

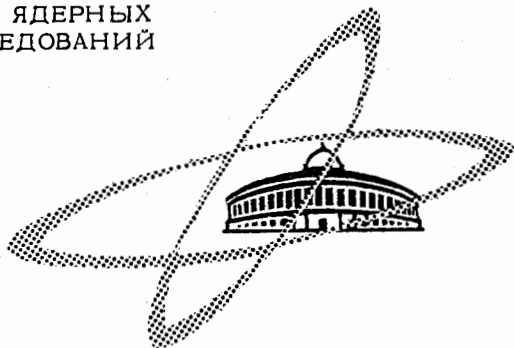
1740

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1740



И.В. Кожухов, Ю.В. Муратов, В.П. Рашевский,  
П.И. Рыльцев, В.П. Саранцев, Е.В. Смирнов

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ПУШКИ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ  
ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

1964

Для проведения целого ряда физических исследований требуется источник электронов с большим пиковым значением электронного тока (150–200 а) при сравнительно небольших энергиях (до 1 Мэв).

Задача получения подобных токов до настоящего времени является технически трудно осуществимой. Электронные пушки, используемые в клистронах, представляют собой сложные электронные устройства и, как правило, срок службы катодов этих пушек резко ограничен.

После рассмотрения известных методов получения электронных пучков с большим пиковым током было решено создать электронную пушку на базе искрового плазменного источника, разработанного в Физико-техническом институте Гр. АН ССР<sup>1,2/</sup> и успешно применявшегося для получения пучков многозарядных ионов. Авторами была исследована возможность использования такой пушки для получения больших электронных токов.

## 1. Первый вариант источника с использованием постоянного ускоряющего напряжения

### § 1. Описание источника

Источник электронов (рис. 1, 2) представляет собой систему из трех электродов: разрядного (1), диафрагмы (5) и отсасывающего (6), смонтированных на двух дисках из нержавеющей стали. На разрядный электрод (1), изготовленный из вольфрамового стержня  $\varnothing 3$  мм, надевается плексигласовая трубочка (4) (рабочее тело) и пружина (8), при помощи которой трубка (4) подается в рабочий зазор по мере ее сгорания. Разрядный электрод находится внутри фарфоровой трубки (3), которая обеспечивает необходимую электрическую изоляцию. Диаметр отверстия диафрагмы, изготовленной из вольфрама, равен 1 мм. Для улучшения условий отсоса и для лучшей фокусировки отсасывающим полем установлен промежуточный электрод – катод (2), изолированный от земли. Изоляция рассчитана на рабочее напряжение 25–30 кв. Отсасывающий электрод изготовлен в форме цилиндра из нержавеющей стали и находится под потенциалом земли.

В момент подачи на разрядный электрод посредством разрядника потенциала +17 кв между разрядным электродом и диафрагмой развивается искровой разряд, который вызывает испарение рабочего тела. При испарении плексигласа в камере (7)

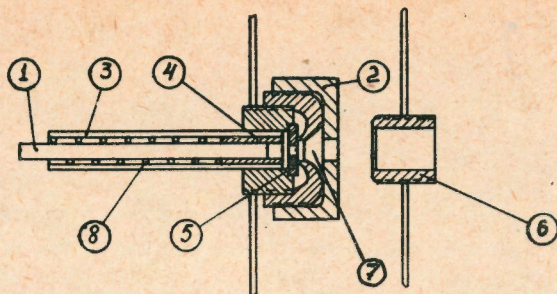


Рис. 1. Конструкция источника. 1-электрод, 2-катод, 3-фарфоровая трубка, 4-рабочее тело, 5-диафрагма, 6-отсасывающий электрод, 7-камера, 8-пружина.

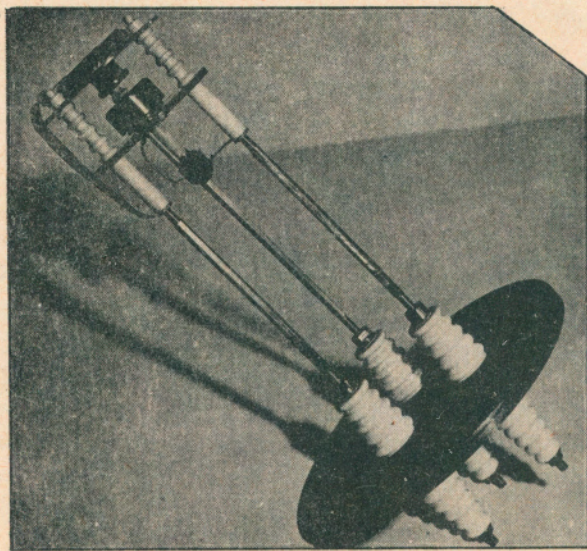


Рис. 2. Внешний вид источника на испытательном стенде.

образуется плазма, которая за счет разности давлений в камере и вакуумном объеме попадает в рабочий зазор. Здесь под действием электрического поля происходит вытягивание из плазмы электронов.

