

09;10

Особенности СВЧ генерации в виркаторе с неоднородным магнитным полем в области взаимодействия

© А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров

Поступило в Редакцию 24 января 2001 г.

Проведено компьютерное моделирование виркатора с неоднородным внешним магнитным полем, наложенным на потенциальную яму "катод-анод-виртуальный катод". Показано, что наложением такого магнитного поля можно существенно (почти в 5 раз) увеличить КПД СВЧ генерации. Увеличение КПД объясняется возникновением гиротронного эффекта.

СВЧ генераторы с виртуальным катодом (ВК) — виркаторы, отражательные триоды и редитроны — являются в три последние десятилетия наиболее популярными генераторами в мощной релятивистской СВЧ электронике. Как отмечают в [1], в каждом десятилетии достигнутая мощность генерации в них увеличивалась на порядок и к началу 1990-х гг. достигла колоссальной величины — 22 GW [2]. Обзор современного состояния таких генераторов представлен в [3].

Однако в последнем десятилетии появились иные тенденции: погоня за рекордной мощностью сменилась поиском путей повышения КПД СВЧ генерации, тем более что найдены технические возможности когерентного сложения мощностей излучения многих виркаторов умеренной (субгигаваттной) мощности [4].

В этой связи в данной работе методом численного моделирования проверялась идея повышения КПД в виркаторе с неоднородным магнитным полем в области взаимодействия, предложенном нами почти 10 лет назад [5], упомянутом также в [6,7] и до сих пор не исследованном ни теоретически, ни экспериментально. Напомним, на чем основана эта идея.

В [8] была предложена новая концепция виркатора, названная его авторами редитроном (от англ.: reflex electron discrimination tube).

Сущность редитрона заключается в изъятии отраженных от ВК электронов, что исключает возмущения диода. По замыслу авторов редитрона это должно увеличить кпд генерации. Однако, как показано в [9,10], это также исключает обратную связь в СВЧ генераторе и срывает излучательную неустойчивость. Поэтому в развитие концепции редитрона в [5] предложен редитрон с дискриминацией не всех отраженных, а лишь "мягких" электронов, которые уже отдали свою энергию на излучение и вышли из синхронизма. Такую сортировку электронов в потенциальной яме "катод-анод-ВК" можно осуществить наложением на нее продольного магнитного поля, имеющего минимум на анодной сетке.

Однако целью работы было поставлено более широкое исследование: как влияет наличие не только минимума, но и максимума магнитного поля в область взаимодействия виркатора на его генерационные характеристики.

Для моделирования использовался $2D(rz)$ вариант известного пакета программ "КАРАТ" (версия 70720) [11], представляющего собой полностью самосогласованный релятивистский электромагнитный PIC-код.

Геометрия области моделирования с указанием необходимых размеров показана на рис. 1.

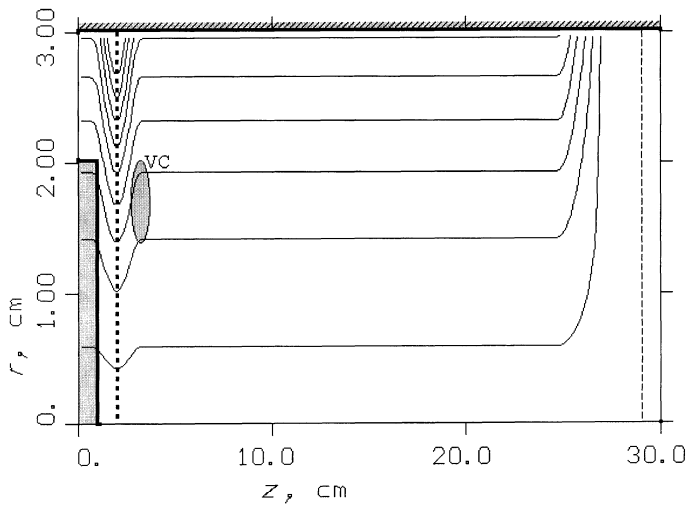


Рис. 1. Исследованная конфигурация виркатора.

