

УДК 537.862

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ И
ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОАКСИАЛЬНЫХ ТРИОДОВ
С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ**

А.Г. Жерлицын, Т.В. Коваль, Г.Г. Канаев,
Т.М. Нгуен

Томский политехнический университет
E-mail: tvkoyal@mail.ru

Проведено численное исследование собственных полей и резонансных частот электродинамических систем виркатодов с планарно-коаксиальной и коаксиальной конфигурациями. Проведен анализ модового состава электромагнитного излучения в этих генераторах и анализ расчетных и экспериментальных диаграмм направленности излучения. Показано, что с помощью диаграммы направленности излучения можно определить модовый состав излучения и степень неоднородности пучка.

Ключевые слова:

Собственная частота, структура поля, коаксиальный виркатор, диаграмма направленности.

Введение

Приборы с виртуальным катодом (ВК), называемые виркаторами, являются генераторами микроволнового излучения в сантиметровом диапазоне частот с гигаваттным уровнем мощности [1, 2]. Триод с ВК (или отражательный триод) – это один из типов виркаторов, которые способны работать без внешнего магнитного поля, их принцип работы основан на формировании в общей вакуумной электродинамической системе электронного пучка, ВК и возбуждении в этой системе электромагнитных волн. СВЧ генерацию обуславливают колебания ВК и осцилляторное движение электронов пучка в потенциальной яме, формируемой между реальным и виртуальным катодами. Поскольку геометрические размеры электродинамической системы пре-

вышают длину волны возбуждаемых колебаний, то эта система является сверхразмерной, и в ней возможна многомодовая генерация, что с практической точки зрения не всегда является приемлемым.

Для получения одномодовой генерации были созданы триоды с ВК коаксиального типа с радиально-расходящимся электронным пучком: планарно-коаксиальный триод с ВК для генерации СВЧ излучения на волне типа H_{11} [1] и коаксиальный триод с ВК с возбуждаемой TEM волной и ее трансформацией на выходе из системы в волну E_{01} типа [2].

Целью данной работы является исследование электродинамических и излучательных характеристик планарно-коаксиального и коаксиального триодов с ВК.

Жерлицын Алексей Григорьевич, канд. техн. наук, зав. лабораторией № 42 Физико-технического института ТПУ.
E-mail: zherl@tpu.ru

Область научных интересов: генерация СВЧ излучения в системах с виртуальным катодом.

Коваль Тамара Васильевна, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры прикладной математики Института кибернетики ТПУ.
E-mail: tvkoyal@mail.ru

Область научных интересов: генерация мощных электромагнитных импульсов, коллективные взаимодействия в пучках заряженных частиц.

Канаев Геннадий Григорьевич, канд. техн. наук. Физико-технического института ТПУ.
E-mail: zherl@tpu.ru

Область научных интересов: генерация СВЧ излучения в системах с виртуальным катодом.

Нгуен Туан Минь, аспирант кафедры прикладной математики Института кибернетики ТПУ.
E-mail:

nguyenminhtuan@mail.ru
Область научных интересов: взаимодействие пучков заряженных частиц с электромагнитными полями.

Электродинамические характеристики отражательных триодов

Схемы экспериментальных отражательных триодов с планарной и коаксиальной конфигурациями внутренних проводников (анода и катода) представлены на рис. 1.

Электродинамические системы отражательных триодов (рис. 1) являются неодносвязными в области взаимодействия пучка с полем системы. В этой области могут возбуждаться волны типа ТМ, ТЕ и ТЕМ. Волна ТЕМ является низшим типом колебаний, так как ее критическая частота равна нулю. Первым высшим типом волны в коаксиальной линии при любом диаметре и конфигурации внутреннего проводника является волна H_{11} .

