

УДК 537.862

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛЕЙ И РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ПЛАНАРНО-КОАКСИАЛЬНОГО ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ТРИОДА

В.П. Григорьев, А.Г. Жерлицын, Т.В. Коваль, Г.В. Мельников, А.Л. Марченко, Нгуен Туан Минь

Томский политехнический университет

E-mail: grig@am.tpu.ru

Проведено численное исследование структуры полей и резонансных частот в планарно-коаксиальной электродинамической системе отражательного триода. Показано, что в планарно-коаксиальном триоде с виртуальным катодом возможно возбуждение аксиально-симметричной волны E_{01} , несимметричных волн H_{11} и H_{21} , а также возбуждение ТЕМ моды в неодносвязной области, которая преобразуется в волну E_{01} в цилиндрической области триода.

Ключевые слова:

Собственная частота, структура поля, виркатор.

Key words:

Own frequency, field structure, viricator.

Введение

Приборы с виртуальным катодом (ВК), называемые виркаторами, являются генераторами микроволнового излучения в сантиметровом диапазоне частот с гигаваттным уровнем мощности [1, 2]. Одним из достоинств является возможность использования всего тока пучка, что обеспечивает получение такого высокого уровня мощности излучения в этих генераторах. Они отличаются конструктивной простотой, компактностью и отсутствием внешнего магнитного поля. Все это определяет повышенный интерес к таким системам.

В настоящее время разработаны виркаторы с электродами плоской и коаксиальной конфигураций. В отражательном триоде с ВК с плоско-параллельными электродами высокая эффективность обеспечивается благодаря взаимодействию с полем резонансной структуры сгруппированных по фазе осциллирующих электронов [3, 4]. В виркаторе коаксиального типа с радиально сходящимся пучком уровень мощности существенно зависит от условий формирования виртуального катода и однородности распределения пучка по углу, но в таких генераторах, как показывают экспериментальные исследования, легче осуществить одномодовый режим генерации [5, 6]. Однако в таких генераторах существуют трудности технологического характера, связанные с возможными колебаниями и юстировкой цилиндрического сеточного анода. Поэтому представляет интерес новая конструкция отражательного триода с плоскопараллельными электродами, в котором анод имеет форму прямоугольного цилиндра, переходящий в конус и играет роль внутреннего проводника коаксиальной электродинамической системы (рис. 1). Катодная система расположена внутри анода.

В предлагаемом планарно-коаксиальном генераторе устанавливается четыре плоскопараллельных промежутка, сеточные аноды, которых соединяются в квадратную призму с закругленными ребрами. С обеих сторон призма плавно переходит в полый цилиндр для образования внутреннего

проводника коаксиального волновода. Со стороны окна для вывода микроволнового излучения полый цилиндр переходит в конус, представляющий собой трансформатор типа волны, который преобразует ТЕМ моду в моду E_{01} , способную распространяться по круглому волноводу.

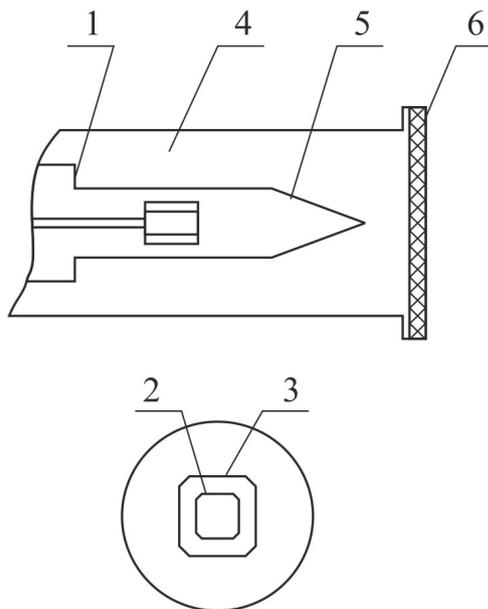


Рис. 1. Схема планарно-коаксиального триода с ВК: 1) отражатель; 2) катод; 3) анод-сетка; 4) вакуумная камера; 5) трансформатор типа волны; 6) выходное окно

