

12;13

## **Формирование ускоренного электронного пучка с высоким коэффициентом захвата в ускоряющей структуре с параллельной связью**

© Ю.Д. Черноусов, И.В. Шеболаев, И.М. Икрянов

Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН,  
Новосибирск, Россия  
E-mail: chern@catalysis.ru

Поступило в Редакцию 11 октября 2016 г.  
В окончательной редакции 27 сентября 2017 г.

В линейном ускорителе электронов на базе ускоряющей структуры с параллельной связью, электронной пушки с СВЧ-управлением током инжекции и фокусирующей системы на постоянных магнитах получен электронный пучок с высоким — близким к 100% — коэффициентом захвата в режим ускорения. Захват обусловлен свойствами ускоряющей структуры, системой фокусировки пучка и системой инжекции. Представлены основные характеристики разработанных систем.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.02.45461.16520

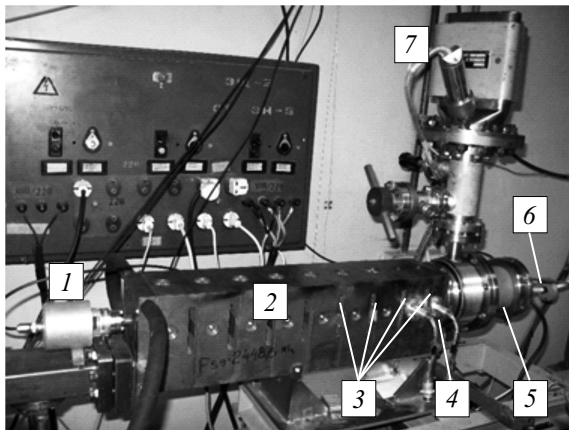
При формировании ускоренного электронного пучка в линейном ускорителе электронов (ЛУЭ) малых энергий желательное достижение высокого коэффициента захвата частиц в режим ускорения. Это необходимо для получения высокого КПД преобразования СВЧ-энергии в энергию пучка и обеспечения радиационной чистоты ускорителя. Захват определяется свойствами ускоряющей структуры, системой инжекции и системой фокусировки. В высокочастотных ускорителях [1] потери особенно велики на начальной стадии ускорения, когда пучок еще не сгруппирован в короткие сгустки и их длительность превышает область захвата. В ускорителях электронов на базе обычных ускоряющих структур бегущей и стоячей волны — с последовательной связью и использованием диодных пушек для инжекции пучка — обычно захват не превышает 30–40%. В настоящей работе сообщается о достижении

высокого — близкого к 100% — коэффициента захвата в режим ускорения в ЛУЭ, содержащем ускоряющую структуру с „параллельной связью“, электронную пушку с СВЧ-управлением током инжекции и фокусирующую систему на постоянных магнитах.

Термин „параллельная связь“ в ускорительной технике появился после опубликования работы [2], в которой описана структура, содержащая ускоряющие резонаторы, запитываемые параллельно из подводящего коаксиального волновода. В настоящее время новое направление в ускорительной технике быстро развивается, предлагаются различные схемы ускоряющих структур, особенности и преимущества параллельной связи интенсивно изучаются [2–10]. Нами предложена ускоряющая структура с параллельной связью (СПС) нового типа, в которой СВЧ-питание ускоряющих резонаторов осуществляется параллельно из одного общего проходного возбуждающего резонатора через индивидуальные отверстия связи [4]. Последовательное теоретическое изучение разрабатываемой схемы СПС начато в [7]. В настоящей работе приводятся экспериментальные данные по получению устойчивого режима ускорения электронного пучка с высоким коэффициентом захвата на макете ЛУЭ [8,9], содержащем 9-резонаторную СПС, выполненную в соответствии с предложениями [4].

Инжекционная система на базе электронной пушки с СВЧ-управлением током инжекции предложена и разработана нами ранее [11], к настоящему времени она существенно усовершенствована [9]. Управление пучком осуществляется с помощью сетки, близко расположенной к катоду. При подаче управляющего сигнала на зазор сетка–катод электроны инжектируются в зазор сетка–анод в течение половины СВЧ-периода при отрицательном напряжении катода относительно сетки. Реализуется так называемый „ $\pi$ -режим“ инжекции пучка. Для формирования импульсного тока инжекции до 1 А необходима СВЧ-мощность до 1 kW в импульсе.

