<sup>2</sup>Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова, Харьков, Украина  
E-mail: lonin@kipt.kharkov.ua; prokopen@ire.kharkov.ua

Экспериментально показана возможность генерации микроволнового излучения сильноточным азимутально-периодическим РЭП в высокочастотном квазиоптическом диэлектрическом резонаторе. Диэлектрический резонатор представляет собой цилиндрический фторопластовый диск ( $\varnothing = 80$  мм,  $l = 3$  и  $9$  мм), с торцов ограниченный проводящими стенками. Численно определены частоты азимутально-несимметричных волн ( $m=36$ ), которые могут возбуждаться азимутально-периодическим пучком. Расчеты собственных частот выполнены для двух длин резонатора; обсуждаются возможные механизмы генерации микроволнового излучения в том и другом случаях. Осуществлен вывод излучения из диэлектрического резонатора, и детекторным приёмником 8-мм диапазона зарегистрировано это излучение.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

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 рабочей 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.

## 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В настоящей 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  $\rho_0 = 4,0$  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  $l = 0; 1; 2$  ( $p \equiv ms$ l). Вычисления были проведены по соотношениям, приведенным в работах [2, 7]. Выбор размеров ЦДР и его мод обусловлен рабочим частотным диапазоном автоколебательной системы (приведенной ниже), а тип мод – способом возбуждения резонатора.

Таблица 1

Частоты и добротности ЦДР

Мода	TM <sub>36 1 0</sub>	HE <sub>36 1 1</sub>	HE <sub>36 1 2</sub>
Частота, ГГц	34,9916	36,8385	42,0046
Добротность	4870	6035	6056

На Рис.1 приведены структуры полей собственных колебаний Е-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 энергии. Использование в качестве такового потока электронов, ориентированных параллельно боковой поверхности резонатора, позволяет возбудить в нем колебания Е-типа [5]. Для селекции мод с конкретным значением азимутального индекса  $m$  необходимо использовать азимутально-периодический электронный пучок. С учётом фазового синхронизма

для возбуждения вышерассмотренных мод ЦДР необходим электронный пучок, состоящий из  $m = 36$  потоков с угловым разнесом между ними по азимутальной координате в  $360/m = 10^\circ$ . Для обеспечения хорошей связи пучка с модами «шепчущей галереи» электронный пучок следует располагать вблизи поверхности диэлектрика. В экспериментальных условиях и в численных расчетах средний радиус пучка  $R_b = 4,3$  см. Каждый луч многолучевого пучка имеет круговое сечение с диаметром 0,25 см.

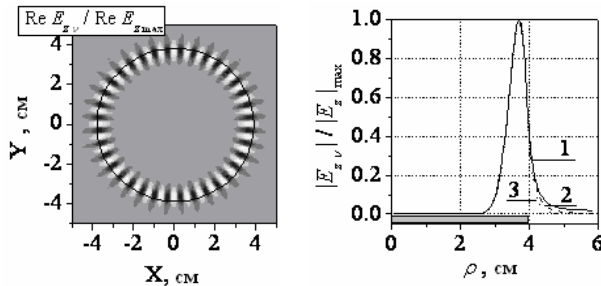


Рис.1. Распределение  $E_{z\nu}$ -компонент полей  $TM_{3610}$  (1),  $HE_{3611}$  (2) и  $HE_{3612}$  (3) колебаний в ЦДР ( $\nu = 1$  при  $\rho \leq \rho_0$  или  $\nu = 2$  при  $\rho > \rho_0$ )

Для расчета возбуждения ЦДР азимутально-периодическим током (многолучевым пучком) нами используется теория, построенная в работе [5]. Эта теория, построенная на основе общей теории возбуждения резонаторов [8], позволяет дать количественные оценки на спектр возбуждаемых колебаний, их амплитуду и энергию поля в резонаторе.

