

## РАЗРАБОТКА КЛИСТРОНА S-ДИАПАЗОНА

*А. В. Андрианов<sup>а,б,1</sup>, М. В. Арсентьева<sup>а,б</sup>, А. М. Барняков<sup>а</sup>,  
А. Е. Левичев<sup>а,б</sup>, И. Л. Пивоваров<sup>а</sup>, С. Л. Самойлов<sup>а</sup>,  
Д. И. Чекменев<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>б</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В ИЯФ СО РАН ведется разработка клистрона S-диапазона мощностью 50 МВт. На сегодня произведены все необходимые расчеты, а также изготовлены катодный узел, пролетные резонаторы, коллектор, соленоид, система охлаждения. Проведены испытания клистрона в диодном режиме без группирующих резонаторов, которые изготовлены отдельно. Резонаторы измерены и настроены на необходимые частоты и установлены на рабочий макет клистрона. В настоящее время идет тестирование полностью готового макета на предмет получения СВЧ-мощности.

The S-band klystron of 50 MW power is being developed at the Budker Institute of Nuclear Physics. For the moment, all the necessary calculations have been made. Also, cathode assembly, bunching cavities, collector, solenoid and cooling system have been manufactured. The klystron was tested in a diode mode without bunching cavities, which were brazed separately. Cavities have been measured and tuned at the required frequencies and installed at the prototype of the klystron. Currently, a fully finished prototype is being tested in order to obtain RF power.

PACS: 80.40.Fe

### ВВЕДЕНИЕ

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) имеет богатый опыт создания ускоряющих структур на бегущей и стоячей волне, необходимых для ускорения заряженных частиц. СВЧ-мощность для таких структур генерируется, как правило, высокомошными источниками — клистроном. В настоящее время в ИЯФ СО РАН ведутся разработки собственного клистрона S-диапазона с выходной мощностью 50 МВт. Необходимость создания такого источника СВЧ-мощности связана в первую очередь с работой инжекционного комплекса ВЭПП-5 [1]. В данный комплекс входит линейный электрон-позитронный ускоритель, который запитывается от четырех клистронов SLAC 5045 [2], разработанных более 30 лет назад. Было предложено, что для будущей замены данных клистронов целесообразнее разработать собственный аналогичный клистрон.

Разрабатываемый макет клистрона представлен в модульном исполнении: катодный узел, пролетная часть, коллектор, фокусирующий соленоид. В настоящее время все элементы изготовлены и идет тестирование в режиме СВЧ-мощности.

---

<sup>1</sup>E-mail: veselyandrianov@mail.ru

### КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Клистрон представляет собой прибор О-типа, в котором мощность непрерывного электронного пучка преобразуется в СВЧ-мощность путем группировки электронов в сгустки под действием системы резонаторов. На рис. 1 представлена принципиальная схема клистрона. В таблице приведены требуемые параметры клистрона.

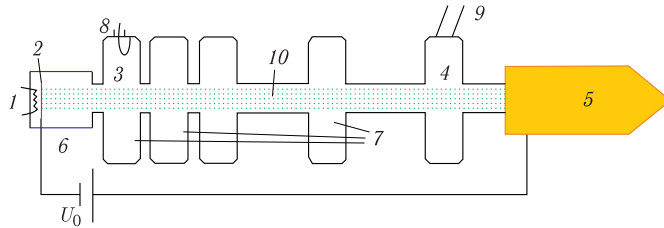


Рис. 1. Принципиальная схема клистрона: 1 — накал; 2 — катод; 3 — входной резонатор; 4 — выходной резонатор; 5 — коллектор; 6 — высоковольтный изолятор; 7 — система пассивных группирующих резонаторов; 8 — ввод мощности; 9 — выходной волноводный тракт; 10 — поток электронов

#### Требуемые характеристики клистрона

Параметр	Значение
Частота, МГц	2856
Мощность импульсная выходная, МВт	50
Напряжение анода, кВ	350
Ток анода импульсный, А	400
Длительность импульса, мкс	3,5
Частота повторения, Гц	25

### МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование проводилось в программном пакете CST Studio [3] и включало все элементы системы: катодный узел, группирующие резонаторы, магнитную систему, коллектор. Некоторые результаты моделирования представлены на рис. 2, 3.

