

12;13.4

Особенности азимутальной транспортировки сильнооточного электронного пучка в криволинейной полости с поперечным магнитным полем

© А.Е. Дубинов^{1,2}, В.П. Тараканов^{3,4}¹ Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия² Саровский физико-технический институт, Саров, Нижегородская обл., Россия³ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия⁴ Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

E-mail: dubinov-ae@yandex.ru

Поступило в Редакцию 17 июня 2019 г.

В окончательной редакции 17 июня 2019 г.

Принято к публикации 3 июля 2019 г.

С помощью PIC-моделирования исследованы особенности азимутальной транспортировки сильнооточного электронного пучка в криволинейной эквипотенциальной полости с поперечным магнитным полем. Найдено, что при токах пучка, превышающих некоторое предельное значение, в пучке появляются электроны с отрицательным азимутальным импульсом.

Ключевые слова: сильнооточный электронный пучок, криволинейная полость, поперечное магнитное поле, азимутальная транспортировка, PIC-моделирование.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.20.48390.17931

Известно, что если сильнооточный электронный пучок (СЭП) транспортировать через замкнутую эквипотенциальную полость и ток пучка при этом превышает значение предельного вакуумного тока, то в полости возникает так называемый виртуальный катод (ВК), ограничивающий полное прохождение пучка [1].

Значение предельного вакуумного тока зависит от энергии электронов в пучке, геометрических параметров пучка, а также от формы и размеров полости. Особенности прохождения СЭП в полостях в форме цилиндрических и коаксиальных эквипотенциальных прямолинейных труб с продольным магнитным полем и значения предельных токов подробно исследованы [2–5]. Но особенности транспортировки СЭП в полостях криволинейной формы с поперечным магнитным полем изучены в меньшей степени. Вместе с тем криволинейные каналы (полости) с поперечным магнитным полем могут использоваться в ускорительной технике, в частности в предложенных в [6] сильнооточных микротронах с ВК, а также в ускорителях-рециркуляторах типа родотрон, риджтрон, фентрон и др. [7].

В настоящей работе с помощью PIC-моделирования исследованы особенности азимутальной транспортировки СЭП в криволинейной эквипотенциальной полости с поперечным магнитным полем. Для этого проведено самосогласованное моделирование с помощью particle-in-cell-кода „КАРАТ“ [8].

„КАРАТ“ представляет собой электромагнитный код на базе PIC-метода. Он предназначен для решения нестационарных электродинамических задач, имеющих сложную геометрию и включающих динамику в общем

случае релятивистских частиц (электронов, ионов, нейтралов).

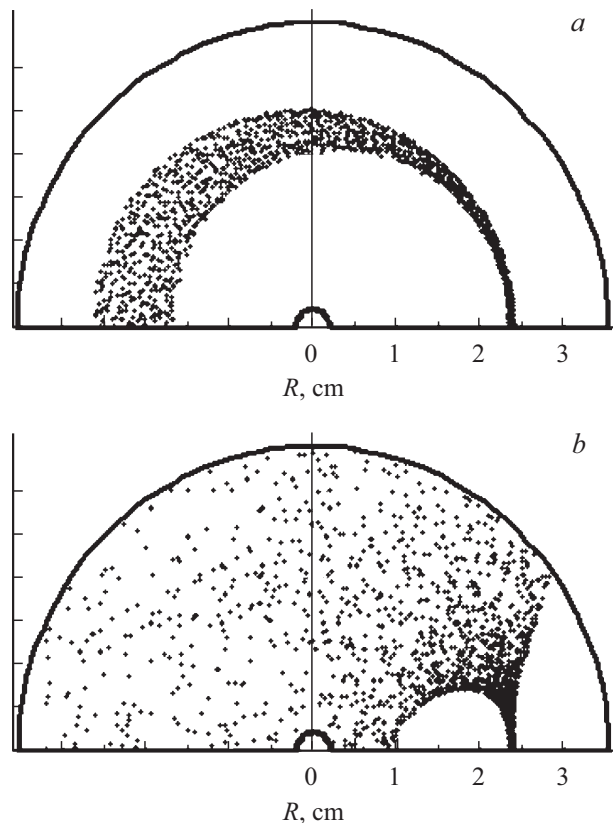


Рис. 1. Мгновенный конфигурационный портрет СЭП в криволинейной полости с поперечным магнитным полем: *a* — при плотности тока 1 А/см, *b* — при плотности тока 7 А/см.