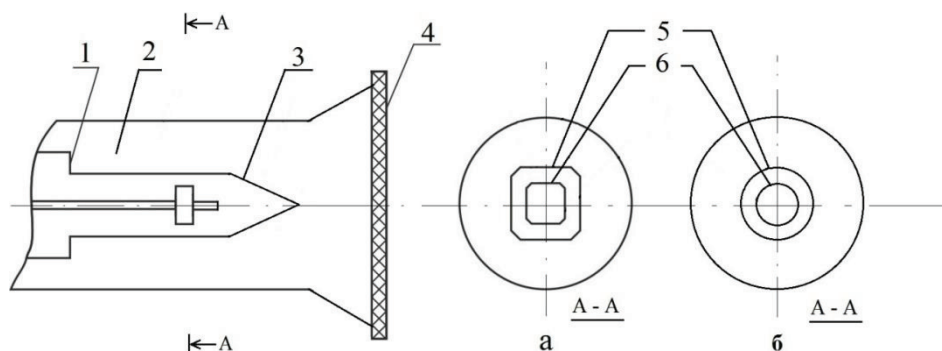


Рис. 1. Схемы триодов с ВК: а) планарно-коаксиальный; б) коаксиальный; 1) отражатель; 2) вакуумная камера; 3) преобразователь мод; 4) выходное окно; 5) анод-сетка; 6) катод

Теоретически исследуемые электродинамические системы триодов представлены на рис. 2. Как видно из рис. 2, эти системы не являются однородными вдоль продольной координаты z и состоят из отрезков волноводных линий: коаксиальной, планарно-коаксиальной и цилиндрической, в каждой из которых свои критическая частота и распределение поля. Геометрические параметры: радиус и длина волновода $R = 175$ мм и $H = 520$ мм; длина анода $l = 320$ мм; длина преобразователя волн 176 мм; сторона планарного анода $a = 142$ мм; радиус коаксиального анода $R_A = 67$ мм; радиус выходного окна $R_{at} = 220$ мм и длина рупорной антенны $H_{at} = 200$ мм. Исследование поперечной структуры полей и резонансных частот проведено с помощью решения 2-х мерного уравнения Гельмгольца. Критические частоты нескольких первых высших мод приведены в таблице. Для планарно-коаксиальной системы значения критической частоты приведены для разного радиуса скругления углов анода. Чем больше радиус скругления, тем ближе планарно-коаксиальная система становится к коаксиальной.

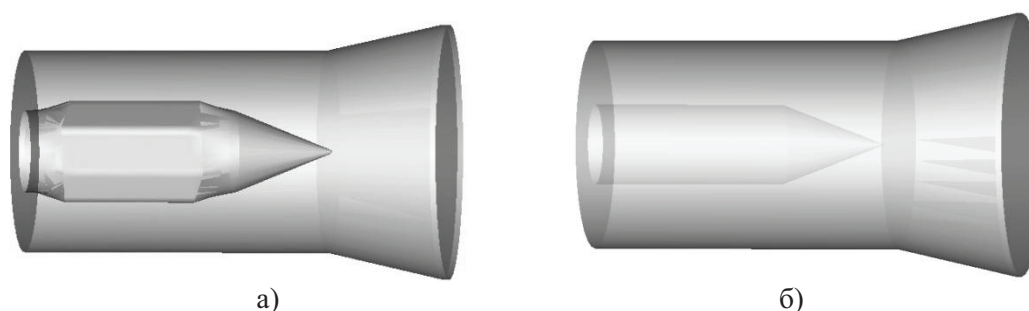


Рис. 2. Электродинамические системы отражательных триодов: а) планарно-коаксиальная; б) коаксиальная

Как видно из сравнения критических частот, в планарно-коаксиальной, коаксиальной линии и цилиндрической области при $R_{at} = 220$ мм волна H_{11} имеет близкие значения критической частоты. Поэтому при возбуждении волны H_{11} согласование неодносвязной и односвязной областей этих триодов осуществляется с помощью рупора. Следует отметить, что при наличии

внутреннего проводника критическая частота E волн превышает в несколько раз значение критической частоты как H волн, так и E волн в односвязной области. Это накладывает особенности при возбуждении E волн в планарно-коаксиальном и коаксиальных триодах. Так при возбуждении волны E_{01} ($f_{кр.} = 1,37$ ГГц) в неодносвязной области коаксиального триода она будет трансформироваться в волну E_{02} ($f_{кр.} = 1,5$ ГГц) на границе областей. Поэтому генерацию аксиально-симметричной моды E_{01} в триоде можно осуществить при возбуждении ТЕМ волны в неодносвязной области и ее последующей трансформацией в E_{01} в односвязной области, так как волны ТЕМ и E_{01} имеют близкие конфигурации полей.

