

УДК 621.3.032.266.3

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

М. Л. ЛЕВИН, академик А. Л. МИНЦ, Е. Д. НАУМЕНКО

ГЕНЕРАТОР ВРАЩАЮЩИХСЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОЛЬЦЕОБРАЗНЫХ СГУСТКОВ

Использование электронных потоков для передачи и преобразования энергии было впервые осуществлено еще в рентгеновских трубках и радиолампах. Гибкость процесса формирования электронных потоков, а также процесса обмена энергией между электронами и полями (электрическими и магнитными) в вакууме и веществе лежит в основе действия многих видов электронных устройств, в том числе генераторов электромагнитных колебаний радио и оптического диапазонов частот и электронных ускорителей.

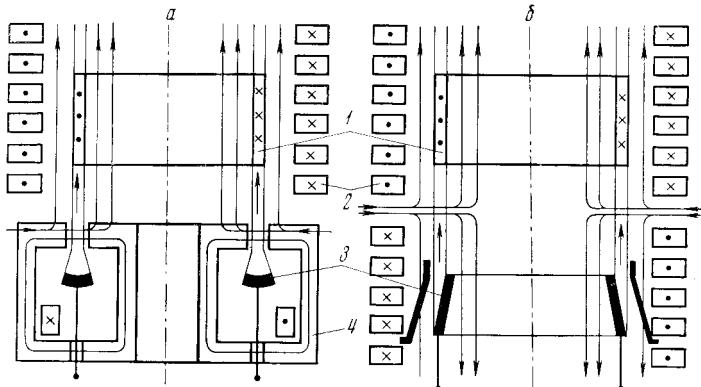


Рис. 1. Схематическое изображение двух вариантов конструкции; *a* — с электронной пушкой Пирса — Харриса, *b* — с магнетронной пушкой. 1 — вращающийся релятивистский электронный кольцеобразный сгусток, 2 — магнитные обмотки, 3 — катод, 4 — магнитопровод. Линии магнитного поля помечены стрелками. Направления токов в обмотках и вращения электронов помечены крестиками и точками

Требования к характеристикам электронных потоков этих устройств постоянно возрастают, особенно в отношении величины тока, плотности тока, а в отдельных случаях и плотности пространственного заряда. В данной статье рассматривается возможность достижения высоких значений всех упомянутых параметров путем формирования отрезков полого потока трубчатой формы и перестройки их во вращающиеся релятивистские электронные кольцеобразные сгустки в магнитном поле соответствующей геометрии. В результате этой перестройки энергия электронов существенно не изменяется, траектории электронов из прямолинейных становятся винтовыми, продольная составляющая скорости электронов уменьшается, осевые размеры электронных цилиндров сокращаются, плотность тока и плотность заряда возрастают.

На рис. 1 схематически изображены два варианта конструкции ⁽¹⁾, действующие по описанному выше принципу; с кольцевой пушкой Пирса — Харриса (*a*), где формирование электронного потока начинается в свободном от магнитного поля пространстве, и с магнетронной пушкой

