

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



М-345

P9 - 10504

2030/2-77

30/v-77

И.М.Матора, Л.А.Меркулов

ФОРМИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНОГО ПОТОКА
В ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ СИЛЬНОТОЧНОЙ
ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКЕ

1977

P9 - 10504

И.М.Матора, Л.А.Меркулов

ФОРМИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНОГО ПОТОКА
В ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ СИЛЬНОТОЧНОЙ
ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКЕ

Направлено в журнал "Радиотехника и электроника"

Формирование ламинарного потока в трехэлектродной
сильноточной осесимметричной электронной пушке

Описываются особенности методики точного самосогласованного расчета для формирования ламинарного потока в сильноточной трехэлектродной осесимметричной электронной пушке. Дан пример расчета оптической схемы пушки на ток 250 А, напряжение 250 кВ при напряжении на сетке 60 кВ. Исследовано изменение характера потока при варьировании электромагнитных параметров пушки.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Formation of a Laminar Flux in a Three-Electrode
High-Current Axis-Symmetrical Electron Gun

Peculiarities of the techniques of the accurate self-consistent calculation of the laminar flux formation in a high-current three-electrode axis-symmetrical electron gun are described. The calculated parameter of the optical scheme of the gun is presented for the current being 250A, voltage 250 kV at the grid voltage of 60 kV. The changes in the flux character caused by the variation of the gun electromagnetic parameters are studied.

The investigation has been performed in the
Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

Введение

В /1-3/ была развита теория, с помощью которой удалось создать алгоритм практически точного автоматически выполняемого ЭВМ самосогласованного расчета такой формы эмиттера катода сильноточной электронной осесимметричной двухэлектродной пушки, которая при заранее заданной конфигурации других электродов и аксиально-симметричного магнитного поля обеспечивает ламинарный поток электронов на выходе.

Такая электронная пушка при условии достаточной плотности эмиссии с катода является наиболее надежной в работе. Это преимущество особенно ценно в случае ее использования в таких ускорителях и устройствах, в которых велика средняя мощность импульсов тока /например, в инжекторе ИБР-2 - линейном индукционном ускорителе ЛИУ-30/250^{4-6/} или в клистронах/. Экспериментальная электронная пушка ЭЭП-2 такого типа для ЛИУ-30/250 рассчитана^{3/}, сооружена и в настоящее время проходит отработку.

Другой вариант электронной пушки для ЛИУ-30/250 был разработан и испытан^{7/} на головном образце этого ускорителя, названном ЛИУ-О,75/250. Это трехэлектродная пушка с промежуточным потенциалом на сетке. При испытаниях на частоте посылок 50 Гц, токе 250 А, энергии электронов 250 кэВ и длительности импульса 0,5 мкс эта пушка выдержала несколько десятков часов непрерывной работы. Во время разработки этой трехэлектродной пушки теория и методика расчета оптических параметров, обеспечивающих ламинарность потока, еще только развивались, и конфигурация электродов пушки была определена в резуль-

тате длительных экспериментальных исследований. Поток в этой пушке не ламинарен, о чем свидетельствует наличие потерь пучка вдоль тракта ускорения, оцениваемых в несколько процентов.

С помощью методики, развитой в /1-3/, расчет такой пушки стал возможным и проделан нами. Здесь излагаются его особенности и результаты.

1. Особенности расчета трехэлектродной электронной пушки

При расчете трехэлектродной электронной пушки область, в которой, согласно известной /1/ блок-схеме расчетной программы, решаются уравнения Лапласа и Пуассона для самосогласованных расчетов электромагнитного поля, распадается на две подобласти /рис. 1а/. Первая заключена между катодом и сеткой. Диаметр эмиттирующей поверхности катода равен 5 см. Поверхность сетки у эмиттера катода - сферическая. После расчетов был выбран радиус ее кривизны - 13 см и среднее расстояние от нее до катода - 1 см. При выборе соответствующего радиуса кривизны мы стремились, с одной стороны, к достижению более плоской поверхности эмиттера и, следовательно, более равномерного распределения напряженности электрического поля на его поверхности, а с другой стороны, к обеспечению беспрепятственного прохождения потока электронов через отверстия в сетке и аноде. Средняя величина напряженности электрического поля на расстоянии 0,01 см от поверхности эмиттера составляет приблизительно 42 кВ/см.

