

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ДВУХВОЛНОВОЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ ГЕНЕРАТОР

В. А. Вдовин, С. А. Соколов, В. А. Черепенин

Для релятивистских черенковских СВЧ генераторов представляются перспективными многоволновые режимы взаимодействия, позволившие к настоящему времени получить наибольшие значения импульсной СВЧ мощности при высоком электронном КПД [1]. К многоволновым мы будем относить устройства, в которых на фиксированной частоте электромагнитного поля электронный поток взаимодействует с несколькими распространяющимися однородными или неоднородными волнами. При выраженных резонансных свойствах электродинамической структуры в многоволновых устройствах электронный пучок на одной частоте взаимодействует с несколькими модами. По другой терминологии в последнем случае происходит затягивание нескольких мод в одну гибридную «супермоду» [2]. Экспериментальный анализ многоволновых процессов в широких квазиоптических структурах является достаточно сложным. Исследования же двухволнового взаимодействия пучка в системе с двумя основными типами волн могут быть выполнены сравнительно легко: экспериментальный стенд может быть довольно простым и компактным, а физическая интерпретация результатов не вызывает особых трудностей. Экспериментальное исследование релятивистского черенковского генератора с двухволновым взаимодействием и является предметом настоящего сообщения.

При выборе относительного диаметра диафрагменного волновода $2a/\lambda \approx 1$ в системе существуют только 2 типа волн: симметричная E_{01} и несимметричная EH_{11} (тип H). Их дисперсионные характеристики вблизи точки π могут быть достаточно близкими [3]. Однако распределения полей их синхронных гармоник различны, что можно использовать для раздельного возбуждения этих мод, изменяя радиус пучка [4].

В экспериментах использовалась сборная конструкция релятивистского черенковского генератора диапазона 7.9—8.1 мм, представляющая собой отрезок диафрагмированного волновода диаметром $2a=9$ мм, собранного из отдельных колец и диафрагм. Диаметр волновода, период структуры, толщина и внутренний диаметр диафрагм выбирались таким образом, чтобы с учетом провисания потенциала обеспечивался кинематический синхронизм пучка вблизи π -вида колебаний низшей симметричной моды E_{01} : $kv = \omega_{\pi}$. Вид кинематической дисперсионной диаграммы для мод E_{01} и EH_{11} показан на рис. 1. Расчетные границы отсечки: $\pi - 7.59$ и 7.0 мм, $0 - 11.36$ и 11.29 мм на модах E_{01} и EH_{11} соответственно. Можно показать, что вблизи точек π -вида обеих мод их дисперсионные характеристики находятся в полосе самовозбуждения системы; при возникновении генерации связь двух мод через электронный поток при значительной электронной нагрузке может приводить к установлению двухволнового режима работы устройства. В качестве источника релятивистских электронов использовался малогабаритный сильноточный инжектор с катодом на взрывной эмиссии, разработанный в ИСЭ СО АН СССР на базе серийного рентгеновского аппарата «МИРА-2Д» [5] и обладающий следующими параметрами: энергия электронов 150 кэВ, ток пучка 0.5—0.7 кА при длительности импульса 5 нс. Магнитное поле H_0 напряженностью до 40 кЭ для транспортировки электронного пучка создавалось с помощью импульсного соленоида. Для регистрации СВЧ мощности применялись германиевые охлаждаемые детекторы на горячих носителях, распределение мощности (диаграмма) выходного СВЧ поля снималось с разными поляризациями в разных точках пространства по апертуре выходного рупора, значения мощности в каждой точке усреднялись по нескольким импульсам. Длина волны излучения определялась с помощью эшелетта. Ориентировочно диаграмма направленности излучения регистрировалась также с помощью панно из неоновых лампочек.

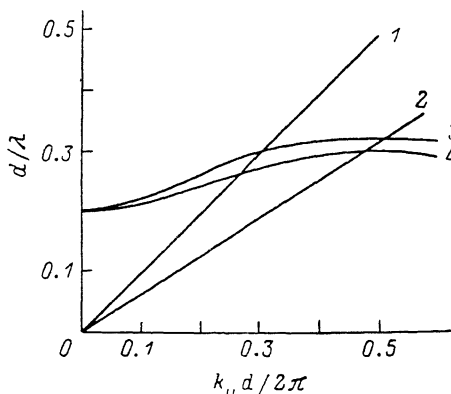


Рис. 1. Кинематическая дисперсионная диаграмма исследуемого генератора ($v = 0.63 c$).