Таблица. Критические частоты ($f_{кр.}$, ГГц) в линиях

Волна	Коаксиальная RA = 67 мм, R = 175 мм	Планарно-коаксиальная $a = 142$ мм, R = 175 мм	Цилиндр R = 175 мм	Цилиндр R = 220 мм
H_{11}	0,41	0,38...0,4	0,50	0,40
H_{21}	0,78	0,73...0,71; 0,78	0,82	0,66
H_{31}	1,13	1,1...1,01	1,14	0,91
E_{01}	1,37	1,53...1,57	0,66	0,52
H_{01}	1,43	1,56...1,59	1,05	0,83
E_{11}	1,43	1,58...1,61	1,05	0,83
H_{41}	1,44	1,42...1,43	1,45	1,15
H_{12}	1,51	1,61...1,62	1,45	1,16
....			
E_{02}	2,77	3,18...3,08	1,50	1,20

Распределение электрического поля волн ТЕМ и H_{11} в коаксиальных системах представлено на рис. 3. Структура поля в планарно-коаксиальной и коаксиальной системах очень близка, т. к. деформация силовых линий происходит только вблизи внутреннего проводника.

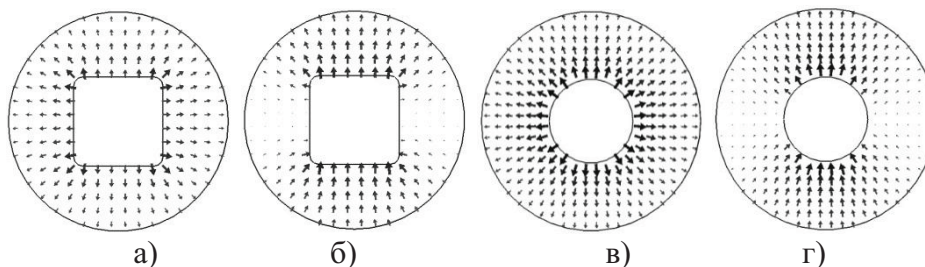


Рис. 3. Поперечная структура электрического поля волн: а) и в) ТЕМ; б) и г) H_{11}

Из распределения электрического поля (рис. 3) видно, что наиболее эффективное взаимодействие с полем может осуществляться несимметричным пучком при взаимодействии с волной H_{11} в планарно-коаксиальной триоде (рис. 3, б) и симметричным пучком с полем ТЕМ волны (рис. 3, в) в коаксиальной системе. Это подтверждается экспериментальными исследованиями генерации СВЧ колебаний в рассматриваемых отражательных триодах.

При отражении волн от левого торца триода (отражателя) и от выходного окна электродинамическую структуру триода можно рассматривать как резонатор с конечной добротностью $\sim 50 \dots 60$. Исследование трехмерной структуры собственных полей и собственных частот проведено с помощью численного решения трехмерного уравнения Гельмгольца. Рассмотрим диапазон частот $2,5 \dots 3,2$ ГГц, в котором проводились эксперименты. Расчеты показали, что в планарно-коаксиальном отражательном триоде собственные частоты волны H_{11} равны $2,57$; $2,77$ и $2,99$ ГГц. В коаксиальном триоде собственные частоты при возбуждении ТЕМ волны можно оценить из соотношения $f = k_z c / 2\pi = pc / 2L$, учитывая, что $k_1 \ll k_z = \pi p / L$ для E_{01} , где p – целое число. В рассматриваемом диапазоне собственные частоты: $2,5$; $2,7$; $2,92$ и $3,12$ ГГц.

Передача энергии в отражательных триодах

Электродинамическую систему СВЧ устройства – отражательного триода можно описать с помощью волновой матрицы рассеяния, которая связывает падающие и отраженные волны в подводящей и отводящей линии. В рассматриваемой системе (рис. 2) волна поступает на вход системы и выходит через окно антенны. Обозначим коэффициент передачи электромагнитной энергии S , который равен отношению потока энергии, прошедшей через правый торец, к энергии на входе. Исследование передачи энергии в электродинамических системах отражательных триодов проведено с помощью численного решения трехмерной электродинамической задачи с применением CST Microwave Studio.

Численные результаты показывают, что коэффициент передачи энергии зависит от геометрии системы и от частоты передаваемых волн. При передаче энергии по электродинамической системе в областях, где меняется однородность структуры системы, происходит отражение и преобразование волн в другие типы волн, т. е. при переходе от коаксиальной конфигурации к цилиндрической или рупорной антенне. В расчетах амплитуда падающей волны на входе в систему бралась равной единице. На рис. 4 показаны зависимости от частоты коэффициентов передачи энергии волны H_{11} в планарно-коаксиальном и волны ТЕМ – в коаксиальном триодах. Наибольшие значения коэффициента передачи соответствует собственным частотам резонансных систем.