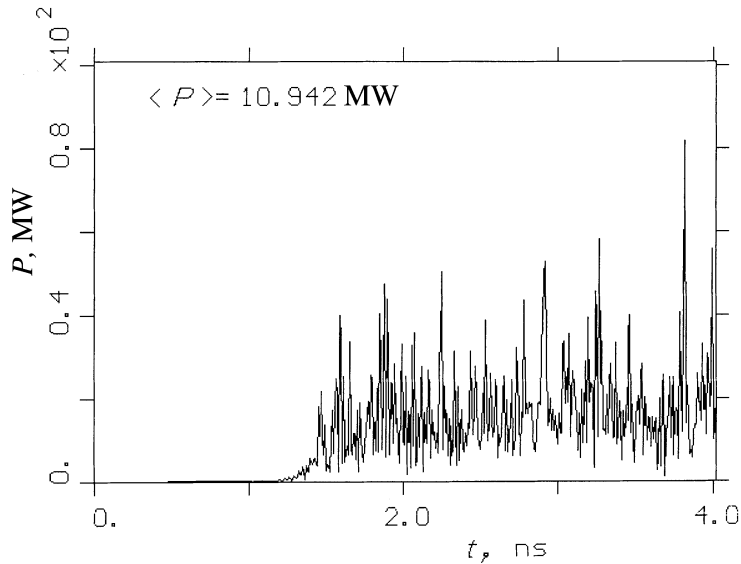


Рис. 2. Типичная расчетная "осциллограмма" мощности генерации виркатора.

Считалось, что на систему было наложено основное аксиальное магнитное поле величиной 5 kOe, спадающее до нуля вблизи выходного окна ($25 < z < 27$ cm) с тем, чтобы обеспечить выпадение пролетных электронов на стенки трубы дрейфа виркатора с целью замыкания обратного токопровода и предотвращения электрической зарядки и повреждения выходного окна. С помощью дополнительного соленоида или иных средств можно создать неоднородность магнитного поля в области взаимодействия между катодом и ВК. Была выбрана следующая структура неоднородного участка магнитного поля между катодом и ВК: считалось, что на оси системы между катодом и анодной сеткой поле изменяется линейно, а затем так же линейно возвращается к своему значению на ВК.

По заданной конфигурации магнитного поля на оси системы программа предварительно рассчитывала распределение магнитного поля вдоль всей системы путем численного решения уравнения $\text{div}\mathbf{H} = 0$. Геометрия силовых линий магнитного поля (для неоднородности с максимумом в качестве примера) также показана на рис. 1.

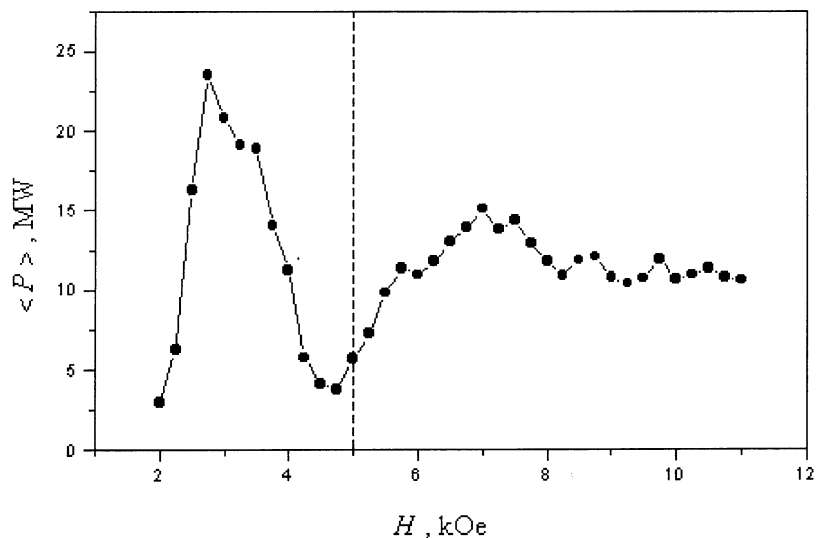


Рис. 3. Зависимость средней мощности СВЧ генерации виркатора от величины магнитного поля на анодной сетке (пунктиром выделена ситуация, когда магнитное поле в виркаторе однородно).