1 — $\omega = k_{||} c$, 2 — $\omega = k_{||} v$, 3 — EH_{11} , 4 — E_{01} .

В экспериментах для возбуждения электродинамической системы черенковского генератора использовался тонкий кольцевой электронный пучок, при этом его толщина и диаметр могли несколько меняться как с помощью набора сменных катодов, так и при изменении напряженности фокусирующего магнитного поля. Диаграмма излучения, соответствующая моде EH_{11} с нефиксированной поляризацией, была получена в исследуемом генераторе при использовании стального трубчатого катода диаметром 5,5 и толщиной стенок 0,3 мм; диаметр электронного пучка при больших H_0 примерно соответствовал диаметру катода. С уменьшением диаметра катода до 5,0 мм распределение выходной мощности соответствовало моде E_{01} . Максимальная мощность одномодового излучения на волне $\lambda = 8$ мм, составляющая около 3 МВт, была получена на структуре из $N=9$ периодов. Выбор толщины стенок и диаметра катода соответственно 0,5 и 5,5 мм позволили получить диаграмму излучения, характерную для суммы мод $E_{01} + EH_{11}$ (рис. 2, а). Для определения пространственной когерентности излучения была зафиксирована его поляризация. Для этого перед запредельным сужением на входе генератора была установлена секторная диафрагма, вырезающая из пучка сектор с углом 60° . Снятые

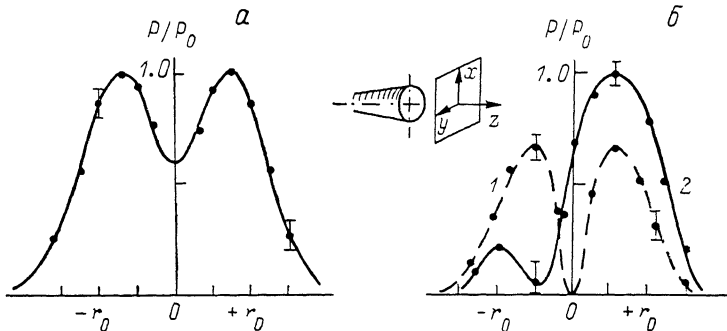


Рис. 2. Распределение интенсивности выходного излучения двухволнового генератора в плоскости, перпендикулярной оси выходного рупора.

а: излучение суммы мод $E_{01} + EH_{11}$ нефиксированной поляризации, распределение не имеет вариации по азимуту; б: излучение суммы мод $E_{01} + EH_{11}$ с линейной поляризацией. 1 — распределение интенсивности в плоскости $\{x, z\}$, 2 — в плоскости $\{y, z\}$ (все зависимости сняты только для радиальной компоненты электрического вектора электромагнитной волны).

после этого диаграммы выходного излучения в плоскостях $\{xz\}$ и $\{yz\}$ имеют характерную форму. В плоскости $\{xz\}$ распределение симметрично с минимумом в центре вблизи O (рис. 2, б, кривая 1), в то время как распределение в плоскости $\{yz\}$ резко асимметрично (рис. 2, б, кривая 2), что соответствует когерентному сложению колебаний двух мод: E_{01} и поляризованной линейно EH_{11} , происходящих на частоте $\omega \approx \omega_{\pi}$. Распределение интенсивности в поперечной плоскости по апертуре рупора имеет характерную форму вытянутого полумесяца. Подбор оптимальных граничных условий на катодном конце генератора при том же числе периодов структуры ($N=9$) при отсутствии нарушающей симметрию пучка диафрагмы позволил в 1,5—2 раза повысить мощность излучения и КПД по сравнению со случаем одноволнового взаимодействия. Усредненная по нескольким импульсам, диаграмма направленности была симметричной и одинаковой для обоих взаимно перпендикулярных направлений поляризации вдоль осей x и y , что соответствует когерентному сложению моды E_{01} с модой EH_{11} нефиксированной (т. е. меняющейся случайным образом от импульса к импульсу) поляризации; интенсивность излучения в центре оставалась более половины от максимальной. Измерения длин волн генерации для различных одноволновых режимов взаимодействия дали следующие значения: на моде E_{01} $\lambda_p = 8.1 \pm 0.2$ мм, на моде EH_{11} $\lambda_H = 7.9 \pm 0.2$ мм. Длина волны в двухволновом режиме находится, в пределах ошибок измерений, между этими двумя крайними значениями. Следует отметить, что во всех случаях нарушения юстировки электронного пучка аналогично [6] появлялась линейно-поляризованная EH компонента излучения и диаграмма становилась асимметричной, как на рис. 2, б.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов удалось осуществить двухволновое взаимодействие вблизи π -вида колебаний двух низших мод и показать возможность увеличения эффективности излучения по сравнению с одноволновым случаем. Исследование формирования диаграммы направленности излучения указывает на возможность управления ею путем изменения поляризации компонент многоволнового излучения или изменения состава мод.