## § 2. Схема питания источника

Питание источника осуществляется одним выпрямителем, причем на диафрагму подается - 25 кв, а с делителя снимается 17 кв, которые подаются на рабочий электрод разрядника. Схема питания приведена на рис. 3. Для срабатывания источника необходимо подать на поджигающий электрод разрядника импульс около 5 кв. При этом происходит пробой разрядника, возникновение искрового разряда между разрядным электродом и диафрагмой, испарение рабочего тела и образование плазмы. Поджигающий импульс на разрядник снимается с разделительного импульсного трансформатора на ферритовом сердечнике. На первичную обмотку трансформатора от схемы запуска подается запускающий импульс порядка 1,5 кв. Частота следования запускающих импульсов 0,3 гц и ниже.

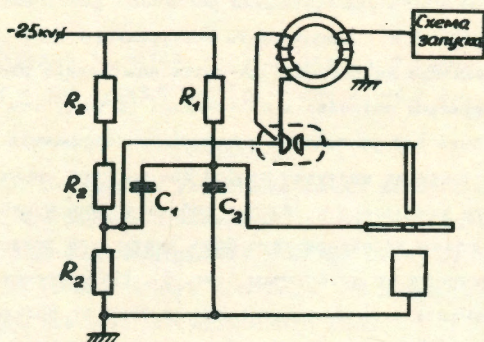


Рис. 3. Схема питания источника.

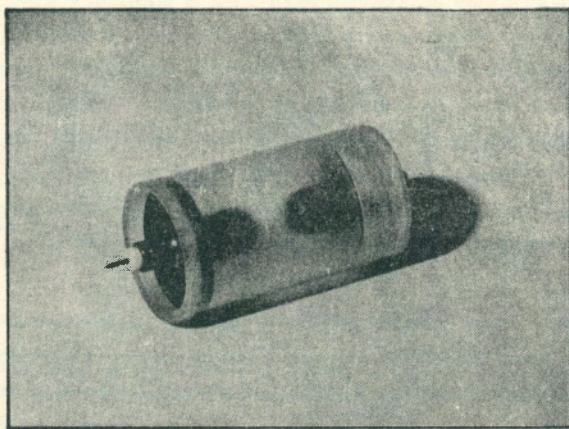


Рис. 4. Разрядник

В схеме используется разрядник типа тригatron (рис. 4). Рабочие электроды, имеющие форму полушарий, ввернуты с торцов цилиндра. Один из рабочих электродов имеет отверстие по оси  $\delta$  3 мм, через которое на фторопластовом изоляторе пропущен поджигающий электрод. Зазор между поджигающим и рабочим электродами составляет 2 мм. Зазор между рабочими электродами выбирался в зависимости от напряжения, подаваемого на разрядный электрод источника.

### § 3. Выбор основных параметров источника.

Для выбранной конструкции источника были проведены исследования влияния основных параметров источника на величину электронного тока. В частности, для фиксированного значения напряжения отсоса были сняты зависимости электронного тока от величины разрядного напряжения. Для различных расстояний от катода до отсасывающегося электрода ( $h$ ) зависимость электронного тока от величины разрядного напряжения представлена на рис. 5. При этих измерениях расстояние от разрядного электрода до диафрагмы оставалось постоянным (3 мм), чем и объясняется спад величины электронного тока при увеличении разрядного напряжения выше 16 кв. При больших разрядных напряжениях наступал пробой воздушного промежутка разрядный электрод-диафрагма, что уменьшало испарение рабочего тела и плотность плазмы падала. Подобные разрядные характеристики были сняты для разных значений расстояний разрядного электрода от диафрагмы (рис. 6). На основании кривых рис. 5 можно построить зависимость величины электронного тока от величины зазора ( $h$ ) (рис. 7). Из рис. 7 видно, что при выбранном значении напряжения отсоса и диаметра диафрагмы электронный ток растет с увеличением зазора, достигая максимума

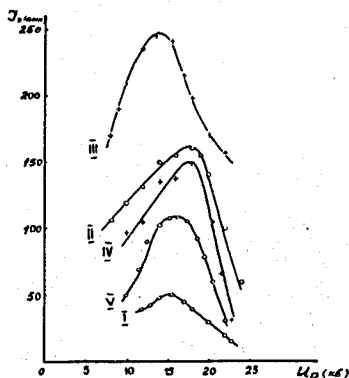


Рис. 5. Кривые  $I = f(U_p)$ . I - для  $h = 6,5$  мм, II - для  $h = 7,3$  мм, III - для  $h = 8,2$  мм, IV - для  $h = 11$  мм, V - для  $h = 14$  мм.

