Доклады Академии наук СССР
1955. Том 102, № 1

ФИЗИКА

В. М. МОРОЗОВ

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИОННЫЙ ИСТОЧНИК

(Представлено академиком А. П. Александровым 17 XI 1954)

Электростатический генератор ван-де-Граафа с транспортировкой заряда бесконечной изолирующей лентой обладает малым запасом мощности по току. Поэтому при использовании его в качестве ускорителя ионов необходимо стремиться к тому, чтобы ток в ускорительной трубке в основном определялся током необходимых для эксперимента ионов, а токи других ионов были сведены к минимуму. Практический интерес представляет ускорение атомарных ионов, так как ускорение молекулярных и других, более тяжелых ионов, приводит к уменьшению энергии ядерных частиц, ускоренных генератором.

Следовательно, при выборе источника ионов для электростатического генератора следует отдать предпочтение источнику с наибольшим содержанием атомарных ионов в пучке.

Простейшим из таких источников является так называемый высокочастотный ионный источник, в котором для получения ионов используется безэлектродный высокочастотный разряд в газе низкого давления. Большинство описанных в литературе высокочастотных источников работает с большим (10—20 $см^3$/час) расходом газа, что представляется серьезным недостатком для применения их в электростатических генераторах (особенно при использовании больших градиентов на ускоряющей трубке — до 1,5 Мв/м). Действительно, при большом расходе газа, так как откачка длинной ускорительной трубки ограничивается ее диаметром, вакуум ухудшается (давление $> 10^{-5}$ мм рт. ст.); при этом создается большая нагрузка для генератора за счет потока электронов от ионизации остаточного газа ионным пучком и значительно снижается электрическая прочность трубки.

Разработанный нами высокочастотный источник ионов отличается малым расходом газа. Источник, схематическое изображение которого дано на рис. 1, состоит из следующих основных элементов: газоразрядной кварцевой колбы *1* диаметром 50 мм и высотой 90 мм с впаянным внутрь кварцевым воротничком *2*, защищающим катод источника; алюминиевого катода *3*, через аксиальное отверстие которого (капилляр $1{,}1 \times 15$ или $1{,}6 \times 20$ мм) выпускаются ионы из колбы; высокочастотного генератора *4* с частотой ~ 50 Мгц; постоянного магнита *5*, создающего слабое поперечное поле в колбе, и фокусирующей системы *6*.

Из конструктивных особенностей нашего источника следует отметить:

1. Герметический спай кварцевой колбы с инваром мягким припоем, для чего поверхность кварца покрывалась тонким (почти непрозрачным) слоем никеля, получаемым при разложении тетракарбонила никеля на горячей (200°) поверхности кварца в вакууме.

2. Возможность перемещения колбы *1* (при помощи гайки *7* и сильфона *8*) вдоль оси на несколько миллиметров и регулировки тем самым глубины погружения катода в кварцевый воротничек.

Высокочастотный генератор мощностью 80—100 вт собран на двойном лучевом тетроде ГУ-29 со слегка форсированным режимом (850 в, 200 ма). Источник получает энергию (~ 300 вт) от небольшого генератора переменного тока повышенной частоты (~ 600 гц, 400 ва), приводимого во вращение верхним валиком зарядной ленты электростатического генератора.