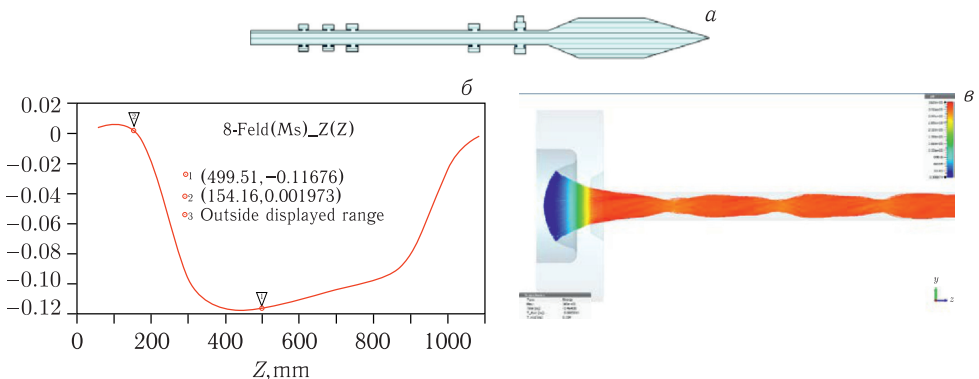


Рис. 2. Моделирование клистрона: а) схема пассивных группирующих резонаторов; б) распределение магнитного поля; в) движение частиц в магнитном поле клистрона

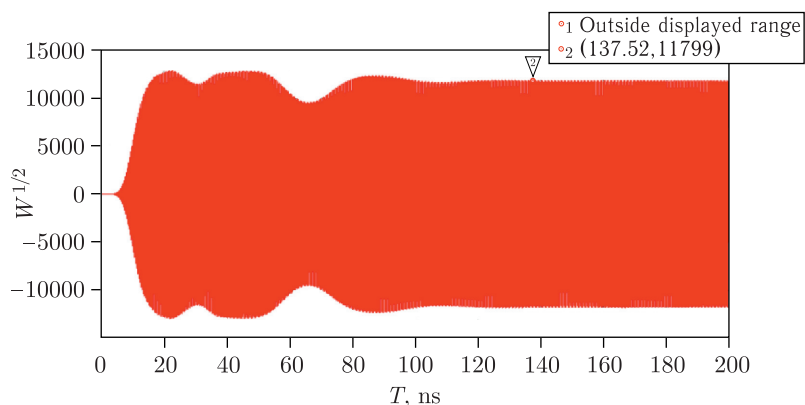


Рис. 3. Выходной нормированный сигнал амплитуды СВЧ-поля в выходном волноводном тракте клистрона: частота 2855,6 МГц, выходная мощность 69 МВт, анодное напряжение 350 кВ, ток пучка 400 А, входная СВЧ-мощность 350 Вт

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ

На рис. 4 представлен изготовленный катодный узел клистрона. Он состоит из накала, катодной «ноги», высоковольтного изолятора и вакуумного фланца.

На рис. 5 изображен коллектор клистрона. Для получения необходимой внутренней формы коллектора он выполнен из секций с ребрами охлаждения, которые соединяются путем пайки.

Группирующая система состоит из входного, четырех пассивных и выходного резонаторов. Для подвода входной СВЧ-мощности используется петля связи с вакуумным вводом. Выходной волноводный тракт заканчивается вакуумным волноводным окном на бегущей волне [4]. По своей конструкции волноводное окно на бегущей волне должно выдерживать СВЧ-мощность более 20 МВт. Изготовленная группирующая система и клистрон в сборке показаны на рис. 6.



Рис. 4. Катодный узел клистрона. Слева направо: спираль накала, катодная «нога» на стенде тестирования эмиссии катода, катодный узел в сборке



Рис. 5. Коллектор клистрона



Рис. 6. Макет клистрона: слева — система группирующих резонаторов; справа — клистрон на стенде

## ИСПЫТАНИЯ

В диодном режиме были достигнуты напряжение 350 кВ, ток пучка около 220 А. Осциллограммы тока и напряжения приводятся на рис. 7. Значение тока значительно ниже необходимой величины 350–400 А. В этом режиме электронная пушка клистрона не работает в режиме «трех вторых», т. е. имеет место «недозамиссия». Причина этого может быть связана с «недоактивацией» катода или с его травлением в процессе тренировки в диодном режиме.

