

УДК 538.562 + 621.385.6

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИРКАТОРА С ПЛАЗМЕННЫМ АНОДОМ

А. Е. Дубинов, В. Д. Селемир, А. В. Судовцов, В. И. Челпанов
Российский Федеральный Ядерный Центр — ВНИИ экспериментальной физики,
г. Саров, Россия

Приведены результаты компьютерного моделирования динамики электронов и положительных ионов в виркаторе с плазменным анодом. Для этого использовался 2,5-мерный PIC-код "Карат". Показано, что в рассматриваемом виркаторе возможна генерация СВЧ-излучения как и в обычном виркаторе с металлическим сетчатым (или фольговым) анодом. Установлено, что положительные ионы плазменного анода захватываются виртуальным катодом в коллективное движение вперед по оси виркатора. Вычислен закон этого движения.

Приборы с виртуальным катодом (так называемые виркаторы) уверенно входят в арсенал сверхмощных импульсных источников СВЧ-излучения на основе сильнооточных релятивистских электронных пучков [1, 2]. Их достоинства очевидны: простота конструкции; возможность работы без внешнего магнитного поля; управляемость внешним сигналом и по многим параметрам они практически не имеют конкуренции. Однако на пути дальнейшего увеличения энергосодержания в выводимом импульсе СВЧ-излучения возникает ряд технических проблем, как то: увеличение стойкости анодной сетки (или фольги) и уменьшение скорости переключения диодного промежутка плазмой. Кроме того, наблюдается стремление уменьшить рассеяние электронов анодной сеткой (фольгой). Все эти проблемы могли бы быть разрешены в бесфольговых виркаторах с магнитоизолированными диодами, в которых пучок движется вдоль оси длинной анодной трубы, а виртуальный катод образуется вблизи скачка диаметра этой трубы [3]. Но как указано в работе [1], отсутствие какого либо проводящего тела в центре потенциальной ямы, находящегося под потенциалом анода, приводит к снижению глубины этой ямы и, как следствие, к недобору пучком энергии ускорения. Кроме того, в бесфольговом виркаторе в электронном потоке устанавливается так называемое "сжатое состояние" с турбулентным электронным потоком по всей длине прибора [4], что отрицательно сказывается на КПД СВЧ-генерации. В бесфольговом виркаторе неэффективна и сама группировка электронов [5].

В связи с этим было предложено использовать вместо анодной сетки (фольги) тонкий плазменный лист, формируемый в виркаторе системой радиальных плазменных инжекторов [6]. Этот плазменный лист и является тем проводящим образованием, которое обеспечивает необходимую глубину потенциальной ямы. Особенно эффективным плазменный анод будет в виркаторах, реализованных на мощных машинах, где велика опасность разрушения обычного металлического анода под действием диодной плазмы.

При замене сетчатого или фольгового анода анодом в виде тонкого плазменного листа уменьшается скорость переключения взрывоэмиссионного диода плазмой факелов. Этот путь достаточно эффективен, так как, согласно закону Чайльда-Ленгмюра, положительные ионы катодного факела движутся в нулевом электрическом поле (чисто газодинамический разлет катодного факела), а положительные ионы анодного факела в диоде с анодной фольгой движутся в ускоряющем поле диода, усиленном пространственным зарядом (электродинами-

ческий разлет). Поэтому скорость движения анодного факела $v_{a.ф}$ существенно превышает скорость движения катодного факела $v_{к.ф}$. Следовательно, ликвидировав анодный факел путем замены металлического анода на плазменный анод, можно увеличить "время жизни" диода в $(v_{a.ф} + v_{к.ф}) / v_{к.ф}$ раз. На установке "Ковчег" [7] удалось повысить "время жизни" диода с 500 нс (металлический анод) до 3,5 мкс (анод в виде плазменного листа толщиной 3 см и концентрацией плазмы $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$) [8].

Вместе с тем заранее не ясно, возможен ли виркаторный режим генерации при замене металлического анода на плазменный, в чем его особенности и не подавляют ли его многочисленные плазменные неустойчивости.

Ответам на эти вопросы и посвящена настоящая работа. Для этого было проведено компьютерное моделирование виркатора с плазменным анодом. Использовался пакет прикладных программ на основе 2,5-мерного кода "Карат", созданного В. П. Таракановым и описанного в работе [9].

Геометрия моделируемой области с указанием необходимых размеров показана на рис. 1, она примерно соответствует виркатору с плазменным анодом, экспериментальное исследование которого начато на установке "Ковчег".

