

## Разработка электронно-оптической системы мощного релятивистского клистрона с сеточным управлением

В.Е.Балакин, Ю.Д.Валяев, А.В.Ларионов, В.Ф.Фогель,  
В.М.Фурса, Ю.Я.Чибуков, Ю.Р.Якубов

*Филиал Института ядерной физики СО РАН, Протвино, Россия*

Использование мощных релятивистских клистронов с сеточным управлением для ВЧ--питания линейных коллайдеров предусматривается в подходе, развиваемом в ФИЯФ СО РАН (г.Протвино). Электронный пучок формируется в ускорительной трубке, находящейся под постоянным высоким напряжением  $\sim 800\div 1000$  кВ. Электронная пушка с сеточным управлением имеет ячеистую структуру и состоит из 37 микропучков (см. рис.1). Микролучи, сформированные микропучками при напряжении 20 кВ, собираются в ускорительной трубке в один макропучок с током до 200 А и ускоряются до полной энергии. Длительность импульса управления составляет 500 нс. На выходе ускорительной трубки используется магнитная линза для согласования макропучка с магнитным полем канала клистрона.

Разработанная ранее версия электронной пушки имела существенно заниженный первеанс (см. таблицу 1). Несоответствие проектных и полученных в эксперименте параметров объясняется тем, что в первых расчетах использовалась двумерная кольцевая модель пучка. В дальнейшем был разработан специальный трехмерный код MBGUN для численного моделирования многолучевых пушек [1,2]. Код решает самосогласованную задачу для многолучевого электронного пучка при аксиально-симметричной геометрии электродов. В расчетах старт микролучей производится с гладкой поверхности сетки (поверхность без ячеек), а их начальные параметры:  $R$  – радиус микролуча,  $I$  – ток микролуча,  $\alpha$  – угол сходимости находятся из двумерного расчета отдельной микропушки. Двумерный расчет производится в двух направлениях. В прямом расчете решается обычная пушечная задача и находятся параметры микролуча за управляющей сеткой. В обратном, микролуч с найденными за сеткой параметрами запускается обратно в сторону катода, причем сетка здесь уже заменена гладкой поверхностью (рис. 2).

Найденные параметры микролуча на гладкой поверхности являются входными для MBGUN. В процессе двумерных расчетов легко можно построить зависимости вида  $I=I(E)$   $R=R(E)$ ,  $\alpha=\alpha(E)$ , где  $E$  – напряженность электрического поля в центре микролуча на поверхности сетки.

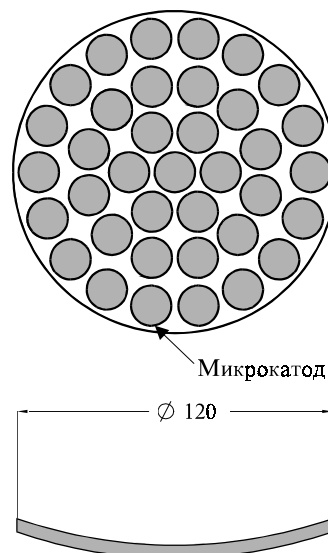


Рис.1. Структура катода электронной пушки

| Название                     | Расчет   | Старая версия | Новая версия |
|------------------------------|----------|---------------|--------------|
|                              |          | Эксперимент   |              |
| Высокое напряжение (пост.)   | 1000 кВ  | 1000 кВ       | 700 кВ       |
| Рабочий микропервеанс        | 0.25-0.3 | 0.12-0.17     | 0.19-0.25    |
| Длит. импульса               | 500 нс   | 500 нс        | 500 нс       |
| Формирующее напряж. на сетке | 20-30 кВ | 20-30 кВ      | 15-20кВ      |
| Катод (37 микрокатодов)      | оксид    | оксид         | оксид        |

Табл.1. Основные параметры многолучевой пушки с сеточным управлением.

