

ЛИНЕЙНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ИОНОВ С ФОКУСИРОВКОЙ УСКОРЯЮЩИМ ПОЛЕМ

В.К. Баев, Н.М. Гаврилов

*Московский инженерно-физический институт
115409, Москва, Каширское шоссе, 31, Россия*

В рамках краткого обзора приведены основные результаты, полученные в Московском инженерно-физическом институте при разработке, проектировании и запуске ускорителей с фокусировкой аксиально-симметричным ускоряющим полем.

Приблизительно со второй половины 60-х годов в ускорительной технике начало развиваться новое направление, которое сформировалось в связи с решением проблемы создания линейных резонансных ускорителей с фокусировкой ускоряющим полем.

Собственно сама проблема была поставлена гораздо раньше в работах Владимирского [1], Гуда [2], Ткалича [3] и Файнберга [4]. Ими же были намечены пути ее решения, которые, однако, не позволяли создать эффективные ускоряющие системы. Позднее, благодаря усилиям Капчинского, Кушина и Теплякова [5-9] были найдены представляющие практический интерес решения задачи ускорения без внешних фокусирующих полей. Речь идет об ускорителях с ВЧ квадрупольной фокусировкой и асимметричной фазопеременной фокусировкой (АФПФ). Первые имеют две разновидности: ускорители с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) и ускорители с пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой (ППКФ), в основу которой положен так называемый "двойной зазор". Что касается ускорителей с фазопеременной фокусировкой (ФПФ) или, как ее еще называют, переменнo-фазовой фокусировкой, то они являются представителями гораздо более многочисленного семейства ускорителей с фокусировкой ускоряющим полем, о которых речь пойдет ниже.

К настоящему времени распространение получили только ускорители с ПОКФ. Общее количество реализованных или реализуемых проектов этих машин в различных ускорительных лабораториях мира уже исчисляется десятками. Менее повезло ускорителю с ППКФ. Несмотря на его исключительную технологичность (по сравнению, например, с резонатором Альвареца), этот ускоритель не получил никакого распространения. Известны только две действующие модели: опытная, на энергию протонов 3,26 МэВ, запущенная в 1973 г. [10], и протонный инжектор на 30 МэВ, получивший название "Урал-30" и запущенный в 1981 г. [11]. Обе модели были построены в ИФВЭ (г. Протвино). Такая участь ускорителя с ППКФ, по всей видимости, объясняется чрезвычайной сложностью его расчета и настройки, отпугивающей специалистов из других лабораторий.

Ускорителям с ПОКФ посвящено достаточно большое количество публикаций, а принцип их ра-

боты и основы теории изложены, например, в монографии [12]. Поэтому перейдем ко второй группе ускорителей, которые, следуя предложению, сделанному в работе [13], будем называть ускорителями с аксиально-симметричным ускоряющим полем (ФАСУП). Хотя по началу интерес к этим ускорителям проявляли как отечественные, так и зарубежные лаборатории [14-19], однако, ускорители с ПОКФ довольно быстро их вытеснили и сегодня в основном ими занимаются в ИТЭФ, МИФИ и ХФТИ. Тем не менее, можно утверждать, что время ускорителей с ФАСУП еще впереди и забыты они незаслуженно. Эти машины благодаря своей простоте, технологичности, компактности и надежности должны найти широкое применение для решения научных и прикладных задач, в которых не требуются большие токи ускоренных пучков, а таких задач множество в физике твердого тела, микроэлектронике, материаловедении, химии, биологии, медицине, (см. например, монографию [20]).

Для обсуждения отдельных разновидностей ускорителей с ФАСУП воспользуемся их классификацией, предложенной в работах [13,21,22]. В ее основу положены значения параметра $K = \beta_{\phi} / \beta_{\omega}$, где β_{ϕ} , β_{ω} – относительные скорости ускоряющей и фокусирующей гармоник соответственно. Рассмотрим сначала ускорители с $K < 1$. За нижнюю границу значения K можно взять число 1/3, соответствующее ускорителю с автофокусировкой [23], в котором ускоряющей и фокусирующей являются первая и третья гармоники соответственно. Эта разновидность ускорителя не получила распространения из-за низкой эффективности.

