

Краткие сообщения

09;10

О возможности возбуждения ТЕМ-волны в триоде с виртуальным катодом

© В.П. Григорьев, Т.В. Коваль, Г.В. Мельников

Томский политехнический университет,
634034 Томск, Россия
e-mail: grig@am.tpu.ru

(Поступило в Редакцию 18 июля 2007 г.)

На основе экспериментальных и теоретических исследований продемонстрирована возможность генерации ТЕМ-волны в триоде с виртуальным катодом. Определены условия преимущественного возбуждения ТЕМ-моды в области взаимодействия электронного пучка с электромагнитной волной.

PACS: 84.40.-x, 07.57.Hm, 41.75.Fr

Механизм преобразования энергии электронного пучка в энергию электромагнитного излучения в СВЧ-приборах является наиболее важным при их использовании. Особую актуальность этот вопрос приобретает в области релятивистской высокочастотной электроники, где мощность электромагнитного излучения достигает гигаваттных уровней [1]. Достижение такого высокого уровня мощности обеспечивается за счет использования в качестве источников питания сильноточных электронных ускорителей, которые позволяют получать напряжения в несколько миллионов вольт при токах до сотни килоампер.

Наиболее перспективными СВЧ-генераторами с точки зрения использования всего тока ускорителя являются генераторы с виртуальным катодом (ВК), называемым виркатором, и его разновидность — триод с виртуальным катодом [2]. В отличие от других типов виркаторов в триоде с ВК процессы формирования пучка электронов и преобразование его энергии в энергию СВЧ-излучения происходят в одном и том же объеме, являющемся одновременно электродинамической структурой. Последнее оказывает влияние как на процесс формирования пучка и виртуального катода, так и на процесс генерации и вывод излучения в свободное пространство. Характеристики СВЧ-полей в вакуумной камере и СВЧ-излучения в свободном пространстве могут существенно отличаться. Это связано с формированием стоячих волн внутри камеры и трансформацией их в области выходного окна. Знание структуры поля внутри камеры позволит сконструировать эффективный вывод излучения в свободное пространство и решить проблему повышения мощности излучения.

В данной работе рассмотрена возможность возбуждения внутри вакуумной камеры электромагнитной волны типа ТЕМ, которая является перспективной для эффективного согласования с открытым пространством и вывода электромагнитной энергии.

Экспериментальные исследования процесса генерации в триоде с ВК проводились на установке, представляю-

щей собой электронный ускоритель прямого действия на базе двойной формирующей линии (ДФЛ). Сформированный ДФЛ положительный импульс высокого напряжения амплитудой ~ 0.5 MV прикладывается к аноду триода с ВК, который является нагрузкой электронного ускорителя.

Типичная конструкция триода с ВК (рис. 1) представляет собой вакуумную камеру, внутри которой располагаются катодный и анодный узлы, окно для вывода СВЧ-излучения или, вместо окна — антенна для формирования в свободном пространстве направленного излучения. Катодный узел состоит из взрывозамкнутого многоострийного катода 1 и катододержателя, служащего для крепления катода к корпусу вакуумной камеры. Катод диаметром 10 см выполнен из нержавеющей стали и расположен соосно с катододержателем. Конструкция катододержателя позволяет изменять величину катод-анодного промежутка в широких пределах. Анодный узел состоит из сеточного анода 2 (диамет-

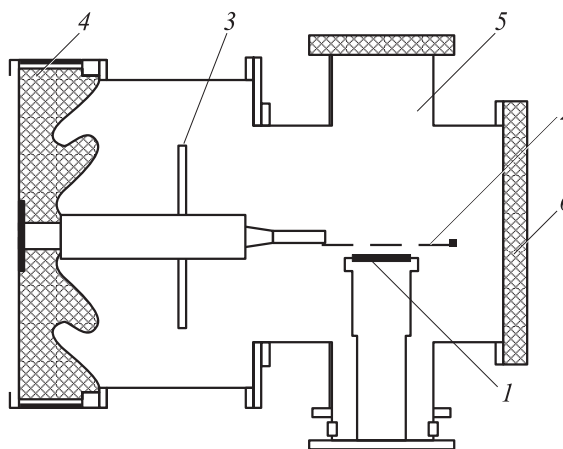


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — катод, 2 — анод-сетка, 3 — отражатель, 4 — изолятор, 5 — вакуумная камера, 6 — окно для вывода СВЧ-излучения.