Для правильной активации катода необходим источник нагрева на 900 Вт мощности, установить который было невозможно на момент начала работы с клистроном.

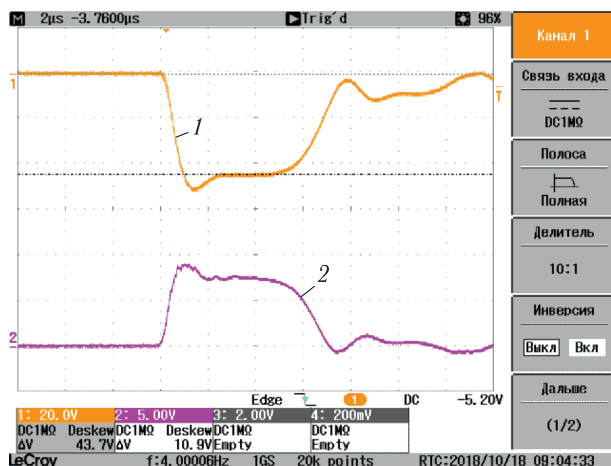


Рис. 7. Осциллограммы тока и напряжения клистрона: 1 — напряжение; 2 — ток. Достигнутое напряжение по максимальному значению на графике 350 кВ, ток по равномерному участку 220 А

Катод был активирован только с источником 600 Вт. С другой стороны, в процессе тренировки в диодном режиме пришлось корректировать магнитное поле соленоида, что, судя по всему, приводило к частичному оседанию пучка в районе анода. Данный процесс мог привести к травлению катода.

После окончательной сборки клистрона был исследован входной резонатор. Оказалось, что его коэффициент связи уменьшился и достиг значения около 2,5. Такое значение связи гораздо меньше необходимого, и это привело к уменьшению полосы пропускания резонатора, а также к необходимости увеличения входной СВЧ-мощности. Кроме этого был выявлен вторично-эмиссионный разряд (ВВЭР) во входном резонаторе при включении магнитного поля соленоида. Данный разряд удалось частично уменьшить путем тренировки. Кроме того, ВВЭР частично подавляется током пучка клистрона. В итоге все это привело к увеличению отраженной мощности от входного резонатора. Тем не менее возбуждение резонатора осуществлялось.

Недобор тока пучка более чем в 100 А привел к тому, что рабочий режим перешел в область частот полосы пропускания — 2880 и 2835 МГц. На частоте 2856 МГц наблюдался минимум выходной СВЧ-мощности. Данный результат отображен на графиках рис. 8. Вышеупомянутые недостатки входного резонатора сказались на прошедшей в него СВЧ-мощности от входного усилителя. В итоге на частоте вблизи 2856 МГц была достигнута мощность в нагрузке выходного волноводного тракта около 250 кВт при входной мощности 200 Вт. На частоте вблизи 2880 МГц была измерена выходная мощность около 3,5 МВт, причем входная мощность была оценена в несколько ватт (менее 10 Вт). Точное значение не было определено по причине недостаточной точности измерений, определяемой большим отражением.

После получения измеренных данных было проведено дополнительное моделирование с реально достигнутыми параметрами тока и напряжения пучка. Результаты моделирования показаны на рис. 9. Согласно моделированию в режиме «недоэмиссии» максимум выходной мощности действительно переходит в область крайних частот по-