В заключение авторы выражают признательность З. С. Чернову за полезные дискуссии и ряд ценных замечаний, а также И. Я. Гушиной за расчет дисперсионных характеристик.

Литература

- [1] Бугаев С. П., Канавец В. И., Климов А. И. и др. Препринт № 18 ИСЭ СО АН СССР. Томск, 1985.
- [2] Benson S. V., Madey J. M. J. Opt. Comm., 1985, v. 56, N 3, p. 212—218.
- [3] Clarricoats P. J. B., Oliver A. D., Chong S. L. Proc. IEEE, 1975, v. 122, N 11, p. 1173—1179.
- [4] Братман В. Л., Денисов Г. Г., Коровин С. Д. и др. Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, ИПФ АН СССР, 1984, с. 119—178.
- [5] Ельчанинов А. С., Коровин С. Д., Месяц Г. А. и др. ДАН СССР, 1984, т. 279, № 3, с. 624—626.
- [6] Братман В. Л., Денисов Г. Г., Коровин С. Д. и др. Письма в ЖТФ, 1983. т. 9, № 10, с. 617—620.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
18 ноября 1987 г.

УДК 538.566.5

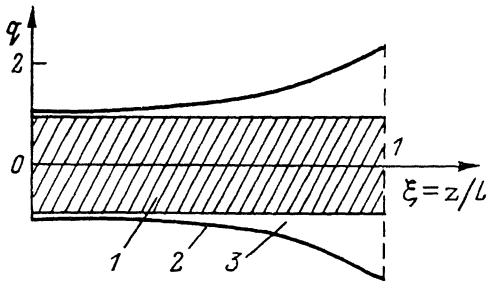
Журнал технической физики, т. 58, в. 8, 1988

К ПРОБЛЕМЕ ВЫВОДА СВЧ ЭНЕРГИИ ИЗ ПЛАЗМЕННОГО ВОЛНОВОДА

Г. И. Загинайлов, А. Н. Кондратенко, Е. М. Прохоренко

Идея использования плазменно-пучковой неустойчивости для генерации электромагнитного излучения известна сравнительно давно. Однако ее практическая реализация (как оказалось впоследствии) связана с серьезными техническими трудностями, которые до сих пор полностью не преодолены.

Проблема вывода СВЧ энергии из плазмы является одной из ключевых на пути создания эффективных плазменных генераторов электромагнитного излучения. Дело в том, что наиболее эффективно взаимодействуют с пучком медленные продольные волны ($v_\phi < c$) [1]. В то же



время вывод энергии этих волн из плазмы затруднителен и требует разработки специальных устройств. Большинство же существующих в настоящее время систем вывода энергии из плазмы (спиральные переходы, резонаторы) хорошо работает лишь на фиксированной частоте и трудно перестраивается на другие частоты. При этом теряется одно из основных преимуществ плазменного генератора — возможность плавной перестройки частоты.

Один из путей уменьшения потерь при выводе энергии из плазмы заключается в использовании релятивистских пучков [2]. Возбуждаемая при этом волна имеет скорость $v_\phi \sim c$ и легко выводится из плазмы. Однако затраты на создание релятивистских электронных пучков существенно затрудняют исследования в этом направлении и значительно снижают КПД таких генераторов.

В большинстве экспериментов основу плазменного генератора составляет цилиндрический плазменный волновод, находящийся в металлическом кожухе. Хорошо известно, что в таких системах эффективно возбуждаются пучком как объемные, так и поверхностные волны, причем дисперсионные свойства последних могут существенно изменяться в зависимости от радиуса кожуха [3].