ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

УДК 621.384.6

КОМПАКТНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. С. Алимов, Б. С. Ишханов, В. И. Шведунов
(*НИИЯФ*)
E-mail: alimov@depni.sinp.msu.ru

Разработан и создан прототип промышленного компактного ускорителя электронов непрерывного действия на энергию 600 кэВ и максимальную мощность пучка 30 кВт, который может быть использован для реализации целого ряда радиационных технологий. Компактность, простота эксплуатации, надежность ускорителя, широкий диапазон регулирования основных параметров, возможность применения локальной защиты позволяют внедрять его в большинство радиационных технологических процессов.

Основные характеристики ускорителя

Уникальность и новизна созданного ускорителя заключаются в том, что он реализован по схеме СВЧ-ускорителя непрерывного действия с применением целого ряда нетрадиционных решений и методик, связанных прежде всего с системами инжекции и формирования электронных сгустков и системой СВЧ-питания.

Коэффициент захвата непрерывного пучка электронной пушки в режим ускорения линейным ускорителем со стоячей волной обычно не превышает 30–40%. Посредством оптимизации начальной части ускоряющей структуры нами получен коэффициент захвата пучка 50% [1–3].

В качестве энергии инжекции выбрана энергия 15 кэВ, совпадающая с напряжением питания клистрона 15 кВ, что дает возможность запитывать электронную пушку не от отдельного источника питания, а от источника питания клистрона [1].

Разработана оригинальная электронная пушка, показанная на рис. 1, на энергию 15 кэВ с двумя промежуточными анодами и регулировкой тока от 0 до 250 мА без существенных изменений оптических характеристик пучка [1, 3].

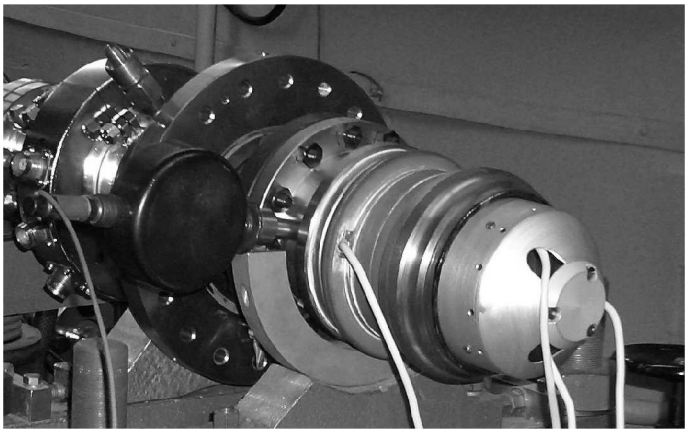

Рис. 1. Электронная пушка на испытательном стенде

Электронная пушка расположена непосредственно на входном фланце ускоряющей секции без пространства дрейфа и фокусирующих элементов. Ускоряющая секция, разработанная на основе бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи, состоит из 14 ячеек (группирователь и 13 ускоряющих ячеек) переменной длины с $\beta = v/c$ от 0.237 до 0.888. Трехмерная геометрия ускоряющей секции показана на рис. 2.

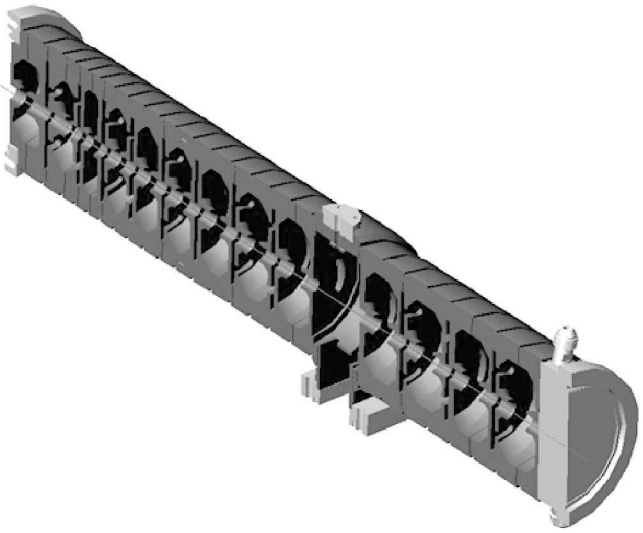

Рис. 2. Трехмерная геометрия ускоряющей секции (в разрезе)

В основу используемой системы высокочастотного питания заложен автоколебательный принцип работы клистрона с ускоряющей структурой в цепи обратной связи, позволяющий отказаться от зада-

ющего генератора и развязывающего циркулятора между клистроном и секцией. Система, состоящая из клистрона и ускоряющей секции, становится чрезвычайно компактной, а процедура ввода мощности и работа секции — максимально простыми и надежными [1, 4].

В результате проведенных работ на основе изложенных выше оригинальных принципов был создан прототип компактного промышленного линейного ускорителя электронов непрерывного действия (рис. 3) с параметрами, приведенными в табл. 1.