Значения параметра K , лежащие в интервале $1/2 < K < 1$, соответствуют сложным периодам ФПФ с числом ускоряющих зазоров больше двух. Долгое время ФПФ представляла чисто академический интерес из-за низкой эффективности. Существенного улучшения свойств ФПФ удалось добиться за счет ее модификаций, одна из которых получила название асимметричной фазопеременной фокусировки (АФПФ) [9,24], а другая – модифицированной переменнo-фазовой фокусировки (МПФФ) [25,26]. Суть обеих этих модификаций сводится к изменению по определенному закону равновесной

фазы вдоль ускоряющих периодов. При этом коэффициент захвата в режим ускорения имеет величину, близкую к амплитуде модуляции равновесной фазы $60..90^\circ$, а темп ускорения может быть доведен до $4..5 \text{ МэВ/м}$ [24].

При $K = 1$ уравнения двухволнового приближения переходят в обычные уравнения, описывающие движения заряда в поле ускоряющей гармоники.

Перейдем к ускорителям, у которых $K > 1$. Интересен вариант с $K = 2$. Если углы пролета соседних ячеек сделать равными π и 3π , то фаза пролета центров зазоров остается постоянной. В этом варианте чередование длинных и коротких трубок дрейфа необходимо не для переброса фазы, а для получения второй ускоряющей гармоники, т.е. это не будет ускоритель с ФПФ.

Очень интересным является ускоритель с $K = 3$. Поскольку в процессе ускорения и фокусировки участвуют лишь нечетные гармоники (третья и первая соответственно), отпадает необходимость в чередовании длинных и коротких трубок дрейфа. Фаза пролета равновесной частицы центров ускоряющих зазоров сохраняет постоянное значение в силу симметрии периода фокусировки, причем может оставаться постоянной и амплитуда ускоряющего поля в зазорах, так что этот вариант не содержит никаких признаков ФПФ. Следуя предложению авторов работы [22], будем называть эту разновидность ФА-СУП фокусировкой полем быстрой волны (ФПБВ). Ускоритель с ФПБВ может иметь сложные периоды фокусировки с большим числом зазоров и с изменяющимся пролетным углом и амплитудой ускоряющего поля. Этим вариантам соответствуют значения параметра K из интервала $1 < K < 3$. Важное достоинство ускорителя с ФПБВ, помимо простоты конструкции – это низкая энергия инжекции. Ускорение на третьей гармонике позволяет в три раза снизить начальную скорость ионов и существенно расширить возможности данного частотного диапазона. Так, в двухметровом диапазоне длин волн в ускорителе с ФПБВ можно ускорять сразу после инжектора с напряжением 150 кВ довольно большой набор ионов с отношением заряда к массе вплоть до $1/12$.

Упомянем еще о трех разновидностях ускорителей с ФАСУП. В одной из них эффект фокусировки достигается увеличением амплитуды ускоряющего поля [27], в другой – фокусирующим действием поля ускоряющей волны при влете в нее заряда [28] и в третьей – пространственной гармоникой специально сконструированной ускоряющей системой [29].

Главным итогом работ по ускорителям с ФА-СУП, выполненных в МИФИ, можно считать запуск таких ускорителей, среди которых особенно удачной оказалась модель, построенная на базе так называемого двухпроводного резонатора [30,31]. Этот резонатор выгодно отличается своими электродинамическими характеристиками, простотой конструкции и ее технологичностью, компактностью и надежностью. Поскольку рабочей волной резонатора служит

T -волна, то он может сохранять небольшие поперечные размеры при переходе от протонов к более тяжелым ионам. В частности, резонатор упомянутого выше ускорителя протонов на энергию 1,2 МэВ имеет длину 0,74 м и диаметр 0,2 м при собственной добротности 3600 и шунтовом сопротивлении 66 МОм/м.