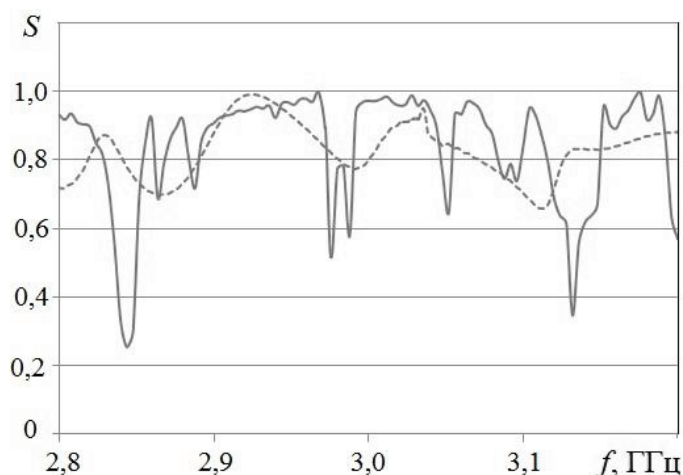


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи от частоты: волна H_{11} в планарно-коаксиальной системе (---); волна ТЕМ в коаксиальной системе (—)

Исследование структурного состава поля на выходе из окна антенны было проведено при передаче энергии волны H_{11} на частоте 3,05 ГГц и волны ТЕМ на частоте 3,1 ГГц. Как следует из рис. 4 и исследования структурного состава поля на выходе системы передача энергии волны H_{11} и волны ТЕМ (при трансформации ее в E_{01}) осуществляется в этих системах при высоком коэффициенте прохождения.

Расчетные диаграммы направленности

Величина плотности потока мощности в дальней зоне излучения передающей антенны определяется по формуле

$$\Pi_r(\theta, \varphi) = \Pi_{r \max} \cdot F(\theta, \varphi),$$

где $F(\theta, \varphi)$ – значение нормированной по мощности диаграммы направленности (ДН) передающей антенны в направлении на облучаемую точку (θ, φ) ; $\Pi_{r \max}$ – плотность потока мощности в главном луче ДН антенны на расстоянии L . ДН характеризуется шириной её главного луча на

уровне 0,5 от её максимального значения по мощности $P_{\text{рес}}$ и коэффициентом направленного действия (КНД) D

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{P_r(\theta, \varphi)}{P_{r \max}} \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (1)$$

У круглого волноводного раскрытия ДН имеет почти игольчатую форму, а ее ширина составляет $(2\theta_{\beta}^{\circ})_{0,5p} = (2\theta_{\varepsilon}^{\circ})_{0,5p} = (75...80)^{\circ}$. Поляризация поля является линейной и совпадает с направлением вектора электрического поля в раскрытии. Для получения более острых диаграмм направленности размеры поперечного сечения волновода плавно увеличивают, превращая волновод в рупор. При этом структура поля в волноводе, в основном, сохраняется. В месте перехода волновода в рупор возникают высшие типы волн. Плавное увеличение поперечного сечения волновода обеспечивает хорошее согласование со свободным пространством. Конический рупор обеспечивает получение игольчатой диаграммы направленности с шириной главного лепестка порядка $9...12^{\circ}$ [3]. Если угол раскрытия рупора не очень велик, то волны всех типов, кроме основного, быстро затухают в окрестностях горловины рупора. Пренебрегая волнами высших типов, можно считать структуру поля в рупоре подобной структуре поля основной волны в направляющей системе.

Азимутальная неоднородность электронного пучка в результате исходной неоднородности эмиссионной поверхности цилиндрического катода, а также некоторая разъюстировка системы могут обусловить одновременное возбуждение волн ТЕМ и H_{11} . Поэтому представляет интерес исследование диаграмм направленности при прохождении через электродинамическую систему двух волн ТЕМ + H_{11} при разных амплитудах $E_{\text{ТЕМ}}$ и $E_{H_{11}}$ на входе в систему. На рис. 5 показаны расчетные диаграммы направленности по мощности для коаксиальной системы (рис. 2, б) при $E_{\text{ТЕМ}} + E_{H_{11}} = 0,5 + 0,5, 0,8 + 0,2$ и $0,95 + 0,05$.