Данная конструкция отражательного триода должна сочетать в себе преимущества отражательного триода с плоскими электродами (катодом и анодом) и коаксиального виркатора с радиальным пучком. Действительно, планарная конструкция диодного промежутка (катода и сетки-анода) более проста в изготовлении, чем коаксиальная, и допускает управление частотой излучения при плавной регулировке диодного зазора, позволяет независимо осуществлять точную подстройку величин каждого промежутка, а также управлять воз-

буждением типов колебаний, например, аксиально-несимметричной моды H_{n1} . Другим преимуществом такой системы является возможность генерации бездисперсионной ТЕМ моды, для которой можно эффективно использовать согласующие элементы, рассчитанные на узкую полосу частот. В системах с ВК наибольшее взаимодействие пучка с электромагнитным полем происходит в области виртуального катода, где параметр нелинейности максимальный [4]. В этой же области (вблизи внутреннего проводника – анода) максимальная напряженность электрического поля ТЕМ волны.

В работе проведено теоретическое исследование собственных полей электродинамической структуры планарно-коаксиального отражательно-го триода. Исследование проведено с помощью численного моделирования в пакете COMSOL Multiphysics.

Структура собственных полей в электродинамической системе планарно-коаксиального триода

Наибольший интерес представляют низшие типы волн. Это связано с тем, что передача энергии волны низшего типа направляющей системе обеспечивается наиболее просто; волна низшего типа имеет наименьший уровень шумов в точке приема сигнала. Поскольку у волны ТЕМ критическая частота равна нулю, то она является низшим типом колебаний. Первым высшим типом волны в коаксиальной линии при любом диаметре и конфигурации внутреннего проводника является волна TE_{11} . В работе [7] показана возможность возбуждения ТЕМ моды в генераторе с неодносвязной электродинамической структурой.

Электродинамическая система планарно-коаксиального отражательного триода является неодносвязной в области взаимодействия пучка с полем системы. В этой области могут возбуждаться волны типа ТМ, ТЕ и ТЕМ. На рис. 2 показана модель электродинамической структуры планарно-коаксиального триода. Резонансная система триода не является однородной вдоль продольной координаты z и состоит из отрезков волноводных линий: коаксиальной, планарно-коаксиальной и цилиндрической, в каждой из которых свои критическая частота и распределение поля. Поэтому необходимо исследовать структуру полей и критических частот различных типов колебаний и получить информацию о возможности их трансформации. Для этого достаточно провести исследование поперечной структуры поля и критических частот с помощью численного решения двумерного уравнения Гельмгольца.

Первый высший тип волны в неодносвязной линии (коаксиальной и планарно-коаксиальной) является волна H_{11} . В коаксиальном волноводе при малых соотношениях радиусов внутреннего и внешнего радиусов $R_1 \ll R_2$ критическая частота волны H_{11} приближенно равна критической частоте волны в круглом волноводе, т. е. $f_{кр} \cong c/\pi R_2$. В другом предельном случае $R_1 \sim R_2$ критическая частота вол-

ны H_{11} оценивается как $f_{кр} \cong c/\pi(R_1 + R_2)$, где c – скорость света.

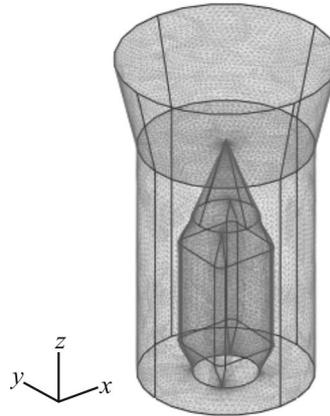


Рис. 2. Модель электродинамической структуры триода

Критические частоты нескольких первых высших мод для неодносвязной и односвязной областей представлены в таблице. Здесь R_2 – внешний радиус цилиндрической линии; R_1 – радиус внутреннего проводника; $a=2R_1$ – сторона внутреннего электрода планарно-коаксиальной линии.

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

| Волна | Коаксиальная $R_1=7,1$ см, $R_2=17,5$ см | Планарно-коаксиальная $a=2R_1$, $R_2=17,5$ см | Цилиндр $R_2=17,5$ см | Цилиндр $R_2=22$ см |
|----------|--|--|--------------------------|------------------------|
| H_{11} | 0,40 | 0,38 | 0,50 | 0,40 |
| H_{21} | 0,77 | 0,73 0,78 | 0,82 | 0,66 |
| E_{01} | 1,43 | 1,58 | 0,66 | 0,52 |
| E_{11} | 1,48 | 1,62 | 1,05 | 0,83 |
| E_{02} | 2,88 | 3,08 | 1,50 | 1,20 |

На рис. 3 для планарно-коаксиальной системы показана структура электрического поля волн ТЕМ, H_{11} ($f_{кр}=0,38$ ГГц) и H_{21} ($f_{кр}=0,73$ и $0,78$ ГГц).

