

09;10

## Об эффекте индукционного самоускорения сильноточного электронного пучка

© А.Е. Дубинов

Российский Федеральный ядерный центр — ВНИИ экспериментальной физики, Саров (Арзамас-16)

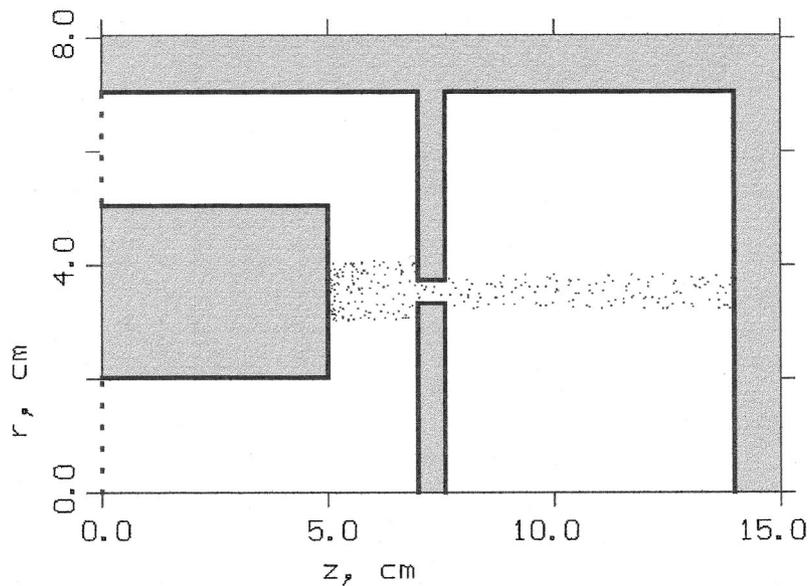
Поступило в Редакцию 21 июля 1998 г.

При помощи компьютерного моделирования методом крупных частиц подтверждена возможность предсказанного Г.А. Аскарьяном эффекта индукционного самоускорения сильноточного релятивистского электронного пучка при пропуске его через толстую диафрагму с отверстием.

Почти сорок лет назад Г.А. Аскарьяном была высказана идея о возможности существования эффекта индукционного самоускорения сильноточного релятивистского электронного пучка, когда ббольшая его часть изымается из движения или тормозится [1]. Одним из способов реализации такого самоускорения, согласно его предложению [2], может являться сброс тока на толстую диафрагму с небольшим отверстием при поглощении ббольшей его части.

Несмотря на простоту реализации и существенную величину эффекта, возможность осуществления этого способа ускорения, насколько нам известно на практике не проверялась. Исключение составляет экспериментальная работа [3], в которой роль диафрагмы с кольцевым отверстием играл виртуальный катод. В этой работе действительно наблюдались более энергичные по сравнению с приложенным напряжением электроны в пространстве дрейфа за виртуальным катодом, и авторы [3] связали это доускорение с эффектом, предсказанным в [1,2].

Однако причина появления ускоренных электронов в пространстве дрейфа за виртуальным катодом может быть иная: виртуальный катод является источником сильного кулоновского поля, отталкивающего пролетные электроны, которые, кроме того, находятся в ускоряющей фазе мощного СВЧ излучения, генерируемого осцилляциями виртуального



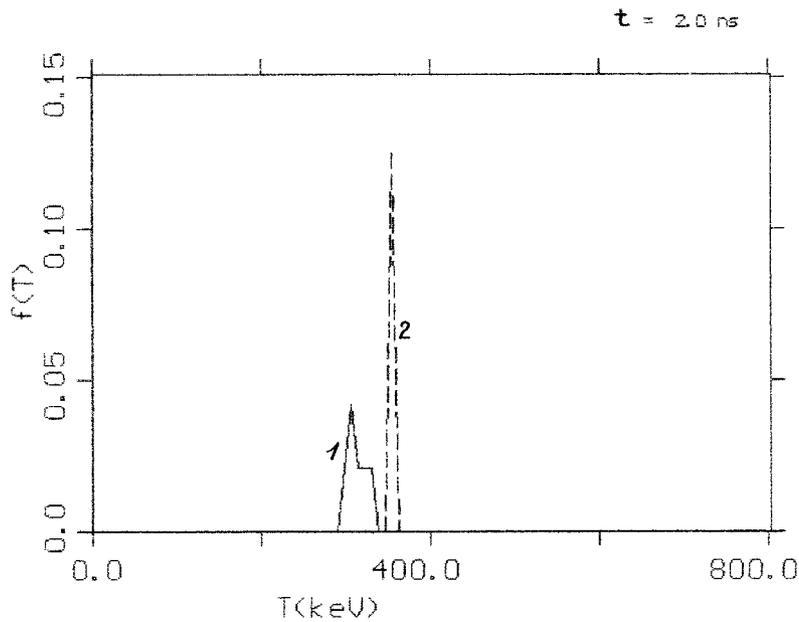
**Рис. 1.** Геометрия моделируемой области в координатах  $(r, z)$  (показана верхняя половина).