В заключение отметим те работы, которые с точки зрения авторов, намечают наиболее перспективные направления развития обсуждаемых ускорителей. Впервые, применительно к ускорителям с ФАСУП, была рассмотрена задача динамического согласования пучка с каналом ускоряющей системы [32,33]. В качестве согласующего устройства использовались первые ячейки ускоряющей системы. Показано, что динамическое согласование позволяет увеличить коэффициент захвата частиц в режим ускорения в 2-3 раза по сравнению с его обычным значением и довести его до 200° и более с сохранением приемлемого поперечного акцептанса.

Очень важными представляются результаты [34,35], из которых следует, что ускоритель с ФА-СУП с обычным (не из сверхпроводника) резонатором может быть переведен на непрерывный режим работы, а это означает увеличение среднего тока пучка на несколько порядков. Переход к такому режиму оказывается возможным по нескольким причинам: во-первых, как показывают расчеты, при весьма существенном снижении напряженности ускоряющего поля удастся сохранить приемлемыми темп ускорения и акцептансы; во-вторых, появились высокоэффективные ускоряющие системы (тот же упомянутый выше двухпроводный резонатор), и, наконец, в-третьих, качество ускоряющих систем можно значительно улучшить за счет высокого уровня технологии их изготовления.

В начале 60-х годов в МИФИ начались и затем в течение ряда лет систематически проводились работы по созданию многопучковых ускорителей и ускорителей с кольцевыми пучками [36-38]. Позже к этому направлению подключились другие ускорительные лаборатории в нашей стране и за рубежом [39-44], и даже были получены результаты по ускорению нескольких пучков в Брукхэвене на установке MEQALAC-1 [45].

ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Владимирский // *ПТЭ*. 1956, №3, с.35.
2. M.L. Good // *Bull. Amer. Phys. Soc.* 1952, v.27, p.16.
3. В.С. Ткалич // *ЖЭТФ*. 1957, т.32, с.625.
4. Я.Б. Файнберг // *ЖТФ*. 1959, т.29, с.568.
5. В.А. Тепляков // *ПТЭ*. 1964, №6, с.24.
6. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков // *ПТЭ*. 1970, №2, с.119.
7. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков // *ПТЭ*. 1970, №4, с.17.
8. В.В. Кушин // *АЭ*. 1970, т.29, с.123.