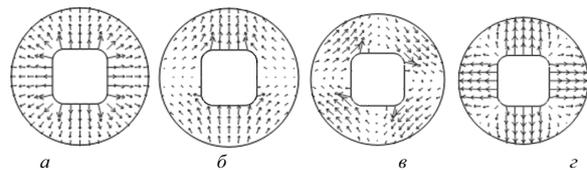


Рис. 3. Структура электрического поля волн в планарно-коаксиальной системе: а) ТЕМ; б) H_{11} ; в) и г) H_{21}

Критические частоты в направляющих линиях зависят от размеров системы (рис. 4 и 5). На рис. 4 показана зависимость критической частоты от радиуса внешнего электрода R_2 волн H_{11} и H_{21} для областей: коаксиальной, планарно-коаксиальной и цилиндрической. Заметим, что для волны H_{21} вырождение снимается, разница в частотах возрастает с уменьшением радиуса R_2 . Изменение критической частоты при изменении радиуса внутреннего электрода (конусная часть анода, рис. 1) отображено на рис. 5, здесь $R_2=17,5$ см.

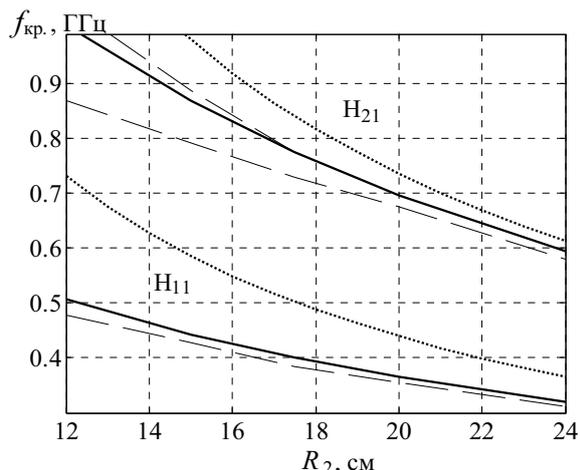


Рис. 4. Зависимость критической частоты от R_2 в линиях: коаксиальной (—), планарно-коаксиальной (---) и цилиндрической (...)

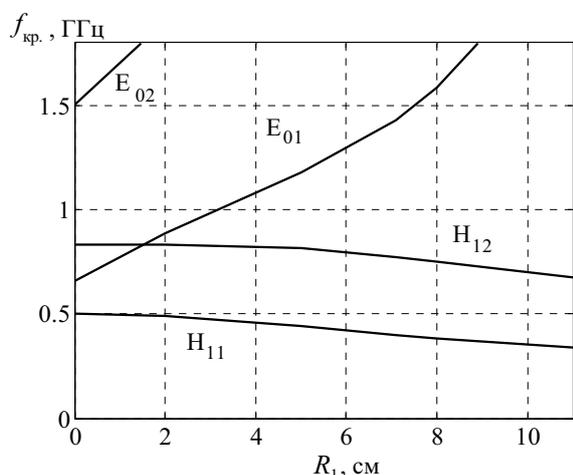


Рис. 5. Зависимость критических частот от внутреннего радиуса коаксиальной линии

Критические частоты уменьшаются с увеличением радиуса системы R_2 (рис. 3). Как видно из рис. 3, в планарно-коаксиальной линии ($R_2=17,5$ см) и цилиндрической области при $R_2=22$ см волна H_{11} имеет близкие значения критической частоты. Поэтому при возбуждении волны H_{11} согласование неодносвязной и односвязной областей триода можно осуществлять с помощью рупора, имеющего радиус выходного окна 22 см. Что касается волны H_{21} , то критические частоты в планарно-коаксиальной и волноводной областях триода имеют близкие значения при радиусах $R_2=17,5$ и 18,2 см соответственно (рис. 3).