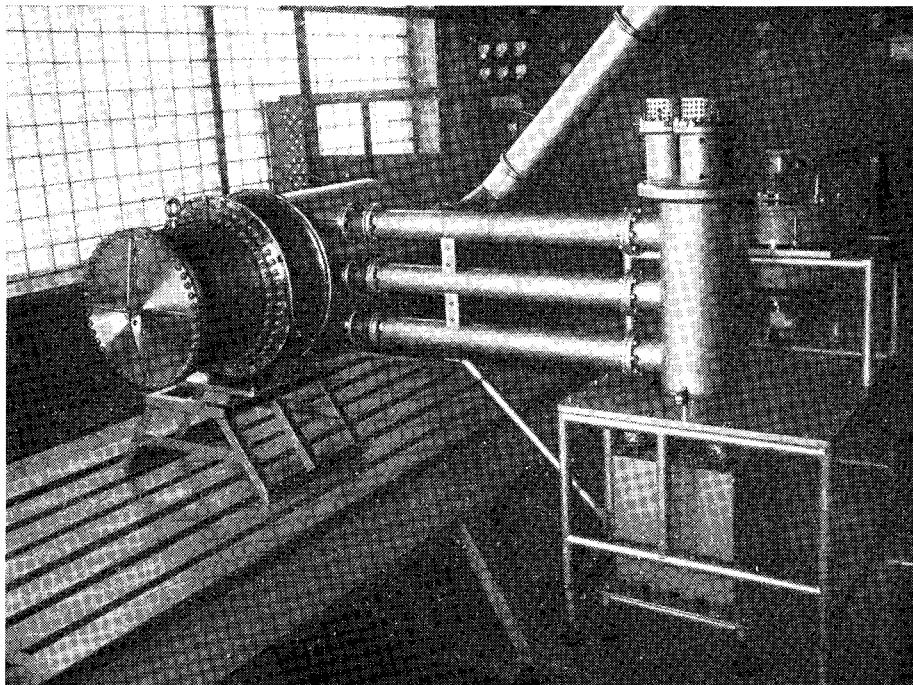


Рис. 2

(б), где формирование потока начинается в аксиальном магнитном поле. Вращение создается за счет пересечения радиального магнитного поля, в первом случае — в зазоре тороидального магнитопровода, во втором случае — в области, где аксиальное магнитное поле изменяет направление. От первого варианта можно ожидать более высокой однородности электронного потока, от второго — более высоких значений тока и плотности.

На рис. 2 показан внешний вид стенда с экспериментальным макетом, который работает при непрерывной откачке, защита удалена. Для повышения производительности вакуумной системы применены три патрубка откачки, которые видны на фотографии. Диаметр кольцеобразного оксидного прессованного катода 400 мм.

Приведем технологические оценки параметров, реализуемые в настоящее время:

Площадь катода	1000 см ²	Удельная эмиссия в импульсе	40 а/см ²
Средний радиус катода	20 см	среднее значение	40 ма/см ²
Длительность импульса	10 нс	Первеанс пушки	10 μ а/в ^{3/2}
Частота посылок	10 ⁵ Гц	Импеданс пушки	62,5 ом
Ускоряющее напряжение	2,5 Мв	Заряд кольцеобразного сгустка	4·10 ⁻⁴ кулон
Ток в импульсе	40 ка	Количество электронов в сгустке	2,5·10 ¹⁵
среднее значение	40 а	Энергия одного сгустка	1 кдж
		Мощность в импульсе	10 ¹¹ вт

Величина мгновенной мощности может быть существенно увеличена путем применения более длинных импульсов, катодов с большей площадью эмитирующей поверхности, а также за счет увеличения плотности тока эмиссии и энергии электронов. Если для конкретной установки средняя мощность окажется чрезмерно высокой, то можно либо перейти к режиму работы сериями импульсов, либо понизить частоту следования сгустков.

Указанная выше высокая частота следования может быть реально получена, если в генераторе импульсного напряжения применить в качестве ключа инжеектор (см., например, ⁽²⁾). Поскольку сопротивление

пушки постоянному току имеет порядок десятков ом, согласующий трансформатор не требуется, ток ключа (равный отношению напряжения, до которого заряжена паковательная линия, к ее волновому сопротивлению) будет иметь тот же порядок величины, что и ток пушки. Следовательно, при разработке инженерона может быть использован катод, совпадающий по размерам с катодом пушки.

Согласно закону сохранения момента обобщенного импульса заряженного тела в магнитном поле, перестройка аксиальных скоростей электронов в азимутальные определяется разностью значений пронизывающего полости электронных цилиндров потока магнитного поля до и после участка, где направление линий этого поля преимущественно радиальное (рис. 1). Для указанных выше значений параметров изменение магнитного потока на величину порядка 10^6 гс·см² приведет к тому, что осевая скорость электронов станет нерелятивистской, продольные размеры первичных, созданных пушкой, цилиндров претерпят существенное сокращение, например, длина их станет соизмеримой с радиусом, и форма вращающихся с релятивистской азимутальной скоростью электронных сгустков станет кольцеобразной.

Разбросы начальных скоростей электронов и погрешности структуры магнитного поля, которые также создают разбросы скоростей, вызывают разгруппировку электронов в процессе дальнейшего движения колец, как следствие этого, деформацию колец. Деформация может быть ослаблена, если непосредственно после приведения сгустков во вращение придавать им, как целым образованиям, ускорение в осевом направлении, что уменьшает относительную величину паразитной модуляции скорости.