9. И.М. Капчинский. *Линейный ускоритель ионов с высокочастотной жесткой фокусировкой*: Препринты ИФВЭ, ИНЖ – 72-29 (ч.1), ИНЖ – 72-30 (ч. II), Серпухов, 1972.
10. С.А. Ильевский, И.М. Капчинский, Г.Ф. Кузнецов и др. // *АЭ*. 1973, т.34, с.56.
11. А.А. Егоров, В.А. Зенин, С.А. Ильевский и др. // *ЖТФ*. 1981, т.51, с.1643.
12. И.М. Капчинский. *Теория линейных резонансных ускорителей*. М.: «Энергоиздат», 1982.
13. А.В. Шальнов, В.К. Баев, Н.М. Гаврилов // *ВАНТ. Сер. "Техника физического эксперимента"*. 1985, вып.2 (23).
14. В.В. Кушин, Б.Т. Зарубин, В.В. Свирич, И.М. Чистяков // *ПТЭ*. 1972, №6, с.15.
15. Н.А. Хижняк, С.С. Каплин, Н.Е. Ковпак и др. // *ВАНТ. Сер. "Линейные ускорители"*. 1977, вып.2 (5), с.12.
16. Н.М. Гаврилов, А.В. Шальнов // *Научн. конф. МИФИ*. М.: МИФИ, 1971, с.8.
17. D.A. Swenson // *Particle Accel.* 1976, v.7, p.61.
18. E.A. Knapp, D.A. Swenson // *Proc. Proton Linear Accelerator conf.*, Chalk River, Canada. 1976, v.2, p.230.
19. J.M. Potter, S.W. Williams, F.J. Humphry et al. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1979, v.26, p.3745.
20. Ю.С. Рябухин, А.В. Шальнов. *Ускоренные пучки и их применение*. М.: «Атомиздат». 1980.
21. В.К. Баев, Н.М. Гаврилов, С.А. Минаев, А.В. Шальнов // *ЖТФ*. 1983, т.53, с.1287.
22. В.К. Баев, Н.М. Гаврилов, С.А. Минаев, А.В. Шальнов // *ДАН СССР*. 1984, т.34, с.56.
23. А.Д. Власов. *Теория линейных ускорителей*. М.: «Атомиздат». 1965.
24. *Линейные ускорители ионов. т.1* / Под ред. Б.П. Мурина. М.: «Атомиздат». 1978.
25. В.Г. Папкович, Н.А. Хижняк, Н.Г. Шулика // *ВАНТ. Сер. "Техника физического эксперимента"*. 1978, вып.2, с.51.
26. А.С. Белей, С.С. Каплин, Н.А. Хижняк и др. // *УФЖ*. 1982, т.27, с.1132.
27. Д.Г. Зайдин, В.К. Карпасюк // *ЖТФ*. 1972, т.42, с.2427.
28. А.Д. Власов // *АЭ*. 1975, т.38, с.46.
29. Н.М. Гаврилов, В.П. Зубовский // *ЖТФ*. 1971, т.41, с.1012.
30. Н.И. Абраменко, А.Н. Антропов, В.К. Баев и др. // *ЖТФ*. 1983, т.53, с.858.
31. А.с. №586780. В.К. Баев, В.П. Зубовский // *Открытия. Изобретения*. 1982, №10, с.297.
32. А.с. №688088. В.К. Баев, Е.В. Громов, А.Д. Коляскин // *Открытия. Изобретения*. 1982, №15, с.315.
33. В.К. Баев, В.В. Рассадин. *Разработка, эксплуатация и применение линейных ускорителей*. М.: «Энергоиздат». 1984, с.17.
34. В.К. Баев, Н.М. Гаврилов, В.В. Рассадин // *Письма в ЖТФ*. 1984, т.10, с.222.
35. А.Н. Антропов, В.К. Баев, Н.М. Гаврилов и др. // *ВАНТ. Сер. "Техника физического эксперимента"*. 1985, в.3(24), с.35.
36. Н.М. Гаврилов, Р.К. Гаврилова, Е.В. Громов и др. // *Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*. Дубна. 1981, т.2, с.37.
37. В.К. Баев, В.А. Власов, Н.М. Гаврилов и др. // *Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*. Дубна. 1983, т.2, с.6.
38. В.А. Власов, Н.М. Гаврилов, Р.К. Гаврилова и др. // *ПТЭ*. 1985, №1, с.27.
39. В.В. Кушин, П.А. Федотов // *Письма в ЖТФ*. 1978, т.4, с.258.
40. В.В. Кушин, Б.П. Мурин, П.А. Федотов // *ПТЭ*. 1981, №2, с.25.
41. A.I. Balabin, G.N. Kropachev, I.O. Parshin, D.G. Skachkov // *Proc. of the 1993 Particle Accelerator Conference*. v.5, p.3675.
42. R.M. Mobley, I.I. Brodowski et al. // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1981, v.NS-28, '2, p.1500.
43. G. Gammel, I. Brodowski, J. Keane et al. // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1981, v.NS-28, №3, p.3482.
44. В.В. Васильев, В.П. Зубовский, В.В. Кушин и др. // *Научная сессия МИФИ – 2004*. М.: МИФИ. 2004, т.7, с.195.
45. T.P. Wangler // *High-Current, high-brightness and high-duty fact. ion injectors workshop*. Sun Diego, May, 21-28. New York. 1986.

LINEAR RESONANT ION ACCELERATORS WITH FOCUSING BY ACCELERATING FIELD

V.K. Baev, N.M. Gavrilov

In the framework of a brief review the main results obtained at Moscow Engineering Physics Institute are presented. They are dedicated to the development, design and starting into operation of accelerators with particle focusing by axially symmetric accelerating field.

ЛІНІЙНІ РЕЗОНАНСНІ ПРИСКОРЮВАЧІ ІОНІВ З ФОКУСУВАННЯМ ПРИСКОРЮЮЧИМ ПОЛЕМ

В.К. Баєв, М.М. Гаврилов

У рамках короткого огляду приведені основні результати, отримані в Московському інженерно-фізичному інституті при розробці, проектуванні і запуску прискорювачів з фокусуванням прискорюючим аксіально симетричним полем.