Фокусировка пучка осуществляется знакопеременным полем соленоидального типа радиально намагниченных постоянных магнитов, встроенных между резонаторами в ускоряющую структуру [4]. В таком поле фокусирующая сила пропорциональна квадрату напряженности продольного поля и направлена к центру симметрии системы [12]. В нашем случае максимальное поле на оси около 0.8 kG, что достаточно для удержания пучка с током до величины не менее 1 А при энергии 50 keV. Магнитная система состоит только из постоянных магнитов



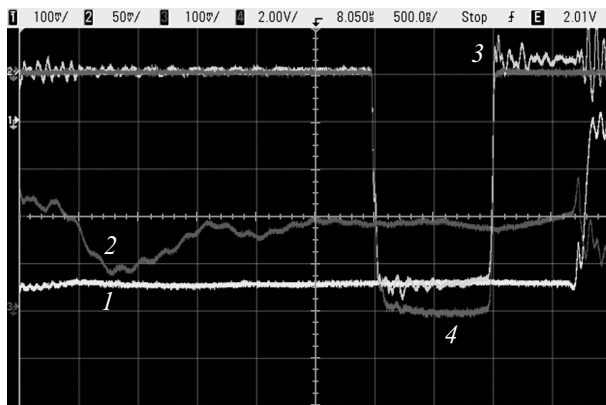
**Рис. 1.** Ускорительный стенд. 1 — цилиндр Фарадея; 2 — 9-резонаторная СПС, 3 — фокусирующие магниты, 4 — СВЧ-датчики, 5 — электронная пушка, 6 — индуктивный датчик входного тока, 7 — высоковакуумный насос.

и шунтов (без дополнительных фокусирующих катушек и элементов подстройки). Поле создается практически только на оси ускоряющих резонаторов СПС, в области пролета пучка, поэтому масса магнитов оказывается сравнительно небольшой [4], и в нашем случае общая масса магнитной системы не превышает 2 кг. Обычно для фокусировки используется соленоид, вес которого сопоставим с весом ускоряющей структуры.

Экспериментальные результаты получены на стенде [9], внешний вид которого с исследованной 9-резонаторной СПС приведен на рис. 1.

Наблюдавшийся ранее [8] вторично-эмиссионный резонансный разряд (ВЭРР) подавлен с помощью нанесения протектора и увеличения амплитуды электрического поля в первом и втором резонаторах СПС. Найденный нами протектор и способ подавления ВЭРР, по-видимому, универсальны, применимы в других случаях и требуют дальнейшего экспериментального и теоретического изучения.

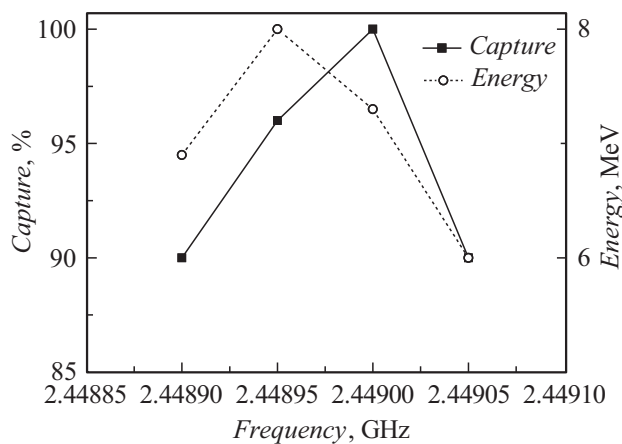
Длительность импульсов тока инжекции устанавливалась в диапазоне  $\tau = 0.1\text{--}4\ \mu\text{s}$ , импульсное значение тока инжекции регулировалось до 0.3 А. Измерялись ток на входе  $I_{in}$  и выходе ЛУЭ  $I_{out}$ , энергия пучка  $W$ , а также форма огибающей падающей на СПС и отраженной