катода [4]. Поэтому нет оснований утверждать, что в [3] подтверждена идея работ [1,2].

В связи с этим целью данной работы является проверка возможности существования эффекта индукционного самоускорения электронного пучка при его сбросе на толстую диафрагму с небольшим отверстием, как это и было предложено в [2].

Для этого было проведено компьютерное моделирование динамики сброса сильнооточного релятивистского электронного пучка на толстую диафрагму с отверстием. Для моделирования был выбран полностью самосогласованный 2.5-мерный электромагнитный PIC-код "КАРАТ", разработанный В.П. Таракановым [5].

Геометрия области моделирования с указанием необходимых размеров и пропорций показана на рис. 1. Моделируемая конструкция представляла собой сильнооточный вакуумный электронный диод



**Рис. 2.** Энергетические распределения электронов пучка: 1 — перед диафрагмой, 2 — за диафрагмой.

с кольцевым катодом и толстой диафрагмой с тонким кольцевым отверстием, за которой размещалась область дрейфа. На всю область накладывалось сильное продольное магнитное поле величиной 50 kGs. Считалось, что к диоду прикладывался прямоугольный импульс высокого напряжения с амплитудой в режиме холостого хода 400 kV. Варьируемые параметры: ширина отверстия (1–5 mm), толщина трубки электронного пучка (6–10 mm), ток электронного пучка (4–8 kA). В расчетах контролировалась функция распределения электронов по энергиям по обе стороны от диафрагмы на расстоянии 1 mm от ее плоскостей.

Ниже в качестве примера приводятся результаты моделирования для ширины отверстия 3 mm, толщины трубки электронного пучка 8 mm и тока пучка 5 kA (рис. 2).

Так как в режиме электронного тока диодное напряжение несколько подсаживается по сравнению с режимом холостого хода, то при подлете к диафрагме энергия электронов заметно меньше 400 keV (составляет примерно 303 keV). Но пролетев вдоль отверстия, электроны уже обладают заметно большей энергией  $\sim 358$  keV.

Прирост энергии составил более 18%, однако это все же заметно меньше оценок, получаемых по соотношениям из [2]. Причина расхождения здесь может заключаться в том, что в нашем случае ускоряемая фракция электронного тока и фракция тока, поглощаемого диафрагмой, пространственно разнесены по радиусу, в то время как формулы из работы [2] относятся к случаю совмещения обеих фракций.

Для других значений варьируемых параметров прирост энергии электронов составлял от 3 до 24%. Таким образом, предсказанный в [1,2] эффект самоускорения электронов имеет место в моделируемой ситуации.

Однако ясно, что использование данного эффекта для ускорения электронов до больших энергий является проблематичным. Но ниже мы приведем два примера, в которых неучет эффекта индукционного ускорения может привести к рассогласованию точной настройки некоторых приборов.

Первый пример связан с корректным отбором пробы частиц пучка в энергоанализаторы различного типа. Так, например, в [6] предложен, а в работе [7] рассмотрен электронный спектрометр с тороидальным магнитостатическим полем, в котором ввод пучка из сильноточного диода в тороидальный соленоид производится как раз с помощью диафрагмы с малым отверстием. Поэтому во избежание существенных ошибок при восстановлении энергетического спектра в таких системах учет эффекта индукционного самоускорения представляется принципиальным.

Второй пример касается формирования тонких электронных пучков в мазерах на циклотронном резонансе. Например, в работе [8] описан такой генератор, в котором пучок формируется путем его вырезания из более сильноточного, генерируемого взрывоэмиссионным катодом. Здесь учет эффекта самоускорения необходим для наиболее точного согласования электронов с электродинамической структурой мазера.

## Список литературы

- [1] Аскаръян Г.А. // Атомная энергия. 1959. Т. 6. № 6. С. 658.
- [2] Аскаръян Г.А. // Труды ФИАН. 1973. Т. 66. С. 66.
- [3] Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Усов Ю.П., Фоменко Г.П. // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. № 7. С. 381.
- [4] Alyokhin B.V., Dubinov A.E., Selemir V.D. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. V. 22. N 5. P. 945.
- [5] Tarakanov V.P. // User's manual for code Karat. Berkley Research Associate Inc. Springfield, VA, 1992.
- [6] Минашкин Н.В., Селемир В.Д., Степанов Н.В. // А. с. № 1681658. 16.06.89. МКИ: G 01 t 1/29, опубл. БИ № 27. 1992.
- [7] Dubinov A.E., Minashkin N.V., Selemir V.D. et al. // Proc. of 9th IEEE Internat. Pulsed Power Conf. Albuquerque, NM, 1993. P. 708.
- [8] Братман В.Л., Самсонов С.В. // Физика микроволн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1996. Т. 1. С. 14.