Считалось, что к катоду прикладывался прямоугольный импульс высокого напряжения амплитудой 200 kV, при этом с катода эмитировался ток величиной 15 kA,¹ что достаточно для формирования ВК.

Величина генерируемого СВЧ излучения отслеживалась в течение 4 ns путем вычисления потока вектора Пойнтинга в сечении, находящемся между окном вывода излучения и местом высыпания пролетных электронов на стенки трубы дрейфа (сечение $z = 29$ cm показано на рис. 1 пунктирной линией). Типичная расчетная "осциллограмма" мощности показана на рис. 2.

Расчеты генерации проводились при различных значениях величины магнитного поля на анодной сетке из диапазона 2–11 kOe. На рис. 3 показана полученная зависимость средней за 5 ns выходной мощности в

¹ В процессе эволюции системы величина катодного тока самосогласованным образом изменялась в зависимости от величины пространственного заряда в диодной области виркатора.

зависимости от величины магнитного поля на анодной сетке, из которой видно следующее.

Если неоднородность магнитного поля имеет минимум величиной 2–4 кОе, то мощность СВЧ генерации почти в 5 раз превышает мощность генерации обычного виркатора с однородным магнитным полем. Здесь действительно наблюдается уход мягких электронов на анодную трубу (режим редитрона с дискриминацией мягких электронов). Более того, было замечено, что быстрые электроны в неоднородном магнитном поле приобретают существенное поперечное вращательное движение, что способствует развитию генерации ТЕ-моды на гиротронном эффекте, подобно [12]. При еще большем снижении магнитного поля на аноде (0–2 кОе) уже все электроны покидают область взаимодействия, не пересекая анодную сетку, и СВЧ генерация тогда отсутствует.

Если же неоднородность магнитного поля имеет максимум величиной 6–8 кОе, то мощность СВЧ генерации почти в 3 раза превышает мощность генерации обычного виркатора с однородным магнитным полем. Здесь, как и ожидалось, сказывается лишь гиротронный эффект, а влияния ухода мягких электронов не наблюдается. При величине максимума магнитного поля, большем 8 кОе, ВК в системе не образуется и генератор работает чисто, как гиротрон, с мощностью, превышающей однородный виркатор примерно в 2 раза.

Таким образом, показано, что при наложении неоднородности магнитного поля на область взаимодействия повышается его мощности и КПД, причем это повышение имеет место при неоднородности как с минимумом, так и с максимумом.

Авторы благодарны В.П. Тараканову за помощь в использовании кода "КАРАТ", а также К.Г. Костову, обратившему наше внимание на возможность использования гиротронного эффекта в виркаторе.

Список литературы

- [1] *Castro C.* // Defence electronics. 1990. V. 22. N 2. P. 82.
- [2] *Bromborsky A., Agee F., Bollen M.* et al. // SPIE Microwave and Particle Sources and Propagation. 1988. V. 873. P. 51.
- [3] *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 4. С. 54.
- [4] *Селемир В.Д., Дубинов А.Е., Степанов Н.В.* и др. // Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ. Саров, 2000. № 1.

- [5] *Селемир В.Д., Дубинов А.Е., Степанов Н.В.* Редитрон. Патент РФ № 2044361, МКИ: H 01 J 25/68. Приоритет от 07.08.92. Опубл. БИ. № 26. 1995.
- [6] *Alyokhin B.V., Dubinov A.E., Selemir V.D. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. V. 22. N 5. P. 945.
- [7] *Селемир В.Д., Алехин Б.В., Ватрунин В.Е.* и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7–8. С. 689.
- [8] *Kwan T.J.T., Snell C.M.* Virtual cathode microwave generator having annular anode slit. US Patent 4730170, H 03 B 9/01, 31.03.87.
- [9] *Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Степанов Н.В.* // Фракталы в прикладной физике. Сб. науч. тр. / Под ред А.Е. Дубинова. Арзамас-16. 1995. С. 47.
- [10] *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 4. С. 41.
- [11] *Tarakanov V.P.* // User's manual for code Karat, Berkley Research Associate Inc. Springfield, VA, 1992.
- [12] *Kostov K.G., Yovchev I.G., Nikolov N.A.* // Electronics Letters. 1999. V. 35. N 19. P. 1647.