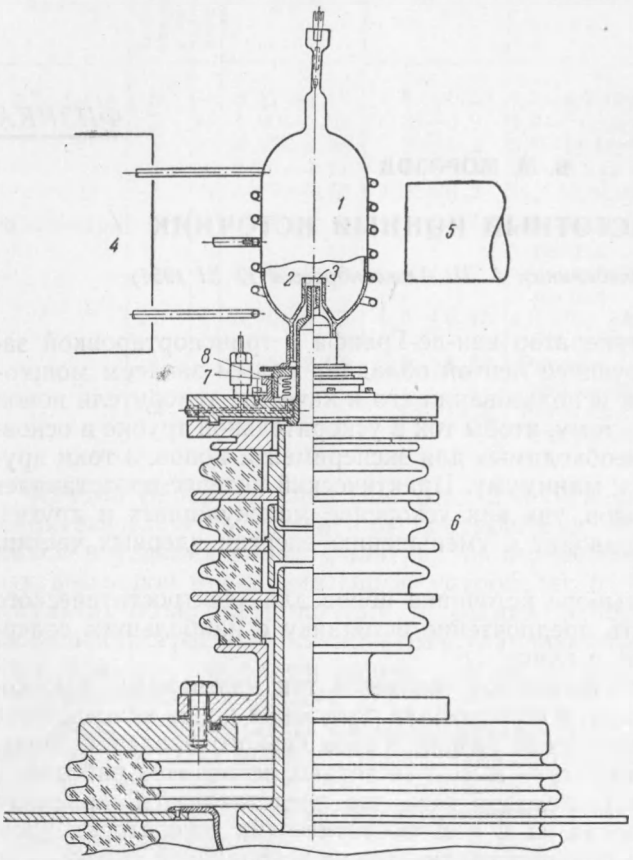


Рис. 1

О механизме работы источника можно сделать следующие заключения. При давлении газа в колбе около 10^{-2} мм рт. ст. (близко к рабочему) мощности примененного нами высокочастотного генератора достаточно для того, чтобы высокочастотный газовый разряд в колбе был обусловлен высокочастотным магнитным полем катушки контура генератора (так называемый кольцевой разряд). Это обстоятельство проверено экспериментально, в частности, оказалось сравнительно легко зажечь таким генератором разряд внутри цилиндрической металлической полости, разрезанной вдоль образующей несколькими узкими щелями так, что электрическое поле катушки не проникает внутрь полости; такой разряд сравним по интенсивности с разрядом в кварцевой колбе. Однако некоторая часть энергии высокочастотного генератора передается в газовый разряд в кварцевой колбе источника также и высокочастотным электрическим полем между концами контурной катушки генератора высокой частоты. Электрическое поле действует только на границах газоразрядной плазмы, где его влияние сводится, к сожалению, скорее к повышению рекомбинации ионов, чем к повышению интенсивности разряда. Электрическое поле катушки вытягивает электроны с поверхности плазмы на стенки колбы; образующиеся вследствие этого отрицательные поверхностные заряды своим полем вытягивают положительные ионы из плазмы и нейтрализуют их. Отрицательные заряды на стенках колбы, повидимому, достаточно велики, так как наблюдается заметное распыление кварца положительными ионами около концов катушки генератора высокой частоты. Введение поперечного магнитного поля затрудняет вытягивание электронов из плазмы высокочастотным электрическим полем и существенно повышает интенсивность разряда в колбе. В то же время поперечное магнитное поле возмущает круговые траектории электронов и снижает интенсивность основной (кольцевой) формы разряда в колбе. Поэтому существует оптимальное поперечное магнитное поле, при котором разряд в колбе имеет

наибольшую интенсивность; поле это (несколько эрстед) подбирается экспериментально.

В нашем источнике колба непосредственно помещена внутрь катушки анодного контура генератора высокой частоты. Такой способ связи является простейшим и, по нашему мнению, обладает рядом достоинств, так как при этом отсутствуют потери в промежуточных контурах, а сам генератор может быть выполнен без органов настройки по частоте, применение которых неизбежно при связи с газоразрядной колбой через промежуточные контуры. Разряд в колбе не является чисто активной нагрузкой для контура, поэтому всякие изменения в разряде приводят к тому, что разонансная частота контура, внутри катушки которого находится колба источника, меняется. Такие изменения в нашем случае (так как генератор высокой частоты содержит единственный контур) не сказываются существенно на режиме генератора.