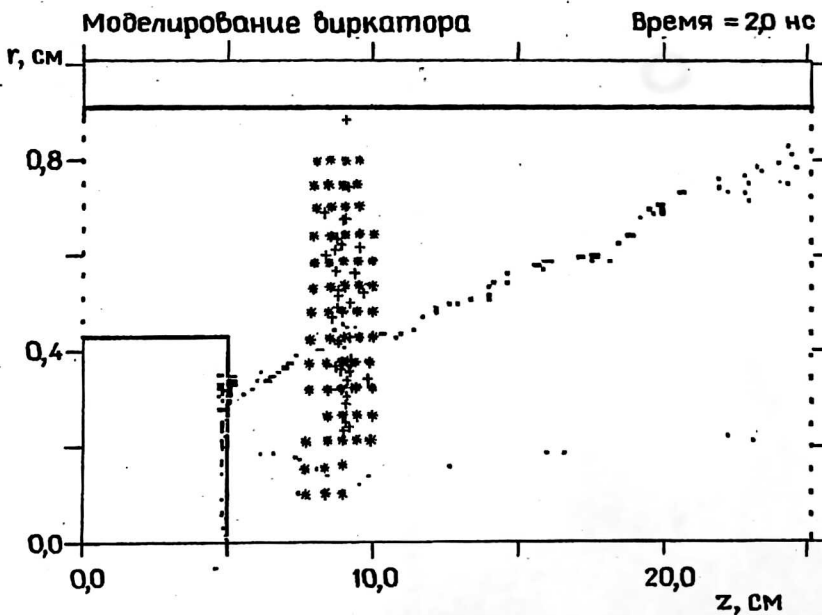


Рис. 1. Геометрия моделируемой области:

- — электроны пучка;
- + — электроны плазмы;
- * — ионы плазмы

Концентрация плазмы задавалась $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$, масса ионов соответствовала ионам углерода. Считалось, что к диодному промежутку прикладывалось напряжение 300 кВ с фронтом в виде ступеньки. При этом ток в диоде составлял 35 кА.

Эволюция фазового портрета всех частиц показана на рис. 2, 3, из которых следует, что за слоем плазмы в системе формируется виртуальный катод, колебания которого могут являться источником мощного СВЧ-излучения. Пролетный ток при этом имеет осциллирующую компоненту (рис. 4).