Вторая подобласть заключена между сеткой и анодом, форма которого аналогична форме анода двухэлектродной пушки.

Ввиду того что между катодом и сеткой по прямой, указанной пунктиром на рис. 1а, потенциал с хорошей точностью распределен линейно, с целью существенного сокращения счетного времени мы предположили также линейное его распределение и на оставшемся отрезке

прямой между сеткой и анодом /продолжение пунктира на рис. 1а/, а не рассчитывали его точно, как это делалось в /1-3/. Последнее предположение не вполне соответствует действительности, но можно надеяться, что связанные с этим погрешности в расчете не будут значительными. Процедура счета отличается от /1-3/ тем, что происходит последовательный обсчет пучка при прохождении из одной подобласти в другую с учетом граничных условий на промежуточном электроде, причем распределение магнитного поля задается в виде графика /рис. 1б/ или таблицы.

2. Результаты численного счета

Ввиду того что конструкция этой электронной пушки разработана и сама пушка уже изготавливается, мы вели расчеты таким образом, чтобы с помощью замены лишь катода, сетки и анода при неизменных других деталях пушки получить близкий к ламинарному поток электронов на выходе.

Номинальными параметрами пушки были взяты: ток $I = 250$ А, напряжение на сетке относительно катода - $V_c = 60$ кВ, напряжение на аноде - $V_a = 250$ кВ. Распределение магнитного поля, как уже упоминалось, имеет вид, изображенный на рис. 1б, причем после расчетов определилось значение $H_{max} = 300$ Э. В результате расчета была получена необходимая форма поверхности эмиттера с удовлетворительным распределением напряженности электрического поля на ней. При такой форме поверхности эмиттера на расстоянии 36 см от катода пучок был равноплотным по сечению /рис. 1в/, и соответствующий ему эмиттанс /рис. 1г/ в этой точке в пределах ошибок счета равен нулю с довольно хорошей линейной зависимостью g' от g .

Возможность сохранения ламинарности потока при изменении электромагнитных параметров электронной

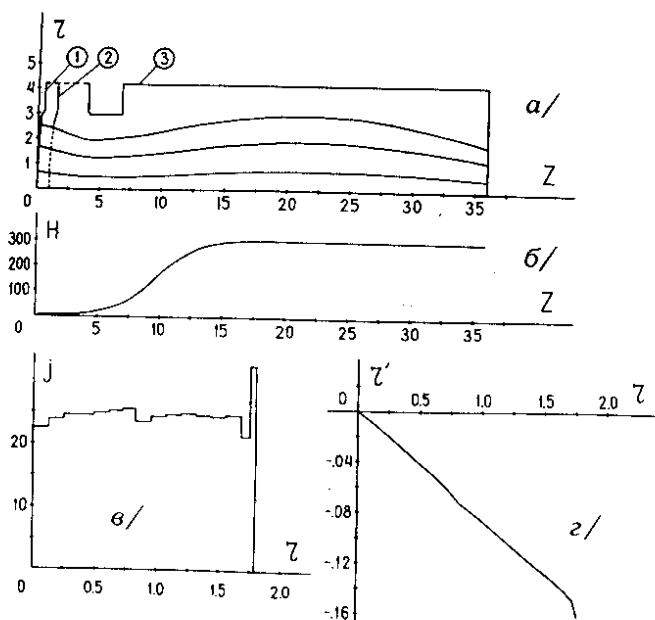


Рис. 1. Электронно-оптическая система трехэлектродной электронной пушки /а/, распределение ее фокусирующего магнитного поля /б/, плотность тока по сечению /в/ на выходе при номинальных параметрах и проекция фазового объема пучка /з/. /1 = 250 А, $V_c = 60$ кВ, $V_a = 250$ кВ, $H_{\max} = 300$ Э, r и z в см, j в А/см². 1 - катод с эмиттером, 2 - сетка, 3 - анод.