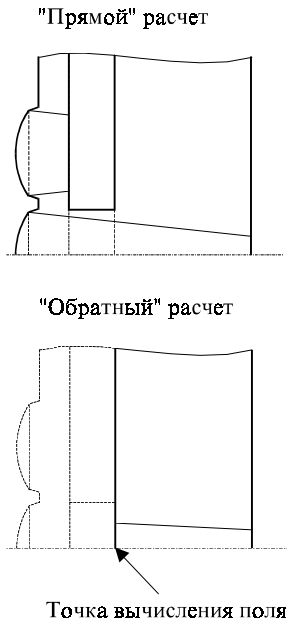


Рис.2. Схема вычислений для отдельного микролуча.

Самосогласованное решение в MBGUN строится согласно этим зависимостям путем сшивки по  $E$  стартовых параметров микролучей и трехмерного решения. Результаты расчета первой версии пушки, полученные с использованием MBGUN хорошо соответствовали эксперименту [1]. Следующим шагом была численная оптимизация. В новой версии была увеличена кривизна микрокатодов, уменьшен зазор между сеткой и катодом, изменена конфигурация электродов в ускорительной трубке. Полученные из расчетов MBGUN параметры пучка на выходе из трубки показаны на рисунке 3.

На рис.4–6 показан один из примеров такого расчета. Для напряжения 1000 кВ, оптимальный ток, соответствующий минимуму кривых, составляет 250–280 А, т.е. проведенная численная оптимизация решает задачу формирования пучка.

Экспериментальные испытания новой пушки были проведены на установке, схема которой показана на рис.7. Для высоковольтного питания ускорительной трубки использовался каскадный умножитель напряжения, работающий на частоте 20 кГц и имеющий напряжение одного каскада < 25 кВ.

Питание каскадного генератора осуществлялось от тиристорного преобразователя частоты через двойной колебательный контур. Для формирования отпирающих импульсов на сетку применялся стандартный сеточный модулятор, разработанный для VLEPP клистрона. Электронный пучок, сформированный в ускорительной трубке, с помощью магнитных линз пропускаться через графитовую диафрагму диаметром 11 мм. Оценка качества пучка производилась по величине токопрохождения через диафрагму.

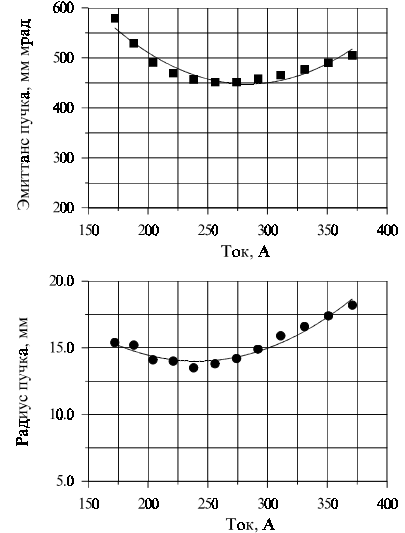


Рис.3. Параметры пучка, полученные при расчете программы MBGUN.

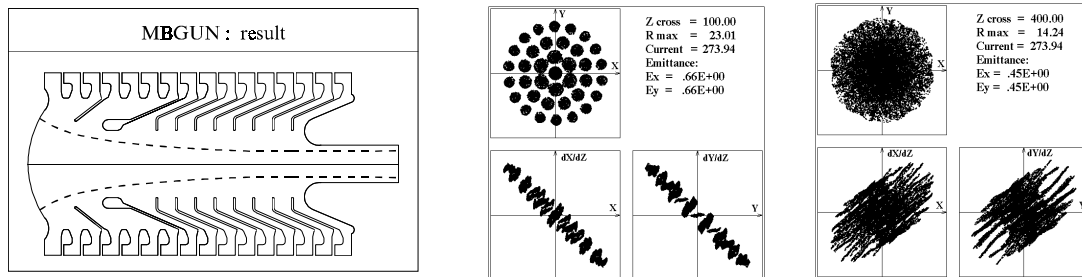


Рис.4-6. Форма пучка, сечение пучка, фазовая плоскость в начале и на выходе ускоряющей трубки.