**Рис. 2.** Осциллограммы, характеризующие работу СПС при ускорении электронного пучка.

СВЧ-мощности. Энергия ускоренного пучка измерялась методом задерживающих металлических пластин по току в начале импульса. Форма регистрируемых импульсов приведена на рис. 2. Для СВЧ-питания ЛУЭ использовался клистрон КИУ-111. Клистрон формирует импульс СВЧ-мощности около  $2.5 \text{ MW}$  (кривая 1), который подается в СПС. По минимуму отраженного сигнала (кривая 2) проводилась настройка на резонансную частоту ускоряющей структуры. Задающий синтезатор обеспечивает шаг перестройки частоты  $1 \text{ kHz}$ . Кривая 3 представляет импульс тока эмиссии пучка  $I_{in}$ , измеренный с помощью индуктивного датчика, расположенного на проводе подачи высокого напряжения на пушку. Калибровочный коэффициент пересчета составляет  $0.9 \text{ A/V}$ . На кривой 4 показан импульс ускоренного электронного тока  $I_{out}$ , измеренный с помощью цилиндра Фарадея, установленного на выходе ЛУЭ. Длительность импульса тока устанавливалась  $\tau \approx 1 \mu\text{s}$ . Энергия пучка в начале импульса составляла  $W \approx 8 \text{ MeV}$ . Импульсное значение тока на выходе ЛУЭ  $I_{out} \approx 200 \text{ mA}$ , в соответствии с калибровочным коэффициентом пересчета в данном измерении коэффициент захвата электронов в режим ускорения  $I_{out}/I_{in} \approx 100\%$ .

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента захвата  $I_{out}/I_{in}$  (в %) и энергии пучка (в MeV) от частоты при  $I_{in} = 100 \text{ mA}$ . Энергия



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента захвата в режим ускорения и энергии пучка от частоты.

пучка максимальна на частоте 2 448 950 kHz. Коэффициент захвата максимален на более высокой частоте 2 449 000 kHz, что обусловлено, по-видимому, более оптимальными условиями СВЧ-фокусировки пучка ускоряющим электрическим полем. Это свойство СПС требует дальнейшего экспериментального и теоретического изучения. При увеличении тока коэффициент захвата и энергия частиц уменьшаются, что обусловлено нагрузкой ускоряющей структуры пучком электронов и уменьшением амплитуды ускоряющего поля. В исследованном варианте СПС предназначена для проверки основных свойств и особенностей ускоряющей структуры нового типа [4] и рассчитана на ток в диапазоне 0.1–0.3 А в импульсе. При модификации структуры в соответствии с расчетами возможно получение больших импульсных токов — до 0.5–1 А при высоком коэффициенте захвата.

Авторы благодарны сотрудникам ИХКГ СО РАН, ИЯФ СО РАН за сотрудничество, помощь в изготовлении элементов ЛУЭ, А.С. Богомолу за постоянный интерес и поддержку, В.М. Павлову за разработку программы расчета динамики пучка, В.Я. Иванову за программу расчета электронной оптики.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-73-30032) в части экспериментального измерения параметров пучка ускоренных электронов.

## Список литературы

- [1] *Wangler Th.P.* RF linear accelerators. Weinheim: WILEY-VCH, 2008. 450 p.
- [2] *Sundelin R.M., Kirchgessner J.L., Tiger M.* // Trans. Nucl. Sci. 1977. V. NS-24. N 3. P. 1686–1688.
- [3] *Иванников В.И., Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 12. С. 2407–2409.
- [4] *Черноусов Ю.Д.* Ускоряющая структура с параллельной связью. Патент РФ № 2605949 // Изобретения. Полезные модели. 2017. № 1.
- [5] *Dolgashev V.A.* Traveling wave linear accelerator with RF power flow outside of accelerating cavities. US Patent N US9380695 B2. Publ. date: June 28, 2016.
- [6] *Tantawi S.G., Li Z., Borchard P.* Distributed coupling and multi-frequency microwave accelerators. US Patent Application N US 0014876 A1. Publ. Date: Jan. 14, 2016.
- [7] *Барняков А.М., Левичев А.Е., Никифоров Д.А., Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 1. С. 142–146.
- [8] *Chernousov Yu., Ivannikov V., Shebolaev I.* et al. // Proc. of the 27th Int. Linear Accelerator. Conf. (LINAC 14). Geneva, 2014. P. 281–283.
- [9] *Варнуяков А.М., Chernousov Yu.D., Ivannikov V.I., Levichev A.E., Shebolaev I.V.* // JINST. 2015. V. 10. P. P06004.
- [10] *Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 7. С. 3–9.
- [11] *Закутов Е.М., Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В.* Импульсный инжектор электронов. А.с. № 589644. // Б.И. 1978. № 3.
- [12] *Молоковский С.И., Сушков А.Д.* Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.