пушки была проверена варьированием отдельных параметров пушки при сохранении неизменными остальных. Так, на рис. 2 изображены расчетные гистограммы распределения плотности тока j по радиусу r при изменении величины фокусирующего магнитного поля, а на рис. 3 - при изменении напряжения на сетке и аноде в диапазоне от - 20% до + 20%. На рис. 4 изображены гистограммы $j(r)$ при изменении величины тока I с эмиттера в том же диапазоне.

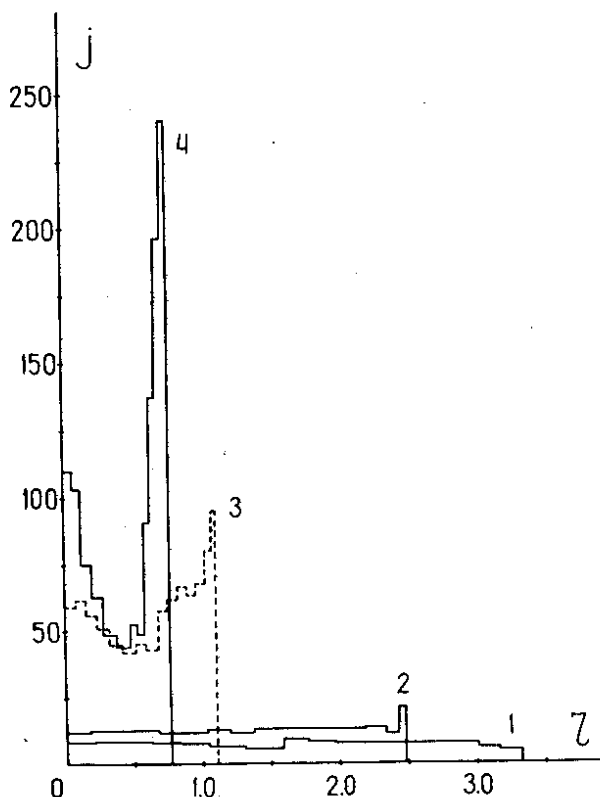


Рис. 2. Плотность тока на выходе из пушки при изменении H . $I = 250$ А, $V_c = 60$ кВ, $V_a = 250$ кВ, r в см, j в А/см². 1. $H_{\max} = 240$ Э, 2. $H_{\max} = 270$ Э, 3. $H_{\max} = 330$ Э, 4. $H_{\max} = 360$ Э.

Напомним, что все расчеты с параметрами пушки, отклоняющимися от номинальных /рис. 2-4/ из-за того, что пучок здесь не является вполне ламинарным /в отдельных случаях наблюдались даже пересечения траекторий/, не являются точными. При этом ошибки тем больше, чем сильнее отклонение характера потока от

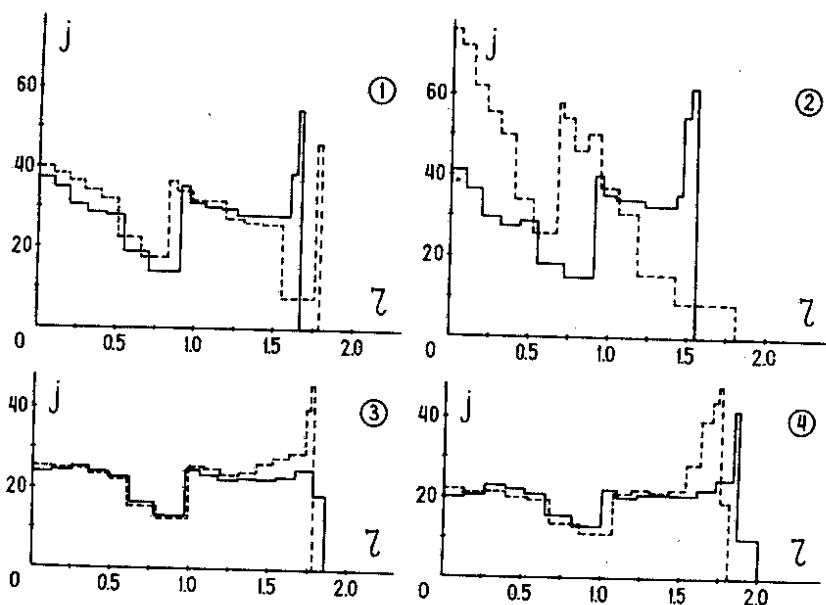


Рис. 3. Плотность тока на выходе из пушки при изменении V . /Сплошная кривая - на аноде, пунктирная - на сетке; $I = 250$ А, $H_{\max} = 300$ Э, r в см, j в А/см². 1. $\Delta V/V = -0,1$. 2. $\Delta V/V = -0,2$. 3. $\Delta V/V = +0,1$. 4. $\Delta V/V = +0,2$.