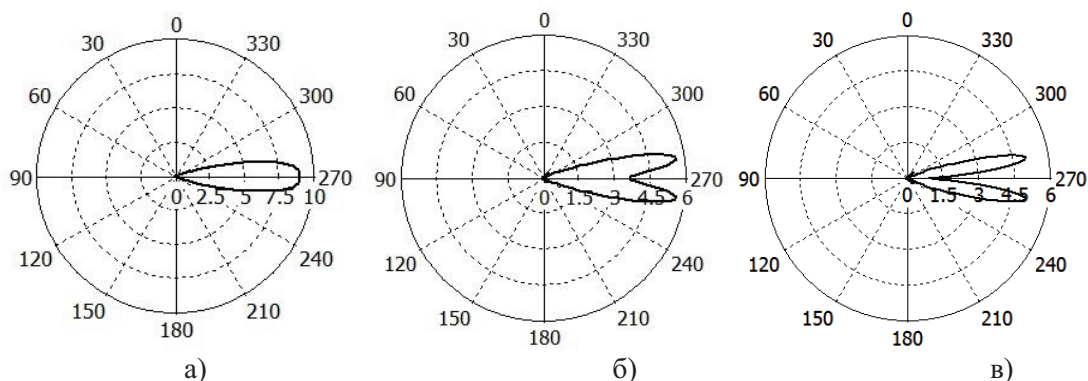


Рис. 5. Диаграммы направленности по мощности излучения двух волн коаксиального отражательного триода: а) $E_{\text{ТЕМ}} + E_{H_{11}} = 0,5 + 0,5$; б) $0,8 + 0,2$; в) $0,95 + 0,05$

Диаграмма направленности на рис. 5, а имеет выраженный максимум распределения в центре. Ширина ДН составляет $\sim 25,3^{\circ}$. ДН на рис. 5, б характерна для аксиально-симметричной моды E_{01} , в которую трансформируется волна ТЕМ при прохождении ее из неодносвязной области системы (рис. 2, б) в односвязную. Ширина главного лепестка ДН составляет $\sim 12,7^{\circ}$, направление главного лепестка – 10° . ДН имеет ноль (глубокий минимум) на оси системы (рис. 5, в). На рис. 5, б отсутствует глубокий минимум, ширина ДН составляет $\sim 32^{\circ}$, направление главного лепестка – 8° . Как видно из рис. 5, влияние волны H_{11} становится заметным по отсутствию провала на ДН, т. е., если амплитуда волны H_{11} больше 0,4 ($E_{\text{ТЕМ}} + E_{H_{11}} = 1$).

Экспериментальные диаграммы направленности

Измерение диаграмм направленности излучения, генерируемого СВЧ генератором, осуществляется посредством перемещения приемного элемента по поверхности воображаемой

сферы, центром которой является излучающее окно генератора, и фиксирования показаний элемента при его каждом положении на регистраторе импульсов. Радиус воображаемой сферы, на поверхности которой проводятся измерения, должен удовлетворять условию: $L > 8R_{от}^2 / \lambda$, здесь λ – длина волны излучения.

По величине фиксируемых сигналов строится диаграмма направленности излучения, и определяются два коэффициента направленного действия (1) по измерениям, снятым при взаимно перпендикулярных положениях приемного элемента. Мощность излучения, генерируемого импульсным источником $P_{rec} = P_{rec}^1 + P_{rec}^2$, определяется выражением

$$P_{out}^{1,2} = \frac{16\pi^2 L^2 P_{rec}^{1,2}}{D^{1,2} G_{np} \lambda^2},$$

где индексы 1 и 2 относятся к мощностям, которые фиксируется приемным элементом при двух взаимно перпендикулярных положениях; $P_{rec}^{1,2}$ – мощность, поступающая на вход приемного элемента, расположенного на расстоянии L от излучательного окна; G_{np} – коэффициент усиления приемной антенны, определяемый экспериментальным путем.