Представленные на Рис.1 распределения продольного электрического поля, а также собственные частоты резонатора, приведенные в Табл.1, получены для открытого диэлектрического резонатора. Теория возбуждения ЦДР [8] использует собственные частоты и собственные волны закрытого диэлектрического резонатора. Для этого мы рассчитали дисперсионные зависимости закрытого ЦДР, имеющего радиус металлического волновода 7,5 см (соответствующий экспериментальным условиям). Для таких размеров металлического кожуха собственные частоты колебаний «шепчущей галереи», т.е. имеющих структуру продольного поля, похожую на показанную на Рис.1, близки к приведенным в Табл.1. Кроме этих частот закрытый ЦДР содержит собственные частоты, связанные с поперечными размерами вакуумного волновода. Но поперечная структура продольного электрического поля существенно отличается от структуры мод «шепчущей галереи», это поле прижато к металлическим стенкам волновода. Поэтому такие колебания будут слабо возбуждаться электронным пучком, распространяющимся вблизи поверхности диэлектрического стержня.

Детальная количественная теория возбуждения закрытого ЦДР азимутально-периодическим током будет дана в отдельной публикации. Но уже сейчас, на основе полученных результатов, можно оценить возможность генерации. Будем исходить из того, что основным механизмом возникновения генерации в резонаторе является монотронный механизм, когда частицы группируются в такой фазе, что в среднем отдают энергию, пролетая через резонатор. Для возникновения такой генерации безразмерная

длина резонатора  $\theta_p = \omega'_p L / v_0$  ( $v_0$  - скорость электронов пучка) должна удовлетворять определенным условиям [9]. Первая зона генерации удовлетворяет условию:

$$2\pi < \theta_p < 9 \quad (1)$$

и максимум генерации происходит при  $\theta_p \approx 7,72$ .

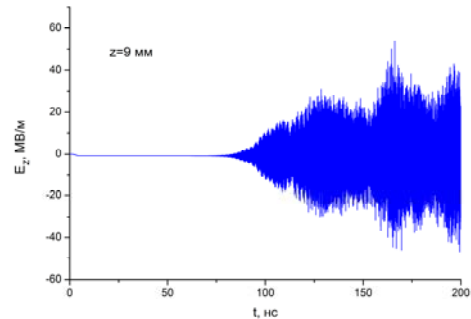


Рис.2. Аксиальное электрическое поле  $E_z(t)$

Для приведенных в Табл.1 частот и энергии электронов пучка 300 кэВ, величина  $\theta_p$  следующая:

$$\theta_{36,1,0} = 8,5; \theta_{36,1,1} = 8,95; \theta_{36,1,2} = 10,2. \quad (2)$$

Из сравнения величин (2) с условием (1) следует, что основная генерация должна происходить на частоте отсечки первой радиальной моды «шепчущей галереи», мода с длиной волны, равной длине резонатора (с двумя вариациями по продольной координате), вообще не будет возбуждаться. Результаты РИС-моделирования динамики полей в ДР приведены на Рис.2-4:

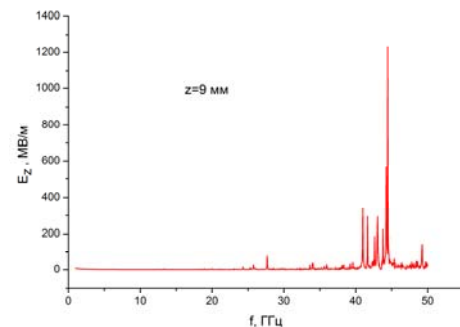


Рис.3. Спектр электрического поля  $E_z(f)$

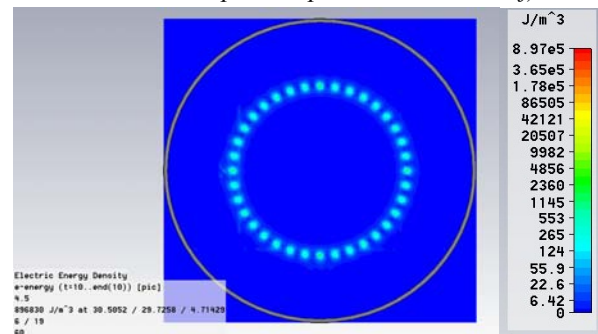


Рис.4. Плотность энергии в поперечном сечении резонатора  $z = L/2$

На Рис.5 приведена структура автоколебательной системы на основе квазиоптического ЦДР и структурная схема экспериментальной установки.