Как видно из таблицы и рис. 5, 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 триоде. Так при возбуждении волны E_{01} ($f_{кр.}=1,58$ ГГц) в неодносвязной области триода она будет трансформироваться в волну E_{02} ($f_{кр.}=1,5$ ГГц)

на границе областей. Поэтому генерацию волны E_{01} в триоде можно осуществить при возбуждении TEM волны в неодносвязной области и ее последующей трансформацией в E_{01} в односвязной области, так как волны TEM и E_{01} имеют близкие конфигурации полей. Для определения резонансных частот проведем исследование коэффициента передачи мощности излучения TEM волны в электродинамической структуре триода (рис. 2). Обозначим коэффициент передачи электромагнитной энергии через правый торец S_{21} . Параметр S_{21} может быть определен в терминах электрического поля и равен отношению потока энергии прошедшей через триод к энергии на входе.

Если пренебречь потерями на торцах резонатора, то $|S_{21}|^2=1-|S_{11}|^2$, где $S_{11}=|S_{11}|e^{i\varphi_0}$ – коэффициент отражения; φ_0 – фаза коэффициента отражения S_{11} .

Резонансная длина резонатора, при которой коэффициент передачи равен единице, определяется соотношением [8]:

$$L = p \frac{\Lambda}{2} + \frac{\varphi_0}{2\pi} \Lambda, \quad (*)$$

где $\beta=2\pi/\Lambda$, Λ – длина волны в линии передачи, $p=0,1,2,\dots$. Зависимость между Λ и длиной волны λ в свободном пространстве для каждого типа волны определяется из соотношения $\Lambda=\lambda/\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{кр.})^2}$. Здесь $\lambda_{кр.}=c/f_{кр.}=2\pi/k_{\perp}$ – критическая длина волны. Свободное распространение волны по направляющей системе имеет место лишь при длинах волн меньших критической ($\lambda < \lambda_{кр.}$ или $f > f_{кр.}$). Как следует из (*), только при $\varphi_0=0$ длина резонатора кратна целому числу полувольт. При $\varphi_0 < 0$ (диафрагма индуктивная) длина резонатора меньше $p\Lambda/2$. При емкостной диафрагме ($\varphi_0 > 0$) длина резонатора больше $p\Lambda/2$.

На частотах, отличных от резонансной, $\varphi_0 \neq 0$, поэтому амплитуда прошедшей волны уменьшается. Изменение коэффициента передачи энергии от частоты определяется зависимостью частотной β и φ_0 . Зависимость величины β от частоты согласно соотношению $\beta^2=k^2[1-(\lambda/\lambda_{кр.})^2]$ имеет вид

$$\beta(f) = \frac{2\pi}{c} f \sqrt{1 - \left(\frac{c}{\lambda_{кр.} f} \right)^2}.$$

С помощью численного решения трехмерной электродинамической задачи получена зависимость коэффициента передачи S_{21} волны TEM от частоты, представленная на рис. 6. Для волны E_{01} справедливо неравенство $k_{\perp} \ll k_z$ в рассматриваемой области частот, поэтому условие резонанса выполняется при $f \approx pc/2L$, $p=1,2,\dots$

На рис. 7 показано распределение E_x компоненты электрического поля вдоль продольной координаты (для $x=0,08$ м, $y=0$ м) для разных значений резонансных частот. Из рис. 7 видно, что вдоль оси резонатора укладывается целое число полувольт.

При отражении волн от левого торца триода и от выходного окна электродинамическую струк-

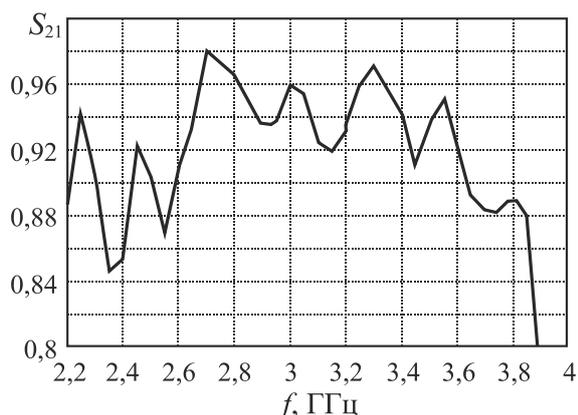


Рис. 6. Зависимость коэффициента прохождения от частоты при возбуждении ТЕМ волны