ром 20 см и геометрической прозрачностью ~ 0.7) и анододержателя. Сетка анода изготовлена из нержавеющей стали и имеет ячейки размером 3.5×3.5 мм. Анододержатель обеспечивает крепление анода к изолятору и подвод высокого напряжения. Металлический отражатель, размещенный на анододержателе, служит для защиты вакуумного изолятора от попадания на него заряженных частиц, ультрафиолетового и тормозного излучения, порождаемых осциллирующим электронным пучком. Кроме того, отражатель является элементом электродинамической структуры, и, перемещая его по анододержателю, можно изменять структуру поля в вакуумной камере.

Эксперименты проводились при двух диодных промежутках $d = 18$ и 20 мм соответственно. Так как необходимо было обеспечить вакуумную изоляцию, поскольку отражатель находится под высоким потенциалом, соответствующим приложенному к аноду-сетке напряжению, расстояние L между отражателем и осью катода изменялось от 26.5 до 40 см. Излучение выводилось в свободное пространство через вакуумно-плотное окно, расположенное в торце цилиндрической камеры триода напротив отражателя. На расстоянии 3-х метров от окна в дальней зоне по оси триода установлен приемник излучения, состоящий из рупорной антенны, волноводного аттенюатора поляризационного типа и измерителя частоты излучения, описанного в работе [3].

На рис. 2, *a* представлены зависимости мощности излучения в относительных единицах от расстояния L . При диодном промежутке 18 мм частота излучения, зависящая от приложенного напряжения, плотности тока и зазора, была равна 3025 ± 25 МГц. При варьировании расстояния между отражателем и осью катода от 28.5 до 35 см частота излучения и характер изменения частоты за время импульса имели незначительные отклонения. При диодном промежутке 20 мм частота излучения была равна 2900 ± 25 МГц с максимумом мощности при $L = 31$ см. Характеристики излучения в этой точке приведены на рис. 2, *b, c*. Во всех описанных экспериментах при настройке отражателя на генерируемую частоту фиксировалось увеличение излучаемой мощности за время действия импульса высокого напряжения.

Экспериментальные результаты находят объяснение, если учесть, что электродинамическая структура триода в области взаимодействия пучка с электромагнитным полем имеет неоднородное поперечное сечение. Цилиндрическая камера триода играет роль внешней поверхности, а анододержатель и анод-сетка являются внутренними проводниками. Металлический отражатель перемещается вдоль цилиндрической камеры и выполняет роль торцевой стенки. В такой системе с высокой эффективностью возбуждаются волны типа ТЕМ и H_{118} . Численные расчеты коэффициентов отражения этих волн на выходе реальной камеры с учетом их трансформации позволяют рассматривать область взаимодействия как резонатор с нагруженной добротностью $Q \sim 40-50$. Эффективное взаимодействие электронов