Электроны, эмиттированные катодом (1) в результате действия ускоряющего поля диода, образованного катодом и анодом (3), проходят через отверстия в торцевой стенке ЦДР и формируют азиму-

тально-периодический пучок с радиусом  $\rho_b > \rho_0$ . Радиус  $\rho_b$  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  $\omega_p$  при сохранённых структурах полей колебаний в ЦДР. Вторая торцевая стенка (5) ЦДР является коллектором электронного пучка и имеет потенциал анода. Энергия  $HE_{m,sl}$  моды ЦДР преобразуется в излу-

чение при возбуждении её 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, соединённым с пирамидальным рупором.

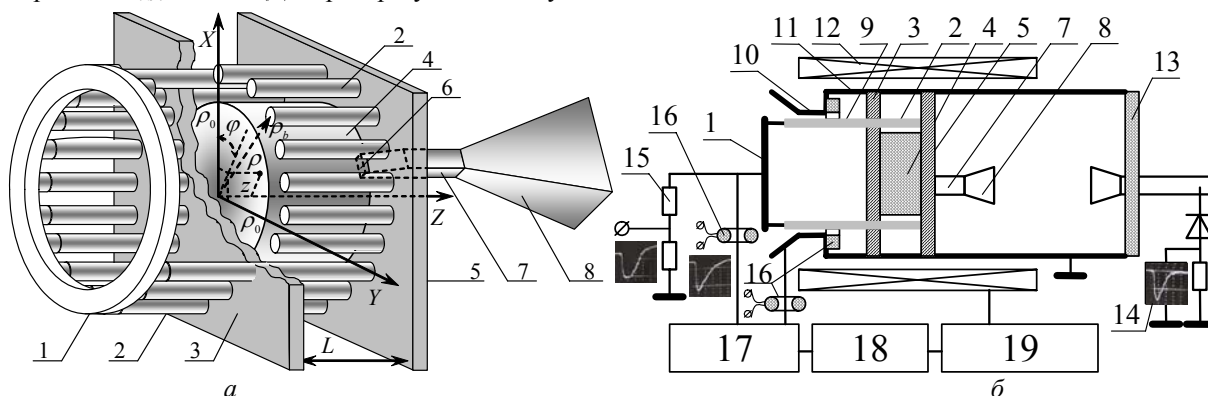


Рис.5. Автоколебательная система на основе ЦДР с модами «шепчущей галереи» (а) и экспериментальная установка (б):

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 приёмник; 15 – делитель напряжения; 16 – датчик тока (пояс Роговского); 17 – генератор импульсного напряжения; 18 – система запуска и управления; 19 – система формирования внешнего магнитного поля

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования автоколебательной системы были проведены на сильноточном электронном ускорителе «Темп-А» (см. Рис.2), технические параметры которого приведены в Табл.2. В ускорителе формировался РЭП с энергией 300 кэВ при длительности импульса 3 мкс 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  $\rho_b$  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 в нём собственную  $HE_{36,1l}$ -моду с частотой в диапазоне (35...42) ГГц при  $0 \leq l \leq 2$ .

Электромагнитное излучение исследуемой системы зарегистрировано детекторным приёмником 8-мм диапазона длин волн. На Рис.6 приведены осциллограммы генерации миллиметровых колебаний, где 1 – импульс тока РЭП, 2 – мощность электромагнитного излучения и 3 – напряжение магнитоизолированного сильноточного диода.