ламинарного. Поэтому точными являются результаты лишь для номинального режима работы пушки, а остальные - приближенными.

Тем не менее описание потока и при ненормальных параметрах является близким к истине, так как в этих случаях на подавляющей части траекторий, начиная от катода, поток оказывается очень близким к ламинарному, и лишь на конечном отрезке ламинарность существенно утрачивается.

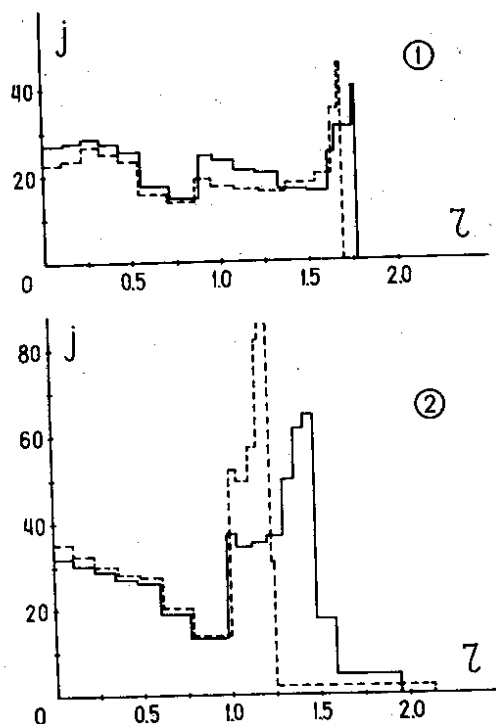


Рис. 4. Плотность тока на выходе из пушки при изменении I . / $V_c = 60 \text{ кВ}$, $V_a = 250 \text{ кВ}$, $H_{\text{max}} = 300 \text{ Э}$, r в см, j в A/cm^2 /. 1. $I = 200 \text{ А}$ /пунктир/, $I = 225 \text{ А}$ /сплошная кривая/. 2. $I = 275 \text{ А}$ /сплошная кривая/, $I = 300 \text{ А}$ /пунктир/.

Литература

1. Матора И.М., Меркулов Л.А. ОИЯИ, Р9-9476, Дубна, 1976.
2. Матора И.М., Меркулов Л.А. ОИЯИ, Р9-9818, Дубна, 1976.
3. Матора И.М., Меркулов Л.А. Расчет экспериментальной электронной пушки ЭЭП-2. В кн.: Разработка и практическое применение электронных ускорителей /материалы Всесоюзной конференции, г. Томск, 3-5 сентября 1975 г./, Изд. ТГУ, Томск, 1975.

4. Матора И.М., Меркулов Л.А., Шелонцев И.И. ОИЯИ, Р9-5268, Дубна, 1970; ЖТФ, 1971, №1, с.1469.
5. Ананьев В.Д. и др. ОИЯИ, 13-4395, Дубна, 1969. Ananjev V.D. e.a. In: Fast Burst Reactors. USAEC CONF-690102, 1969, p. 173.
6. Ананьев В.Д. и др. ОИЯИ, 13-4392, Дубна, 1969.
7. Анцупов П.С. и др. НИИЭФА, А-0213, Л., 1974; В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц /г. Москва, 18-20 ноября 1974 г./, т. I. "Наука", М., 1975, с. 298.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 марта 1977 года.

Вышел в свет очередной номер журнала "Физика элементарных частиц и атомного ядра", том 8, вып. 2. Подписка на журнал проводится в агентствах и отделениях "Союзпечати", в отделениях связи, а также у общественных распространителей печати.