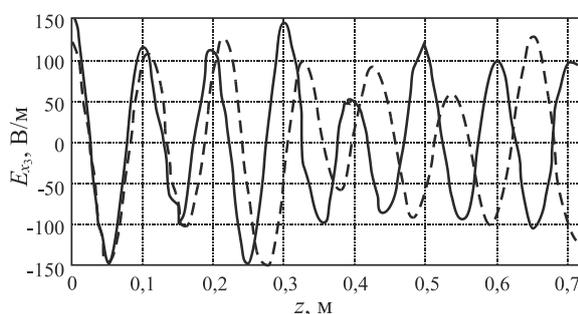


Рис. 7. Распределение E_x компоненты электрического поля вдоль продольной координаты при $f=3$ ГГц (сплошная линия) и $f=2,74$ ГГц (пунктирная линия)

туру триода можно рассматривать как резонатор с конечной добротностью $\sim 50 \dots 60$. Структура собственных полей и собственные частоты исследова-

лись с помощью численного решения трехмерного уравнения Гельмгольца. Рассмотрим диапазон частот $2,5 \dots 3,5$ ГГц. При возбуждении волны H_{11} собственные частоты равны $2,57$; $2,77$ и $2,99$ ГГц, а при возбуждении волны H_{21} – $2,63$ и $2,84$ ГГц. На частотах выше 3 ГГц резонансными становятся моды с азимутальным номером $n > 2$. Собственные частоты при возбуждении волны ТЕМ волны можно определить из рис. 6. Заметим, что для рассмотренных волн $k_{\perp} \ll k_z = \pi p / L$ и поэтому собственные частоты близки к $f = k_z c / 2\pi = pc / 2L$, где $f = 2,52$; $2,73$; $2,94$ и $3,15$ ГГц. Мощность излучения существенно будет зависеть от конфигурации и взаимодействия электронного пучка с собственными полями резонансной системы триода.

Заключение

Численное исследование структуры полей и резонансных частот показало, что в планарно-коаксиальной электродинамической системе возможно возбуждение несимметричных волн H_{11} и H_{21} . При возбуждении волны E_{01} в неодносвязной области триода она будет трансформироваться в волну E_{02} на границе областей. Поэтому генерацию волны E_{01} в триоде можно осуществить при возбуждении ТЕМ волны в неодносвязной области и ее последующей трансформации в E_{01} в односвязной области, так как волны ТЕМ и E_{01} имеют близкие конфигурации полей.

Использование плоскопараллельных ускоряющих промежутков в планарно-коаксиальном отражательном триоде позволит независимо осуществлять точную подстройку величин каждого промежутка, а также управлять возбуждением типов колебаний, например, аксиально-несимметричной моды H_{n1} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Жерлицын А.Г. Плазменная электроника // Сб. научных трудов / под ред. В.И. Курилко. – Киев: Наукова думка, 1989. – 298 с.
2. Жерлицын А.Г., Мельников Г.В., Кузнецов С.И. Экспериментальные исследования влияния внешнего контура на процесс генерации в триоде с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. – 1990. – Т. 35. – № 6. – С. 1274–1278.
3. Коваль Т.В. Излучение потока осциллирующих электронов при возбуждении параметрических колебаний // Известия вузов. Физика. – 1997. – Т. 40. – № 10. – С. 103–106.
4. Григорьев В.П., Коваль Т.В. Теория генерации электромагнитных колебаний // Известия вузов. Физика. – 1998. – Т. 41. – № 4. – С. 169–182.
5. Жерлицын А.Г. Генерация СВЧ излучения в триоде с виртуальным катодом // Письма в ЖТФ. – 1990. – Т. 16. – № 22. – С. 78–80.

6. Jiang W., Woolvrtton K., Dickens J., Kristiansen M. High Power Microwave Generation by a Coaxial Virtual Cathode Oscillator // IEEE transaction on plasma science. – 1999. – V. 27. – № 5. – P. 1538–1542.
7. Григорьев В.П., Коваль Т.В., Мельников Г.В. О возможности возбуждения ТЕМ-волны в триоде с виртуальным катодом // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78. – № 6. – С. 116–118.
8. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1973. – 486 с.

Поступила 07.02.2011 г.