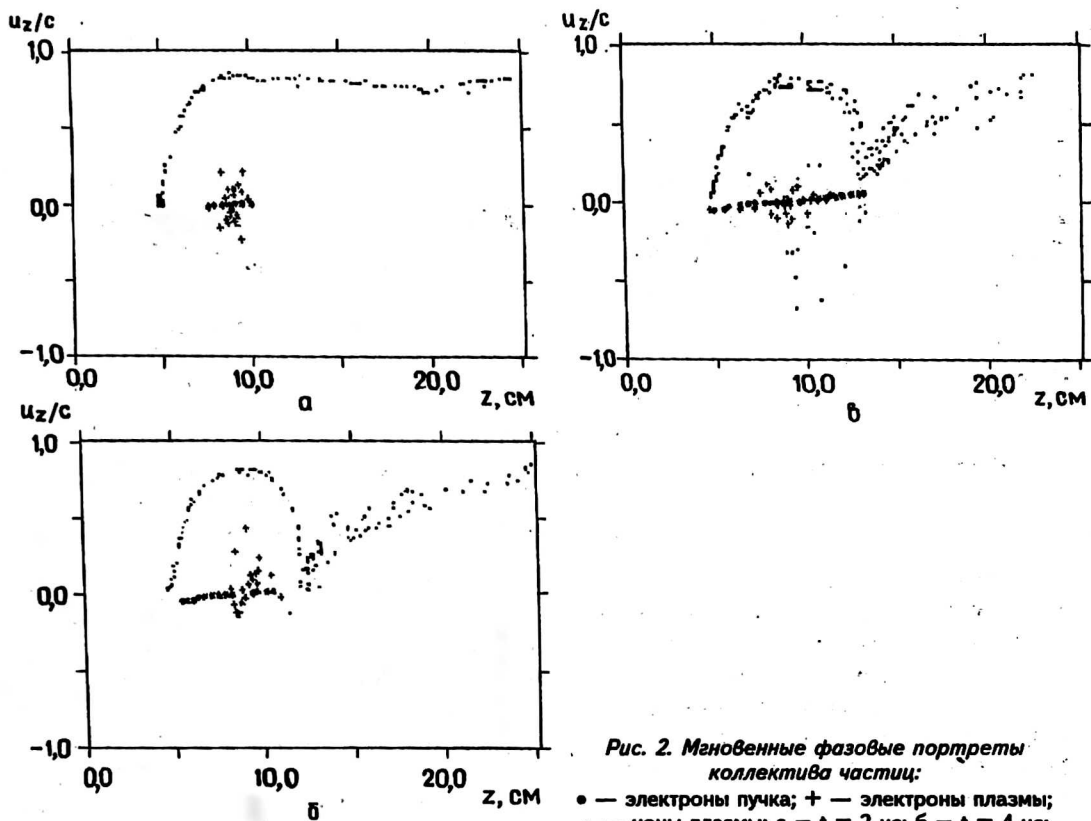


Рис. 2. Мгновенные фазовые портреты коллектива частиц:

• — электроны пучки; + — электроны плазмы;
 * — ионы плазмы; а — $t = 2$ нс; б — $t = 4$ нс;
 в — $t = 6$ нс

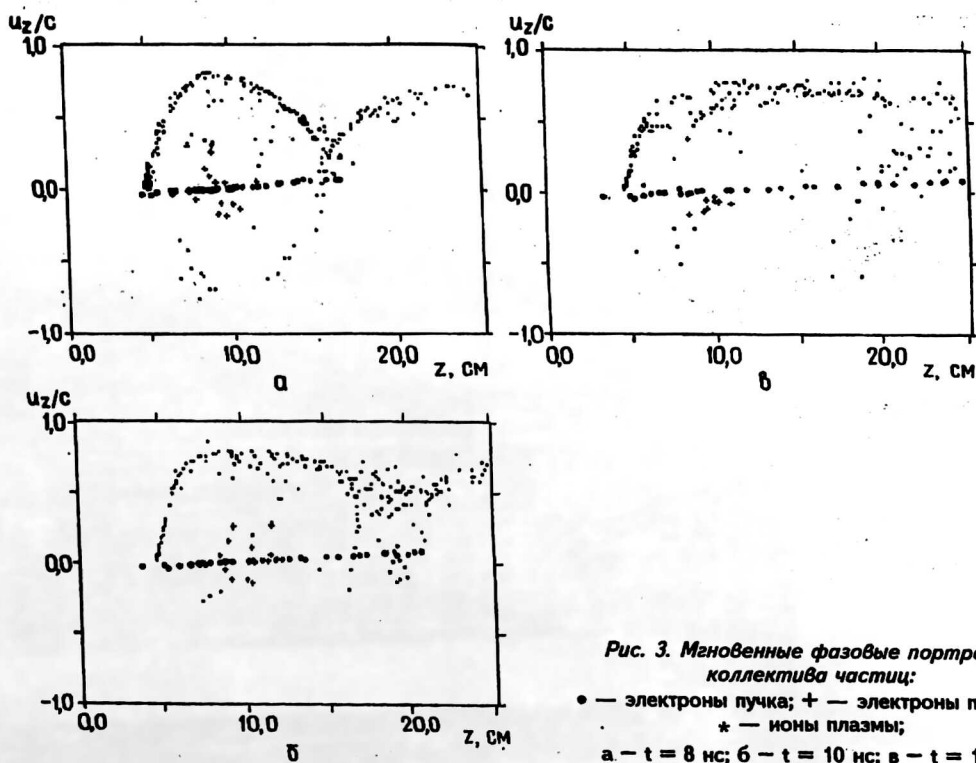


Рис. 3. Мгновенные фазовые портреты коллектива частиц:

• — электроны пучки; + — электроны плазмы;
 * — ионы плазмы;
 а — $t = 8$ нс; б — $t = 10$ нс; в — $t = 12$ нс