Таблица 2

Характеристики экспериментальной установки

Энергия ГИИ'а Маркса (при зарядке 8 ступеней напряжением $\pm 40$ кВ), кДж	10
Диаметр кромочного цилиндрического катода (из нержавеющей стали), см	10
Диаметр входного цилиндрического анода, см	15
Диаметр лайнера транспортировки электронов, см	15
Напряжение магнитоизолированного диода магнетронного типа, кВ	300
Максимальная индукция магнитного поля соленоида, Тл	0,8
Период внешнего магнитного поля, мс	12,5
Предельный ток электронного пучка в вакууме, кА	~ 4
Эмиссионный ток трубчатого электронного пучка, кА	(3...4)
Длительность импульса РЭП (по уровню половинной мощности), мкс	~ 3
Средний диаметр трубчатого РЭП, см	8,6
Толщина стенки трубчатого пучка 5 мм, см	0,5

На Рис.7. приведена зависимость параметров миллиметрового излучения от времени: тока пучка (см. Рис.7,а), напряжения на диоде РЭП (см. Рис.7,б) и приведенной мощности миллиметрового СВЧ-излучения (см. Рис.7,в).

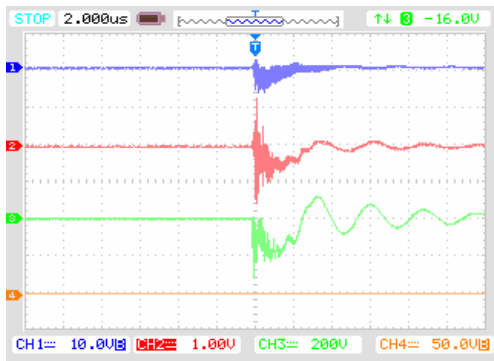


Рис.6. Осциллограммы генерации миллиметровых колебаний

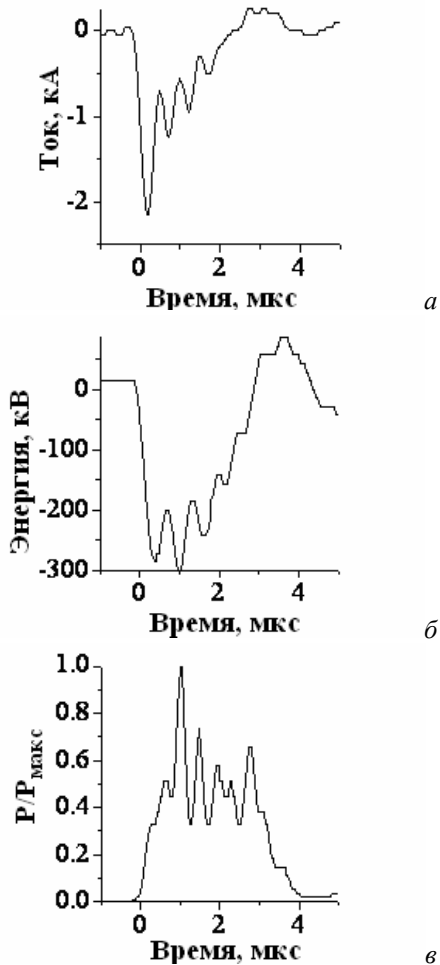


Рис.7. Значения параметров миллиметрового излучения: а) тока пучка; б) энергии пучка; в) приведенной мощности СВЧ-излучения

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 высокодобротного 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  $HE_{36,1}$ -моды. Экспериментально зарегистрировано микроволновое излучение исследуемой системы в 8-мм диапазоне длин волн.