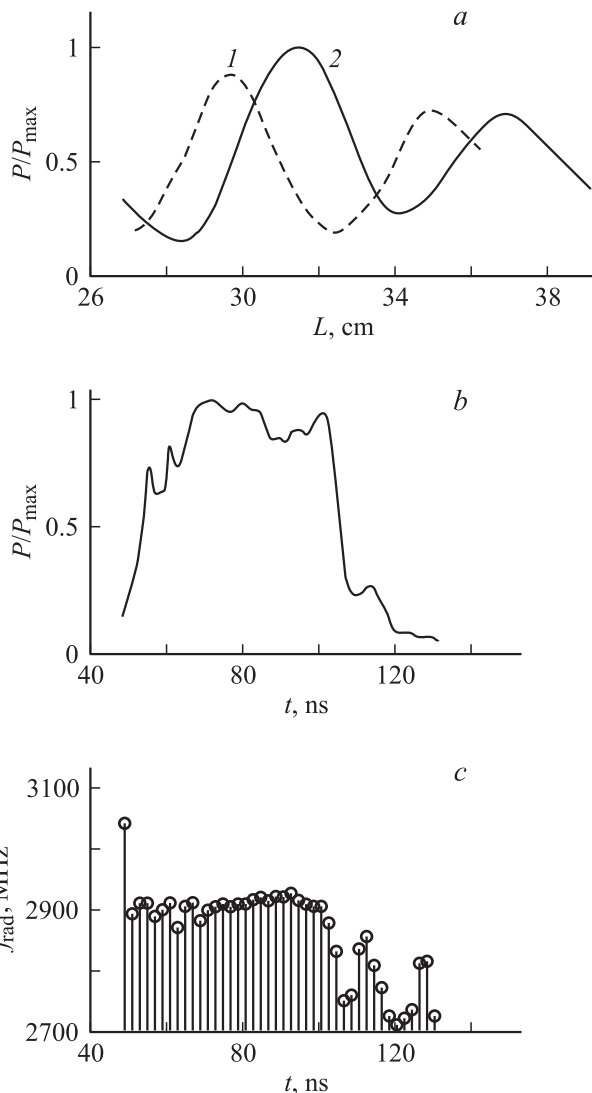


Рис. 2. *a* — зависимости относительной мощности излучения от положения отражателя при катод-анодных зазорах $d = 18$ (1) и 20 мм (2); *b* — зависимости относительной мощности за время импульса при $L = 31$ см, $d = 20$ мм; *c* — зависимости изменения частоты излучения за время импульса при $L = 31$ см, $d = 20$ мм.

с электромагнитным полем обеспечивается благодаря высокому уровню нелинейности колебаний электронов, а также колебаниям ВК, синхронизованным с когерентными колебаниями электронов пучка [4]. Возбуждение электромагнитных колебаний происходит на частоте ω , которая близка к собственной частоте резонатора и кратна частоте колебаний электрона в потенциальной яме ($\omega \sim l\Omega_0$, $l = 1, 2, 3, \dots$) с максимальным инкрементом

$$\xi = \frac{\sqrt{3}}{2} [\Lambda Z_{lv} |K_x|]^{1/3} \Omega_0, \quad (1)$$

где $\Lambda = \omega_0^2 / 2\pi\gamma_0\Omega_0^2$, ω_b — частота плазменных колебаний электронов пучка, γ_0 — относительная релятивистская энергия электронов на аноде, $K_x =$

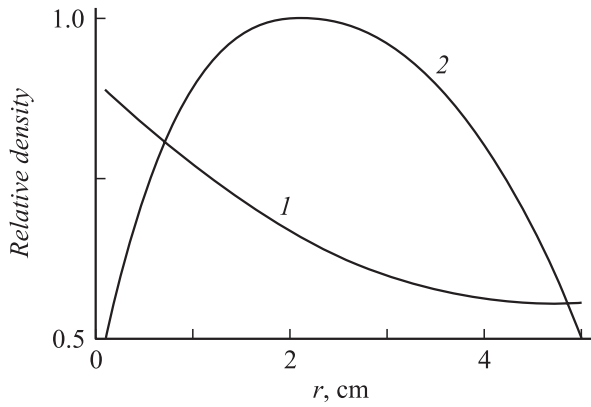


Рис. 3. Поперечное распределение плотности электронного пучка: 1 — внутри диодного промежутка, 2 — за анодом.

$= (c^2/\Omega_0^3)(\partial\Omega/\partial x)_0$ — параметр нелинейности колебаний электронов, $x = a^2$, a — амплитуда колебаний электронов, c — скорость света, k_z — продольный волновой вектор. Безразмерный импеданс $Z(k_z)$ отражает влияние геометрии пучка и типа возбуждаемой волны.