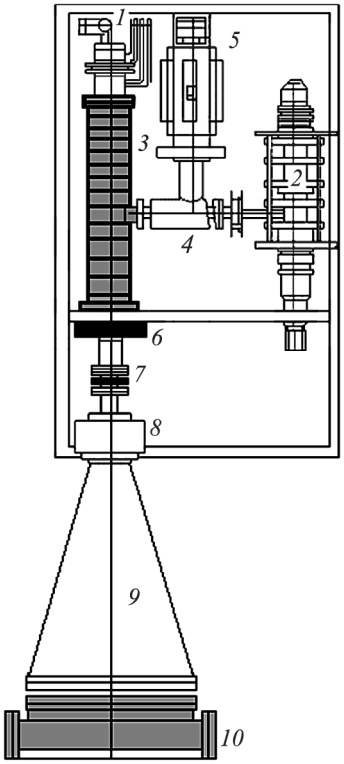

Рис. 3. Схема линейного ускорителя электронов

Таблица 1

Параметры ускорителя электронов непрерывного действия

Энергия пучка	600 кэВ
Средний ток пучка	0–50 мА
Максимальная средняя мощность пучка	30 кВт
Длина ускорителя (без вывода энергии)	0.8 м
Рабочая частота	2450 МГц
Мощность, потребляемая от сети	~ 75 кВт
Эффективность от розетки	~ 40%

В состав ускорителя входят электронная пушка (*1* на рис. 3), клистрон *2*, ускоряющая структура *3*, подводящий волновод *4* с вакуумным портом, через который производится высоковакуумная откачка магниторазрядным насосом *5*. Система вывода пучка включает фокусирующую линзу *6*, корректоры пучка *7*, сканирующие пучок по двум направлениям, магнит развертки пучка *8*, камеру развертки *9* и камеру облучения *10*. При первом запуске ускорителя для измерения тока и мощности пучка на выходе ускорителя использовался цилиндр Фарадея, рассчитанный на мощность пучка до 60 кВт.

Эксперименты по ускорению пучка

После сборки ускорителя-прототипа были проведены эксперименты по ускорению пучка с целью получения проектных значений среднего тока пучка $I_{\text{beam}} = 50$ мА, энергии пучка $W = 600$ кэВ, мощности пучка $P_{\text{beam}} = 30$ кВт при коэффициенте захвата $I_{\text{beam}}/I_{\text{gun}} - 50\%$. Результаты экспериментов в диапазоне токов пучка от 3.8 до 50 мА приведены в табл. 2. Ток пучка регулировался изменением тока накала электронной пушки. С ростом нагрузки током пучка энергия пучка увеличивалась и достигала максимума $W = 624$ кэВ при оптимальном токе $I_{\text{beam}} = 50.0$ мА и мощности пучка $P_{\text{beam}} = 31.2$ кВт. Оценки потерь пучка из измеренного баланса мощности при $I_{\text{gun}} = 98$ мА, $I_{\text{beam}} = 50$ мА показали, что потери тока пучка составили $I_{\text{loss}} = 48$ мА, мощность потерь $P_{\text{loss}} \approx 2$ кВт, что соответствует средней энергии потерь $\langle W_{\text{loss}} \rangle \approx 42$ кэВ.

Таблица 2

Результаты экспериментов по ускорению пучка

I_{gun}, мА	I_{beam}, мА	$I_{\text{beam}}/I_{\text{gun}}$, %	P_{beam}, кВт	W, кэВ
10	3.8	38.0	2.2	579
20	8.0	40.0	4.7	587
26	10.4	40.0	6.2	596
36	15.0	41.7	8.8	587
40	17.0	42.5	9.8	576
47	21.0	44.7	12.2	581
50	24.0	48.0	14.1	588
60	31.0	51.7	18.8	606
68	34.5	50.7	20.6	597
70	36.0	51.4	21.6	600
78	38.5	49.4	23.3	605
90	45.5	50.6	27.8	610
98	50.0	51.0	31.2	624

Средний ток пучка 50 мА является рекордным током для СВЧ-ускорителей. Несомненным достоинством созданного ускорителя является возможность регулировки выходного тока от десятков микроампер до 50 мА при сохранении энергии пучка в диапазоне 600 ± 30 кэВ, что позволяет в широком диапазоне варьировать дозовые режимы в процессе промышленного облучения.

Заключение

Созданный ускоритель занимает промежуточное место между высоковольтными ускорителями и импульсными резонаторными ускорителями. Средний

ток пучка 50 мА является рекордным током для многорезонаторных СВЧ-ускорителей непрерывного действия. Прямых аналогов данного ускорителя не существует.

Преимуществами ускорителя по сравнению с высоковольтными и импульсными резонаторными ускорителями являются:

– компактность;

– простота эксплуатации;

– возможность изменения параметров в процессе работы;

– возможность внедрения в существующие технологические линии.

Достоинством данного ускорителя является также модульный принцип его конструкции, который позволяет увеличивать энергию при сохранении среднего тока 50 мА за счет последовательного соединения идентичных ускоряющих модулей. Кроме того, компактность ускорителя допускает создание параллельной цепочки ускорителей для процессов, требующих большой (до 500 кВт) мощности пучка. Преимуществом такой цепочки перед отдельным ускорителем с большой мощностью пучка является возможность замены отдельного модуля без длительного прерывания технологического процесса.

Литература

1. *Alimov A.S., Ermakov D.I., Ishkhanov B.S.* et al. // Proc. of Particle accelerator conf. IEEE 2001. Piscataway, 2001. P. 2506.
2. *Alimov A.S., Ermakov D.I., Ishkhanov B.S.* et al. // Proc. of European particle accelerator conf. 2000. Vienna (Austria), 2000. P. 803.
3. *Alimov A.S., Ermakov D.I., Ishkhanov B.S.*et al. // Proc. of Particle accelerator conf. IEEE 1999. Piscataway, 1999. P. 2555.
4. *Alimov A.S., Chubarov O.V., Shvedunov V.I.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1997. **44**. P. 1033.

Поступила в редакцию
08.10.2007