Исследованная автоколебательная система может быть модифицирована, например, в микроволновые генераторы черенковского или клистронного (пролётного, многорезонаторного, отражательного) типов с высокодобротными 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 решёткой. Отметим, что при сохранении структуры электромагнитного поля между длиной волны собственных колебаний ЦДР и его диаметральной размер 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 высокодобротными квазиоптическими ЦДР, в которых электромагнитные колебания «шепчущей галереи» возбуждаются азимутально-периодическими потоками электронов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. М.Е. Ильченко, В.Ф. Взятыхшев, Л.Г. Гасанов и др. *Диэлектрические резонаторы*. М.: «Радио и связь», 1989, с.328.
2. А.Я. Кириченко, Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппов, Н.Т. Черпак. *Квазиоптические твердотельные резонаторы*. Киев: «Наукова думка», 2008, ISBN 978-966-00-0945-3, с.286.
3. Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппов, В.М. Яковенко. Возбуждение колебаний в полушаровом диэлектрическом резонаторе радиальным магнитным диполем // *ЖТФ*. 2005, т.75, №5, с.107-112.
4. A.A. Barannik, S.A. Bunyaev, N.T. Cherpak, Yu.V. Prokopenko, S.A. Vitusevich, A.A. Kharchenko. Whispering gallery mode dielectric resonators in a form of hemisphere with impedance plane // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2010, v.58, №10, p.2682-2691.

5. K.V. Galaydych, Yu.F. Lonin, A.G. Ponomarev, Yu.V. Prokopenko, G.V. Sotnikov. Mathematical model of an excitation by electron beam of "whispering gallery" modes in cylindrical dielectric resonator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics"*. 2010, №6, p.123-125.
6. 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.
7. Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппов. Анизотропный дисковый диэлектрический резонатор с проводящими торцевыми стенками // *ЖТФ*. 2002, т.72, №6, с.79-84.
8. Л.А. Вайнштейн. *Электромагнитные волны*. 2-е изд. М.: «Радио и связь», 1988.
9. B.M. Marder, M.C. Clark, L.D. Bacon, J.M. Hoffman, R.W. Lemke, P.D. Coleman. The Split-Cavity Oscillator: A High-Power E-Beam Modulator and Microwave Source // *IEEE Trans. on Pl. Sci.* 1992, v.20, №3, p.312-331.

*Статья поступила в редакцию 26.10.2011 г.*

#### **EXCITATION OF mm WAVES BY HIGH-CURRENT REB IN DIELECTRIC RESONATOR**

*K.V. Galaydych, Yu. F. Lonin, A.G. Ponomarev, Yu.V. Prokopenko, G.V. Sotnikov, V.T. Uvarov*

A possibility of a generation of the microwave radiation high-current azimuthally-modulated REB in a high-Q quasi-optical dielectric resonator is experimentally shown. Dielectric resonator is a cylindrical Teflon disk ( $\varnothing = 80$  mm,  $l = 3$  and  $9$  mm), with ends bounded by conducting walls. The frequencies of the azimuthally-nonsymmetrical waves ( $m = 36$ ), which can be excited by azimuthally modulated beam, are calculated. The calculations are performed for two cavity lengths, and we discuss possible mechanisms for the generation of microwave radiation in both cases. Implemented the radiation output of a dielectric resonator and crystal set 8-mm band recorded this radiation.

#### **ЗБУДЖЕННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ СИЛЬНОСТРУМОВИМ РЕП В ДІЕЛЕКТРИЧНОМУ РЕЗОНАТОРІ**

*К.В. Галайдич, Ю.Ф. Лонін, А.Г. Пономарьов, Ю.В. Прокопенко, Г.В. Сотніков, В.Т. Уваров*

Експериментально показана можливість генерації мікрохвильового випромінювання сильнострумовим азимутально-періодичним РЕП у високодобротному квазіоптичному діелектричному резонаторі. Діелектричний резонатор є циліндровий фторопластовий диск ( $\varnothing = 80$  мм,  $l = 3$  і  $9$  мм), з торців обмежений провідними стінками. Чисельно визначено частоти азимутально-несиметричних хвиль ( $m = 36$ ), які можуть збуджуватися азимутально-періодичним пучком. Розрахунки власних частот виконані для двох довжин резонатора; обговорюються можливі механізми генерації мікрохвильового випромінювання в тому і другому випадках. Здійснено виведення випромінювання діелектричного резонатора, і детекторним приймачем 8-мм діапазону зареєстровано це випромінювання.