Поскольку аналогичные измерения для первой версии электронной пушки производились на напряжении до 600 кВ [1], мы приводим сравнительные харак-

теристики пушек на этом напряжении. Из рис.8 видно, что рабочий ток (первеанс), соответствующий максимальному токопрохождению в новой версии на 30-40%

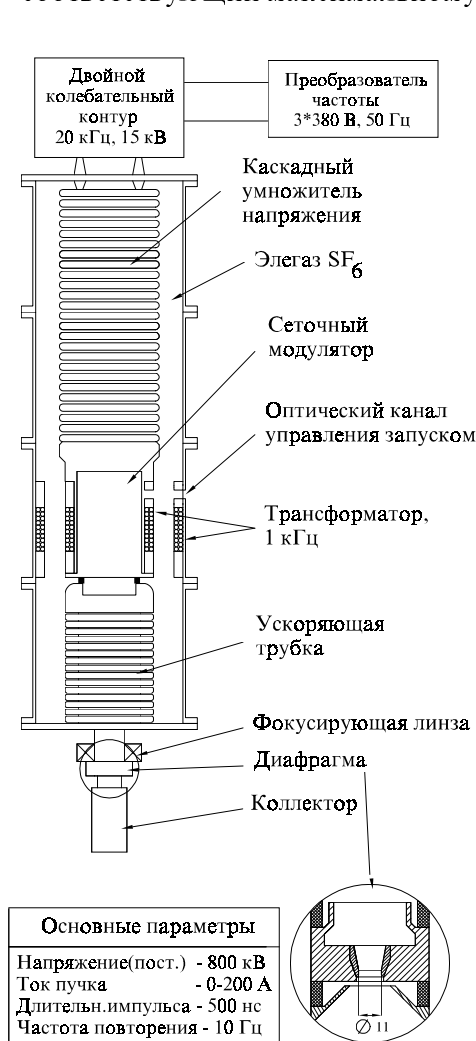


Рис.7. Схема экспериментальной установки для испытаний электронно-оптической системы.

с расчетными кривыми. Этот эффект объясняется перераспределением напряжения по ускоряющей трубке, которое возникает из-за появления темновых токов при больших напряжениях. Тут же приведена другая кривая, первоначально измеренная при 435 кВ, т.е. в отсутствии темновых токов, а затем пересчитанная на 700 кВ по закону Ленгюра. Она хорошо согласуется с расчетами.

Эффект темновых токов виден из графика на рис.10, где изображена зависимость отношения показаний делителей напряжения трубки и каскадного умножителя от приложенного напряжения. При отсутствии темновых токов величина  $\eta$  постоянна и равна 1. В случае появления темновых токов, ток через делитель ускоряющей трубки изменится и  $\eta$  уже будет отличаться от 1. Из графика видно, что заметное перераспределение напряжения начинается от 600 кВ.

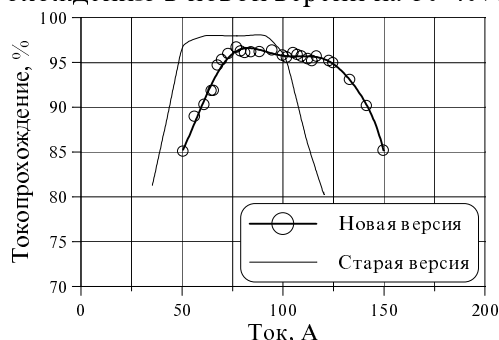


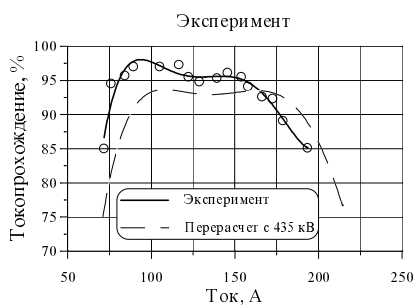
Рис.8. Кривые токопрохождения через диафрагму диаметром 11 мм при напряжении 600 кВ (новая и старая версии).

больше чем в старой. Несколько меньшее по абсолютной величине значение токопрохождения для новой версии (95 и 98%) объясняется увеличением расстояния между диафрагмой и финальной магнитной линзой. Последнее было сделано в связи с установкой дополнительной диагностики на вход в диафрагму – датчика положения пучка. Ясно, что электронный пучок, формируемый многолучевой пушкой, должен иметь ореол в связи с эмиссией из областей между микрокатодами. Как показывают оценки, величина тока этого ореола может составлять 3-5% от основного т.к. температура матрицы макрокатода лишь немногим меньше температуры микрокатодов.