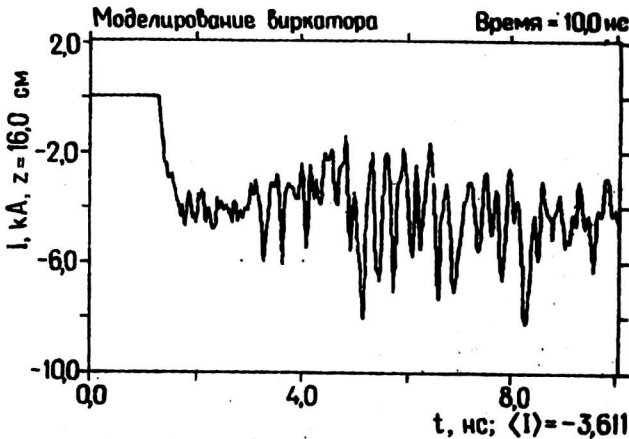


Рис. 4. Расчетная "осциллограмма" пролетного тока

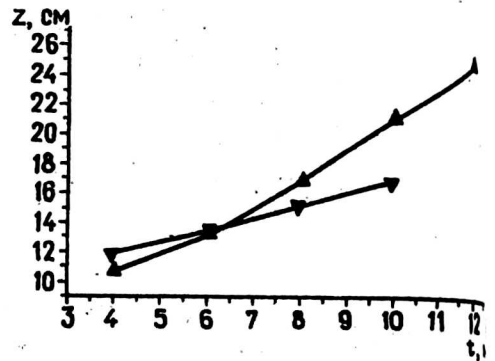


Рис. 5. Графики законов движения:

- ▼ — виртуального катода;
- ▲ — фронта ионного пучка

Вместе с тем любопытна динамика ионной компоненты плазмы: часть ионов захватывается виртуальным катодом в совместное движение. Анализ рис. 2 и 3 позволяет определить закон движения виртуального катода, как целого, и вместе с ним закон движения фронта захватываемого в движение ионного пучка. График, иллюстрирующий законы движения виртуального катода и фронта ионного пучка, показан на рис. 5. Видно, что оба движения происходят приблизительно равномерно, однако фронт ионного пучка обгоняет виртуальный катод. Сходный результат получен в работе [10] на одномерной численной модели инжекции электронов со сверхпредельным током в газ умеренной плотности. Анализ эволюции пространственного распределения ионов свидетельствует об эффективной фокусировке захваченного ионного пучка (рис. 6, 7).

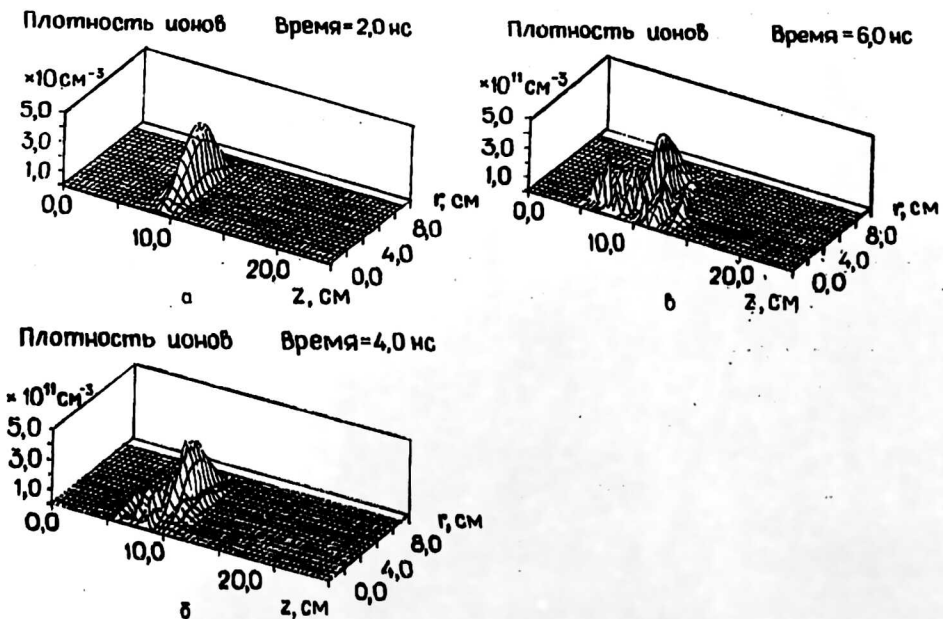


Рис. 6. Мгновенные пространственные распределения ионов:
а — $t = 2$ нс; б — $t = 4$ нс; в — $t = 6$ нс