Для получения информации о распределении плотности тока пучка в его поперечном сечении было проведено численное моделирование формирования ВК. На рис. 3 показана зависимость плотности тока пучка от радиуса. Импеданс с учетом полученного распределения плотности по пучку может быть записан как

$$Z(k_z) = -\frac{\sin^2 k_z \Delta}{(k_z \Delta)^2} (\sin k_z z_1 + \sin k_z z_2) \rho_l(x_0), \quad (2)$$

где $z_{1,2}$ и Δ — координаты максимума плотности тока вдоль оси z и ширина максимума соответственно, $\rho_l(x_0)$ описывает влияние на импеданс поперечного распределения электрического поля по сечению резонансной камеры.

Рассмотрим ТЕМ-моду. В условиях резонанса частоты излучения $\omega = 2\pi f$ с собственной частотой ТЕМ-моды $\omega_v = (m\pi/h)c = k_z c$ ($m = 1, 2, \dots$) формируется стоячая волна, узлы которой по оси z расположены на расстояниях $nc/2f = n\lambda/2 = n\pi/k_z$, $n = 0, 1, 2, \dots$ от отражателя. Так как для распределения плотности пучка по поперечному сечению (рис. 3) $z_2 - z_1 = \lambda/2$, то, совмещая ось катода с узлом стоячей волны, можно обеспечить максимальный уровень возбуждения электромагнитных колебаний. Согласно расчетам, узел стоячей волны $n = 6$ для частоты излучения 2900 МГц ($k_z = 0.613 \text{ cm}^{-1}$) расположен на расстоянии 31.03 см. В экспериментах для диодного промежутка 20 мм при данном расположении отражателя был получен максимальный уровень микроволнового излучения. Для диодного промежутка 18 мм частота излучения составляла 3050 МГц ($k_z = 0.644 \text{ cm}^{-1}$), и узел стоячей волны $n = 6$ по расчетам должен быть расположен на расстоянии 29.5 см. Это также находит подтверждение в эксперименте.

Что касается более низкого уровня мощности излучения для диодного промежутка 18 мм, несмотря на увеличение тока в триоде, то это, по-видимому, связано с нарушением резонанса $\omega = \omega_v$ и появлением достаточно существенной расстройки. Последнее приводит к уменьшению инкремента и соответственно уровня мощности излучения.

Как показали численные расчеты, поперечное волновое число для моды H_{118} в электродинамической системе триода с ВК находится в пределах от 0.1 до 0.11 cm^{-1} и слабо влияет на величину собственной частоты ω_v и соответственно профиль стоячей волны по оси z в заданной области частот излучения. Это указывает на возможность возбуждения колебаний типа H_{118} . Чтобы выяснить, какой из рассматриваемых типов волн имеет преимущество при взаимодействии в рассматриваемой системе, проводилось сравнение по импедансу, который и определяет уровень взаимодействия электромагнитного поля с электронным пучком. При этом учитывалось, что взаимодействие поля с пучком происходит в области анод-виртуальный катод [1], где параметр нелинейности K_x является максимальным [4]. В результате $Z(\text{ТЕМ})/Z(H_{118}) \sim 3$. Последнее позволяет утверждать, что в области взаимодействия возбуждается ТЕМ-мода, и соответственно решать задачу об ее эффективном выводе.

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Григорьев В.П., Жерлицын А.Г. Плазменная электроника. Сб. науч. тр. Киев: Наук. думка, 1989.
- [2] Жерлицын А.Г., Мельников Г.В., Кузнецов С.И. // Р и Э. 1990. Т. 35. Вып. 6. С. 1274.
- [3] Бабичев Д.А., Шиян В.П., Мельников Г.В. // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 3. С. 94.
- [4] Григорьев В.П., Коваль Т.В. // Изв. вузов. Физика. 1998. № 4. С. 169.