На рис. 6 представлены экспериментальные диаграммы направленности излучения планарно-коаксиального и коаксиального триодов с ВК. При исследовании генерации СВЧ-излучения в планарно-коаксиальном отражательном триоде было теоретически и экспериментально показано, что при формировании аксиально-несимметричных пучков с шириной $h < R_{от} \pi / 2$ генерация электромагнитного излучения происходит на моде TE_{11} . На рис. 6, а представлена экспериментальная диаграмма направленности излучения планарно-коаксиального триода с несимметричным электронным пучком. Ширина ДН составляет $\sim 45^\circ$. Из сравнения экспериментальной диаграммы (рис. 6, а) и расчетной (рис. 5, а) следует, что структура поля генерируемого излучения наиболее близка к волне типа H_{11} . Экспериментальное значение мощности излучения порядка 100 МВт.

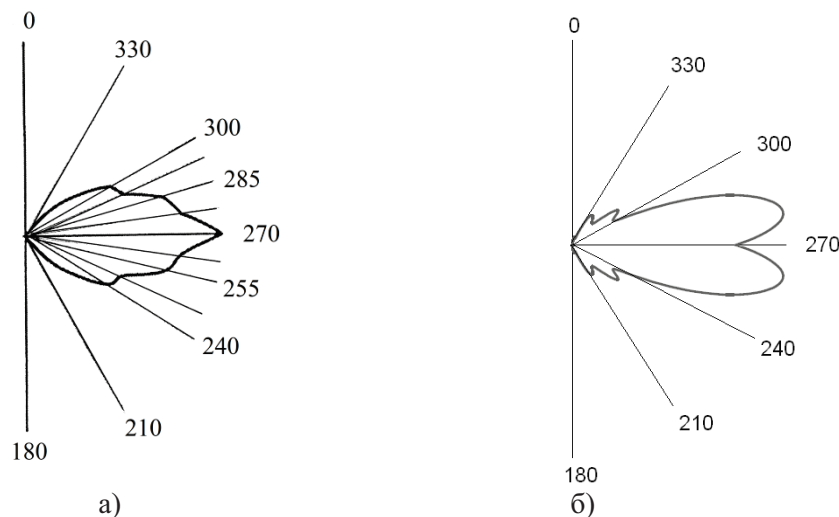


Рис. 6. Экспериментальные диаграммы направленности излучения отражательных триодов: а) планарно-коаксиальный; б) коаксиальный

При исследовании генерации электромагнитных колебаний в коаксиальном отражательном триоде численно и экспериментально показано, что аксиально-симметричный расходящийся электронный пучок резонансно взаимодействует с TEM волной, которая трансформируется в E_{01} волну в односвязной волноводной области.

Экспериментальные диаграммы направленности излучения для аксиально-симметричного пучка представлены на рис. 6, б. На ДН на рис. 6, б отсутствует глубокий минимум, что свидетельствует о присутствии асимметрии пучка по азимуту, обуславливающей возбуждение волны H_{11} наряду с волной E_{01} . Ширина главного лепестка ДН составляет $\sim 40^\circ$,

направление главного лепестка – $\sim 10^\circ$. Из расчетных ДН (рис. 5) следует, что доля волны H_{11} составляет не менее 20 %. Мощность излучения, полученная в эксперименте, 198 МВт.

Заключение

В работе проведено теоретическое исследование характеристик излучения планарно-коаксиальных и коаксиальных отражательных триодов, разрабатываемых как одномодовые генераторы СВЧ излучения. Исследование электродинамических характеристик и распространения электромагнитных волн в системах позволило определить структуру поля излучения. Показано, что излучение в планарно-коаксиальном триоде может происходить на волне типа H_{11} при формировании аксиально-несимметричного электронного пучка. Излучение в коаксиальном отражательном триоде может происходить на E_{01} волне при взаимодействии расходящегося симметричного пучка с волной ТЕМ и трансформацией ее в волну E_{01} .

Численное исследование диаграмм направленности излучения и сравнение с экспериментальными ДН позволяет определить модовый состав излучения и провести диагностику неоднородности пучка в коаксиальном отражательном триоде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жерлицын А.Г., Канаев Г.Г., Коваль Т.В., Нгуен Т.М. Исследование возбуждения электромагнитных колебаний в планарно-коаксиальном триоде с виртуальным катодом // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 11/2. – С. 209–214.
2. Григорьев В.П., Коваль Т.В., Мельников Г.В., Рахматуллин Р.Р. Коаксиальный отражательный триод с радиально-расходящимся пучком // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 123–127.
3. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.

Поступила 02.03.2012 г.