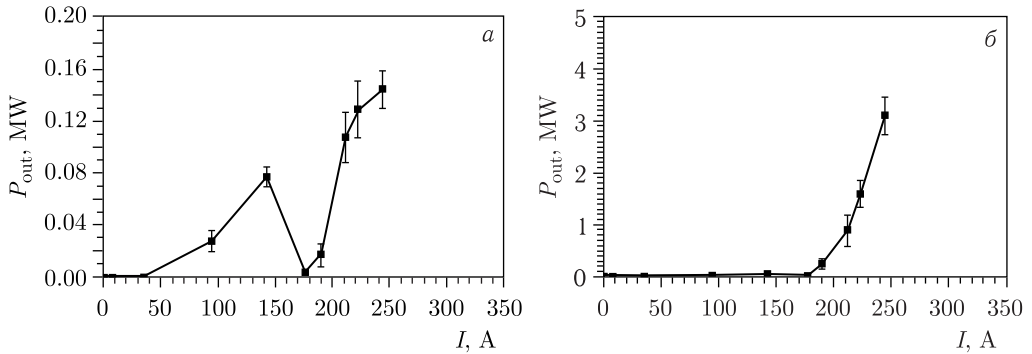


Рис. 8. Зависимости выходной мощности от тока пучка: а) частота вблизи 2856 МГц, входная мощность 200 Вт; б) частота вблизи 2880 МГц, входная мощность до 10 Вт

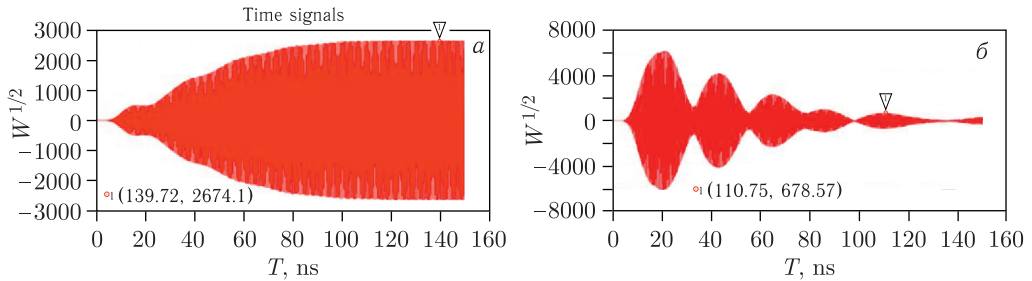


Рис. 9. Моделирование выходного сигнала клистрона при токе пучка 230 А и напряжении 350 кВ: а) частота 2880 МГц, входная мощность 1 Вт, выходная мощность 2,7 МВт; б) частота 2856 МГц, входная мощность 120 Вт, выходная мощность 0,1 МВт

лосы пропускания. Так, на частоте около 2880 МГц получилась выходная мощность 2,7 МВт при входной мощности 1 Вт, токе пучка 230 А и напряжении 350 кВ. На рабочей частоте 2856 МГц наблюдался минимум выходной мощности при токе пучка 230 А (см. рис. 9). Таким образом, моделирование в целом подтвердило экспериментальные результаты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Макет клистрона S-диапазона полностью изготовлен. В результате испытаний были допущены некоторые ошибки, что привело к уменьшению эмиссии катода, уменьшению коэффициента связи входного резонатора, смещению максимальной выходной мощности клистрона в область крайних частот полосы пропускания. В результате достигнуты следующие параметры: напряжение пучка 350 кВ, ток пучка 220 А, выходная мощность на частоте 2880 МГц около 3,5 МВт при входной мощности несколько ватт, выходная мощность на частоте 2856 МГц около 0,15 МВт при входной мощности 200 Вт. Дополнительное моделирование в целом подтвердило экспериментальные результаты.

В настоящее время планируется повторная активация катода с целью увеличения его эмиссии, изготовление дополнительного источника накала мощностью до 1 кВт,

создание стенда по напылению нитрида титана во входном резонаторе для подавления вторично-эмиссионного разряда. Кроме того, изготавливается второй макет клистро-на, в котором будет учтен полученный опыт и внесены дополнительные изменения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berkaev D., Andrianov A., Astrelina K. et al.* VEPP-5 Injection Complex: Two Colliders Operation Experience // Proc. of IPAC2017, Copenhagen, May 14–19, 2017. P. 2982–2984.
2. *Allen M. A. et al.* Performance of the SLAC Linear Collider Klystrons, SLAC-PUB-4262. 1987.
3. [https://www.3ds.com/products-services/simulia/?utm\\_source=cst.com&utm\\_medium=301&utm\\_campaign=products](https://www.3ds.com/products-services/simulia/?utm_source=cst.com&utm_medium=301&utm_campaign=products)
4. *Kazakov S. Yu.* RF Window with TW in Ceramics // Intern. Workshop on Pulsed RF Power Sources for Linear Colliders (RF 93), Dubna, Protvino, Russia, July 5–9, 1993.