Чем меньше расстояние между финальной линзой и диафрагмой, тем большую часть ореола можно пропустить через диафрагму.

На рис.9 показаны расчетные и экспериментальные кривые для напряжения 700 кВ. Как видно, реальная кривая токопрохождения смещена в сторону меньших токов по сравнению

Влияние распределения напряжения по трубке на оптику пучка было изучено в дополнительных экспериментах. Распределение искусственно изменялось путем варьирования сопротивлений отдельных участков делителя ускорительной трубки.



$$\eta = \frac{\text{Показания делителя напряжения на ускоряющей трубке}}{\text{Показания делителя напряжения на умножителе}}$$

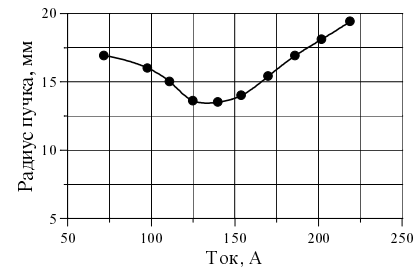
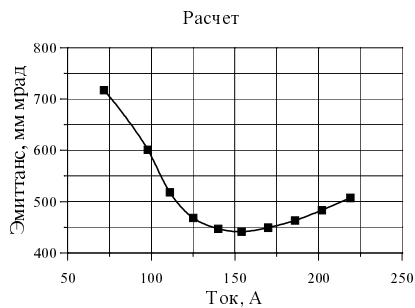
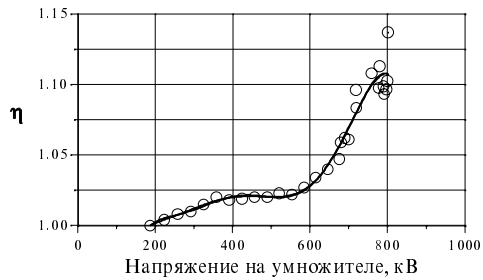


Рис.9. Экспериментальные и расчетные результаты для напряжения 700 кВ.

Рис.10. Влияние темновых токов на линейность распределения напряжения на ускоряющей трубке.

Полученные результаты показаны на рис.11. Видно, что 15%-ное изменение напряжения на трех зазорах трубки заметно изменяет форму кривой токопрохождения. Таким образом, можно говорить об общей возможности корректировать оптику пучка в ускорительных трубках путем подстройки распределения напряжения. Другими словами, мелкие оптические ошибки, возникающие, например, при расчетах, при изготовлении и эксплуатации могут, в принципе, корректироваться указанным выше способом.

Проведенная численная оптимизация многолучевой сеточной пушки позволила увеличить рабочий первеанс на 30-40%. Пушка была испытана на напряжениях до 700 кВ, при этом мощность в пучке в рабочей точке составила  $\approx 100$  Мвт. На напряжениях выше 600 кВ становится заметным влияние темновых токов на распределение напряжения по ускорительной трубке, что приводит к изменению оптики пучка.

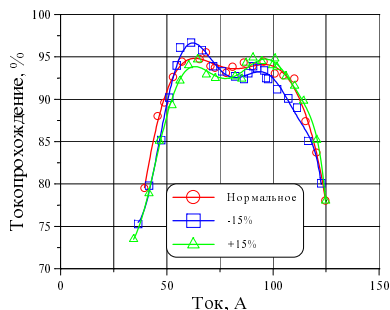


Рис.11. Оптимизация пучка ю путем перераспределения напряжения вдоль ускоряющей трубки (500 кВ)

## Литература

[1] V.E.Balakin, Yu.Ya.Chibukov, V.M.Fursa, A.V.Larionov, Yu.R.Yakubov  
“Investigation of optical system for multi-beam gridded klystron”. Sixth International  
Workshop on Linear Colliders LC95, KEK Proceedings 95-5, p.1010-1017, 1995

[2] А.В.Ларионов. MBUGN — специальная 3D-код для численного моделирования  
сеточных многолучевых электронных пушек. ФИЯФ Препринт 94-1, Протвино,  
1994.