Для сохранения азимутального релятивистского вращения электронов необходимо, чтобы движение колец происходило в аксиальном магнитном поле, которое в данном случае должно иметь индукцию порядка 500 гс. Сохранение продольных размеров колец или их сокращение требует приложения внешних электрических полей (например, по методу клистронной группировки), уравновешивающих или превышающих силы расталкивания электронов в продольном направлении. При однородном заполнении тонкостенного цилиндра с радиусом a , длиной L и толщиной стенки Δ электронами (полное число N) максимальное значение этой силы F дается приближенной формулой, справедливой при выполнении условия $\Delta < L \lesssim a$,

$$F = \frac{Ne^2}{\pi La} \left\{ \frac{L^2}{8a^2} \left(2 \ln \frac{16a}{L} - 1 \right) + \frac{1}{\gamma^2} \left(\ln \frac{2L}{\Delta} - 1 \right) \right\},$$

в которой член, содержащий релятивистский фактор $1/\gamma^2 = 1 - \beta_\perp^2$, описывает частичную компенсацию кулоновского расталкивания собственными силами — эффект, отмеченный еще Максвеллом ⁽³⁾, а первый член описывает нескомпенсированную силу, вызванную торoidalностью электронного образования.

Подставляя $N = 2,5 \cdot 10^{15}$, $a = 20$ см, $L = 20$ см, $\Delta = 1$ см, получим, что для компенсации расталкивающей силы F в этом случае требуется внешнее электрическое поле порядка 150 кв/см. Обжимающее действие внешнего поля целесообразно объединить с дополнительным ускорением колец, а ведущее статическое магнитное поле сделать пространственно нарастающим. Тогда все размеры колец будут уменьшаться, а плотность будет возрастать. Вопрос о том, можно ли из колец, у которых $L \sim a$, сформировать тонкие кольца с $L \sim \Delta$, пока не решен. Расчеты, приведенные в работе ⁽⁴⁾, выполнены в одночастичном приближении и не могут служить основанием для определенных выводов. Кольца формата $L \sim \Delta$ нужны для коллективного ускорения положительно заряженных частиц. Следует заметить, что при большом количестве электронов могут оказаться полезными и кольца формата $L \lesssim a$.

Рассматриваемый в данной статье способ создания колец позволяет

строить сильноточные источники релятивистских электронов, а это всегда связано с необходимостью подавления различных видов неустойчивости пучков. Характерная для данного способа симметричность электродов, полей и самих электронных образований на всех стадиях их формирования не способствует появлению возмущений, которые могли бы служить зародышами быстро нарастающих процессов разрушения колец.

Сочетание релятивистского вращения и медленного поступательного движения колец весьма полезно для облучения объектов с малым по отношению к характерной длине электронного взаимодействия осевым размером таких, как тонкие твердые мишени, тонкие слои жидкости, биологической ткани, плазмы. Если в некоторых случаях дискретность электронного потока является неблагоприятным фактором, действие его можно ослабить, помещая объект в области «магнитной горки», где колца тормозятся и пространственно сближаются.

Авторы выражают благодарность И. Я. Гольдштейн, Л. И. Дудоровой, Н. А. Нофису, Н. М. Кристи, О. М. Крутовой, В. П. Осипову, А. П. Паршину, И. А. Стеслицкой, Т. Н. Филимоновой, Ю. С. Черкашину за участие в разработке отдельных вопросов.

Физический институт им. И. Н. Лебедева
Академии наук СССР
Москва

Поступило
1 II 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ А. Л. Минц, Е. Д. Науменко и др., Авт. свид. № 299042, Бюлл. изобр., № 29, 230 (1971). ² Б. А. Подъяпольский, В. К. Попов, Импульсные модуляторные лампы, М., 1967, стр. 16. ³ J. C. Maxwell, A. Treatise on Electricity and Magnetism, 2, Oxford, 1955, № 769, р. 414. ⁴ D. L. Nelson, H. Kim, Тр. VII Международн. конфер. по ускорителям, 2, Ереван, 1970, стр. 540.