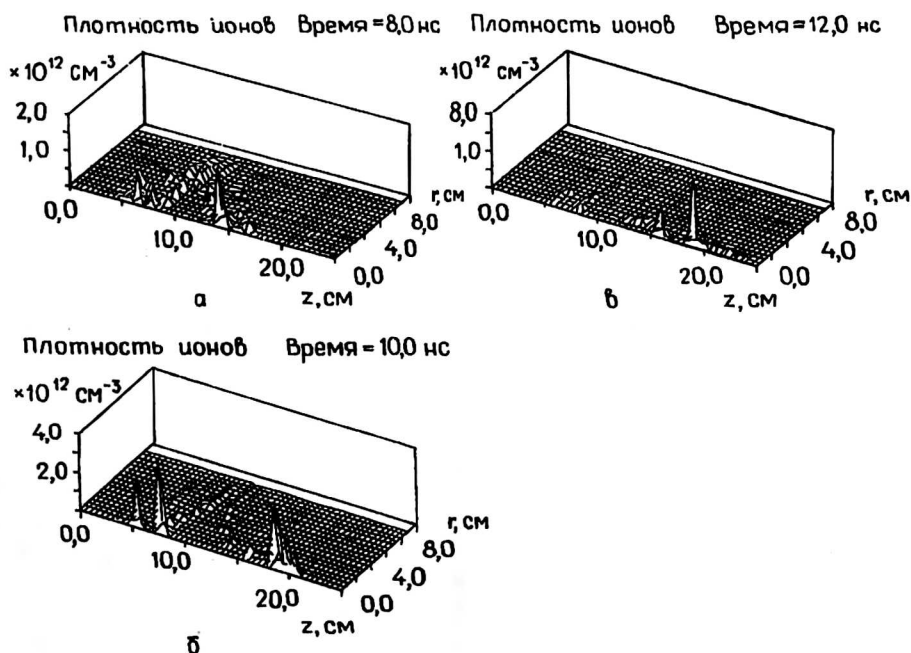


Рис. 7. Мгновенные пространственные распределения ионов:
а - $t = 8$ нс; б - $t = 10$ нс; в - $t = 12$ нс

Таким образом, результаты моделирования системы типа виркатор с плазменным анодом говорят о возможности ее использования как для генерации мощных импульсов СВЧ-излучения, так и для коллективного ускорения положительных ионов.

Литература

1. Дубинов А. Е., Селемир В. Д. // Зарубежная радиоэлектроника. 1995, № 4. С. 54.
2. Alyokhin B. V., Dubinov A. E., Selemir V. D. et al. // IEEE Trans. Plasma Sc., 1994. V. 22. № 5. P. 945.
3. Жерлицына А. Г., Кузнецов С. И., Мельников Г. В., Фоменко Г. П. // ЖТФ, 1986. Т. 56. № 7. С. 1384.
4. Ignatov A. M., Tarakanov V. P. // Phys. Plasmas, 1994. V. 1. № 3. P. 741.
5. Григорьев В. Д., Дубинов А. Е. // Письма в ЖТФ, 1996. Т. 22. № 7. С. 70.
6. Бабкин А. Л., Дубинов А. Е., Корнилов В. Г. и др. // Пат. РФ 2046440 с приоритетом от 8.06.93; МКИ: H 01 J 25/00; Оpubл. БИ № 29, 1995.
7. Babkin A. L., Chelpanov V. I., Kornilov V. G. et al. // Digest of abstracts of 9th IEEE International Pulsed Power Conference, NM, USA, 1993. P. 111.
8. Babkin A. L., Chelpanov V. I., Dubinov A. E. et al. // Int. Symp. "BEAMS TECHNOLOGIES (BT'95)", Dubna, Febr. 28 - March 4, 1995. P. 8.
9. Tarakanov V. P. // User's manual for code Karat. Berkley Research Associate. Inc., Springfield, VA, 1992.
10. Ходатаев К. В., Шаханова Е. В. // Препринт Ин-та прикл. мат-ки, 1986. № 79.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 96-02-17047а.
Авторы благодарны А. А. Рухадзе и В. П. Тараканову за консультации по исследуемому вопросу.

RESULTS OF COMPUTER SIMULATION OF VIRCATOR WITH PLASMA ANODE

A. E. Dubinov, V. D. Selemir, A. V. Sudovtsov, V. I. Chelpanov

Russia Federal Nuclear Center — All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russia

The results of computer simulation of electron and positive ions dynamics in vircator with plasma anode are cited in the work. For this purpose 2,5-dimensional PIC-code "Karat" was used. It is shown, that in the considered vircator the generation of microwave radiation is possible as in ordinary vircator with metal grid (or foil) anode. It is determined, that positive ions of plasma anode are captured by virtual cathode to the collective motion along vircator axis. The law of this motion is calculated.