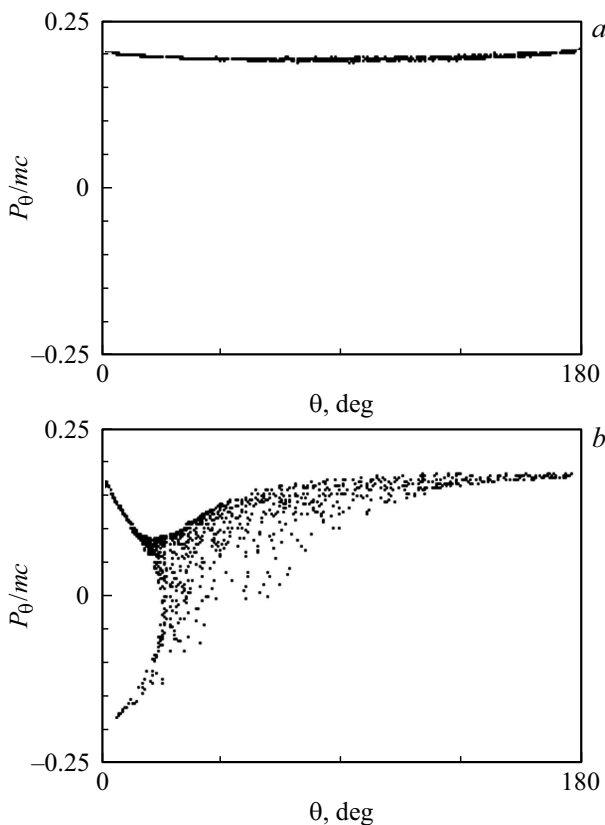


Рис. 2. Мгновенный фазовый портрет СЭП в криволинейной полости с поперечным магнитным полем: *a* — при плотности тока 1 А/см, *b* — при плотности тока 7 А/см.

Для решения уравнений Максвелла применяется разностная схема с перешагиванием на прямоугольных сетках со сдвигом. Конкретная реализация схемы, примененная в коде, обладает свойством точного описания граничных условий на заданных поверхностях расчетной области.

В полярных координатах задавалась геометрия поперечника эквипотенциальной полости в форме полуцилиндра, имеющего внутренний радиус 0.2 см и внешний радиус 3.5 см. Вдоль оси цилиндра полость считалась неограниченной.

Задавалось, что на полость наложено однородное аксиальное магнитное поле величиной 150 Ое. Моноэнергетический электронный пучок с энергией электронов 10 keV инжектируется с небольшой части плоскости разреза полуцилиндра с постоянной по времени погонной плотностью тока. Под действием магнитного поля при малой величине плотности тока 1 А/см электроны пучка совершают обычное циклотронное азимутальное движение и поглощаются на другой части плоскости разреза (на рис. 1, *a* движение против часовой стрелки). При этом СЭП расширяется в радиальном направлении.

Совсем по-другому распространяется СЭП с большим значением тока, когда влияние его собственного пространственного заряда становится существенным (например, при плотности тока 7 А/см, рис. 1, *b*). Так, элект-

троны, поступившие в полость, своим пространственным зарядом препятствуют дальнейшей инжекции последующих электронов и снижают их кинетическую энергию и азимутальный импульс. В итоге ларморовский радиус электронов уменьшается. При достаточном уменьшении ларморовского радиуса электроны могут осаждаться на внутреннюю боковую стенку полости.

Уменьшение азимутального импульса электронов P_θ удобно рассматривать на фазовой плоскости $P_\theta(\theta)$ (рис. 2). При малом значении тока пучка 1 А/см уменьшение P_θ незначительно (рис. 2, *a*). При большем значении плотности тока (7 А/см) фазовый портрет пучка существенно иной (рис. 2, *b*): он соответствует развороту электронов в азимутальном направлении. Любопытно, что подобный фазовый портрет напоминает фазовый портрет СЭП с ВК в прямолинейной полости [3,6,9].

Известно, что вблизи ВК некоторые электроны не замедляются, а, наоборот, набирают энергию [9]. Их ларморовский радиус растет, и они осаждаются на внешнюю боковую стенку полости. Такие электроны заметны и на рис. 1, *b*, 2, *b*.

Появление электронов с отрицательным азимутальным импульсом носит пороговый характер по плотности тока. Для данной задачи было найдено, что пороговое значение плотности тока, при котором появляются электроны с отрицательным азимутальным импульсом, составляет примерно 4.9 А/см.

Таким образом, в работе исследовалась азимутальная транспортировка СЭП в криволинейной эквипотенциальной полости с поперечным магнитным полем. Было найдено, что при токах пучка, превышающих некоторое предельное значение, в пучке появляются электроны с отрицательным азимутальным импульсом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. // УФН. 1971. Т. 103. № 4. С. 609–640.
- [2] Альтеркоп Б.А., Сокулин А.Ю., Тараканов В.П. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. № 8-9. С. 974–980.
- [3] Дубинов А.Е., Ефимова И.А. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 6. С. 80–86.
- [4] Донец Е.Д., Донец Е.Е., Сыресин Е.М., Дубинов А.Е., Макаров И.В., Садовой С.А., Сайков С.К., Тараканов В.П. // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 5. С. 103–110.
- [5] Yatsenko T., Sotnikov G.V., Portillo S., Pyenko K. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2019. V. 47. N 5. P. 2602–2608.
- [6] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 645–672.
- [7] Дубинов А.Е., Очкина Е.И. // Физика элементар. частиц и атом. ядра. 2018. Т. 49. В. 3. С. 776–815.
- [8] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA: Berkley Research Associates, 1992. 137 p.
- [9] Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П. // Физика элементар. частиц и атом. ядра. 2004. Т. 35. В. 2. С. 462–518.