Режим разряда в источнике регулируется только изменением подачи газа в колбу. Расход газа в максимальном режиме достигает 1—1,5 $см^3$/час при капилляре в катоде размером 1,1 × 15 мм. При работе источника при таких или меньших расходах газа наблюдаются своеобразные колебания разряда по интенсивности с большим периодом (несколько минут), которые весьма медленно затухают и прекращаются примерно через час после пуска источника. Это происходит всегда, когда источник начинает работать с холодной колбой, и связано с тем, что запас газа, поглощенного стенками колбы, велик по сравнению с расходом газа через капилляр. При работе с капиллярами, допускающими большой расход газа, это явление не наблюдается.

Существенное повышение стабильности работы источника получено введением отрицательной обратной связи по поперечному магнитному полю. Связь осуществляется катушкой, надетой на постоянный магнит и включенной в катод генератора высокой частоты так, что повышение катодного тока генератора ослабляет поперечное магнитное поле в колбе; следовательно, всякое самопроизвольное изменение интенсивности разряда в колбе ослабляется соответствующим изменением поперечного магнитного поля.

Вытягивание ионов из плазмы обеспечивается приложенным между анодом и катодом высоким напряжением (2—3 кв), которое практически полностью падает на промежутке катод — верхний торец кварцевого воротничка колбы. Такая система обладает четко выраженным фокусирующим действием. Качество фокусировки существенно зависит от распределения потенциала на стенках и торце кварцевого воротничка. К сожалению, распределение потенциала в некоторой степени зависит от состояния поверхности кварцевого воротничка, который в процессе работы источника постепенно покрывается распыляемым материалом катода. Поэтому характеристики источника (главным образом максимальный вытягиваемый ионный ток) не воспроизводятся при замене распыленного катода новым. Повидимому, этот недостаток можно устранить, металлизировав заранее внутреннюю стенку и торец кварцевого воротничка и, таким образом, фиксируя распределение потенциала в наиболее существенном месте колбы. Однако этот опыт еще не проделан.

Фокусировка вытягиваемых ионов зависит также и от напряжения на аноде колбы, так как при изменении этого напряжения меняется форма и положение границы плазмы в районе кварцевого воротничка колбы. Поэтому существует оптимальное напряжение анода колбы, при котором ток ионов через капилляр катода достигает наибольшего значения.

Выпускаемый через капилляр катода пучок ионов имеет на расстоянии около 200 мм от катода диаметр не более 10 мм. Перед впуском в ускорительную трубку пучок фиксируется одиночной линзой *6*, состоящей из трех коаксиальных цилиндров. На крайние цилиндры (соединенные вместе) подается высокий отрицательный потенцил (5—8 кв). Фокусиров-

ка производится изменением положительного потенциала среднего цилиндра (0—10 кв); при этом ионное изображение отверстия капилляра получается на оси внутри нижнего цилиндра фокусирующей системы. Это изображение иммерсионной линзой, образующейся при входе из фокусирующей системы источника в трубку ускорителя, вторично фокусируется на выходе из ускорителя. Фокусировка пучка в ускорителе в целом облегчается тем, что трубка ускорителя практически не обладает фокусирующим действием, так как поле на оси трубки весьма близко к однородному.

Длительная эксплуатация на электростатическом генераторе показывает, что типичными параметрами нашего источника являются: расход газа 1—1,5 $см^3$/час, атомарная компонента в пучке до 85% от полного тока пучка; ток атомарных ионов на выходе из ускорительной трубки достигает 80 μа при капилляре 1,1 × 15 мм и превышает 100 μа при капилляре 1,6 × 20 мм. На выходе из генератора пучок может быть сфокусирован до диаметра 1 мм и менее.

Колбу источника приходится очищать (раствором щелочи) от распыленного алюминия не чаще одного раза за 300 час. работы источника; при этом обычно приходится менять и сильно распыленный катод.

В процессе работы для изменения тока в ионном пучке у источника регулируется только подача газа в колбу, анодное напряжение колбы и фокусирующий потенциал линзы источника. Опыт показывает, что этих трех регулировок вполне достаточно для нормальной эксплуатации источника.

Институт физических проблем им. С. И. Вавилова
Академии наук СССР

Поступило
15 XI 1954