

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.

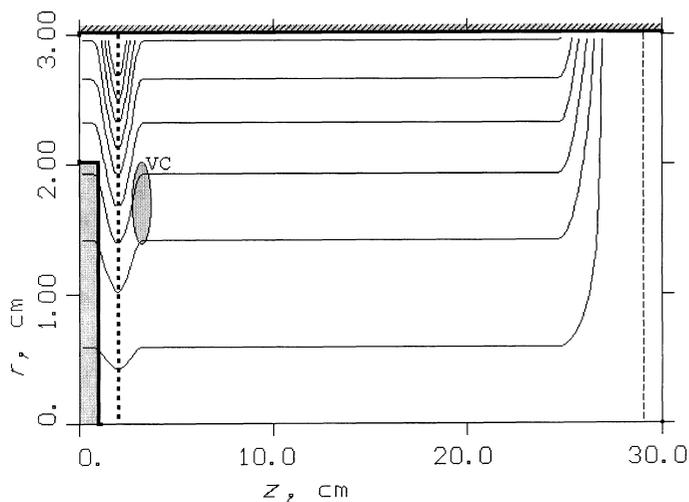
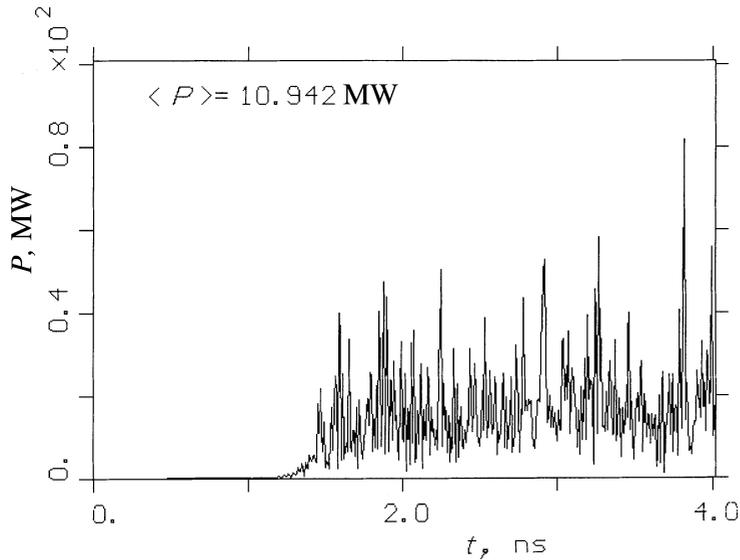


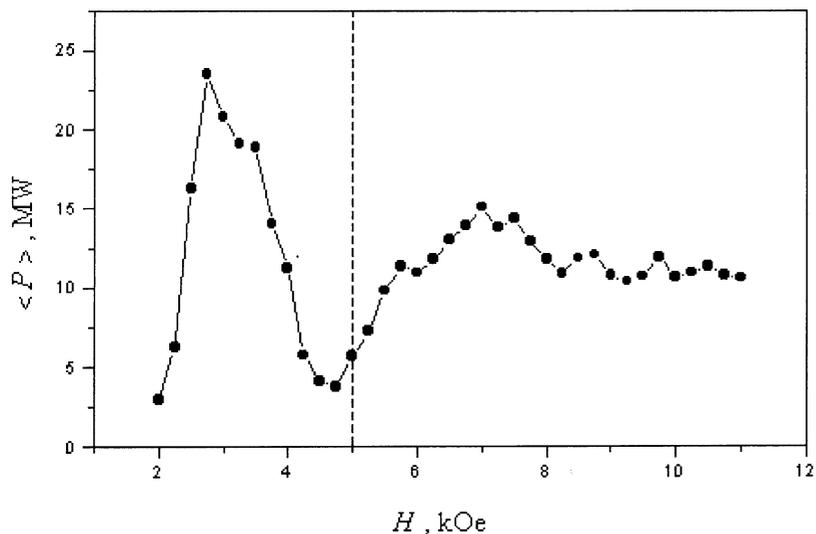
Рис. 1. Исследованная конфигурация виркатора.



**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 кВ, при этом с катода эмитировался ток величиной 15 кА,<sup>1</sup> 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  $z = 29$  см 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 кОе. На рис. 3 показана полученная зависимость средней за 5 ns выходной мощности в

<sup>1</sup> 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.