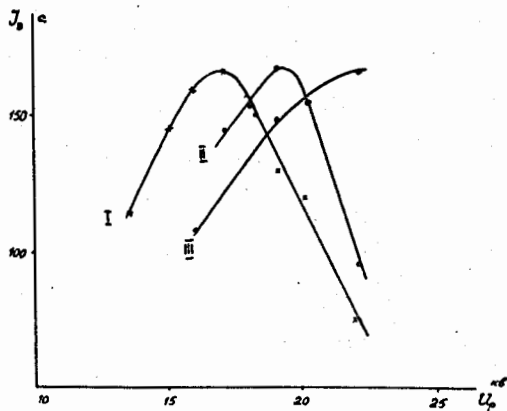


Рис. 6. Кривые  $J_e = f(U_p)$ . I для  $h_1 = 3$  мм, II - для  $h_1 = 3,5$  мм, III - для  $h_1 = 4,2$  мм.

при зазоре 8,2 мм. Дальнейшее увеличение зазора ведет к падению величины электронного тока, что связано с падением величины напряженности отсасывающего поля. Уменьшение величины электронного тока при малых зазорах объясняется провисанием плазмы до отсасывающего электрода, что в свою очередь ведет к уменьшению эффективного значения отсасывающего поля.

Были также измерены зависимости электронного тока от отсасывающего напряжения. Чтобы избежать подсадки напряжения и, следовательно, искажения результатов измерения, величина емкости на отсосе выбиралась на порядок выше емкости разряда. На рис. 8, 9 даны эти зависимости для характерных величин зазора отсасывающий электрод - диафрагма (кривые I). Для сравнения на этих же рисунках даны зависимости  $I \approx U^{3/2}$  (кривые II). Из рисунков видно, что при малых зазорах рост величины электронного тока в зависимости от напряжения отсоса не подчиняется закону  $I \approx U^{3/2}$ , что объясняется провисанием плазмы в отсасывающий промежуток. Для больших зазоров наблюдается достаточно хорошее согласие с законом  $I \approx U^{3/2}$ , по крайней мере, в выбранном интервале отсасывающего напряжения.

Существенное влияние на величину электронного тока имеет диаметр диафрагмы. Уменьшение величины диафрагмы ведет к резкому ослаблению электронного тока. Большие величины диафрагмы требуют перехода к большим расстояниям до отсасывающего электрода и к большим напряжениям отсоса.

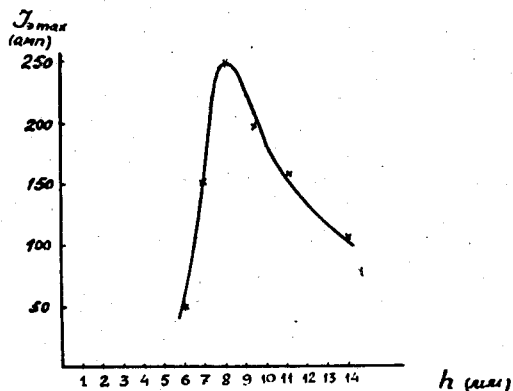


Рис. 7. Кривая  $I_{\max} = f(h)$ .  $U_g = 25$  кв.

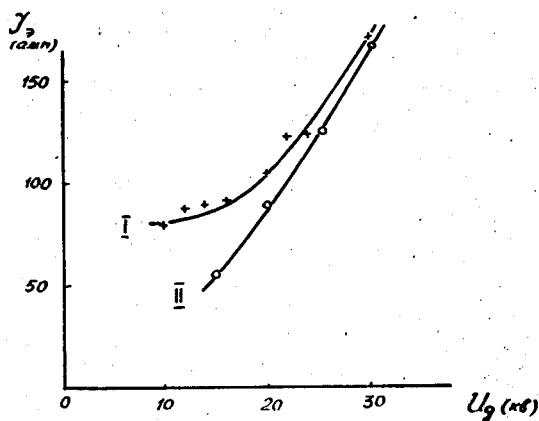


Рис. 8. Кривая  $I = f(U_g)$   $U_p = 15,5$  кв;  $h = 6,5$  мм.  
 I - экспериментальная кривая, II - зависимость  $I = U^{3/2}$

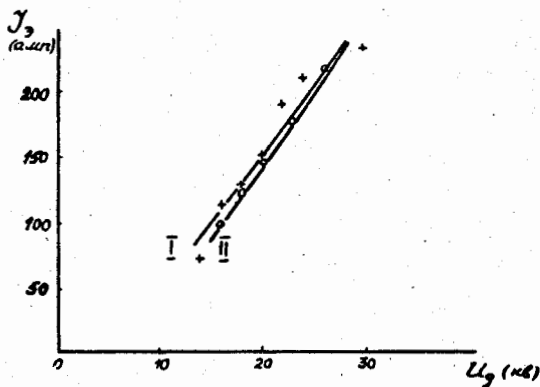


Рис. 9. Кривая  $I = f(U_p)$   $U_p = 16$  кв;  $h = 8,5$  мм  
 I - экспериментальная кривая, II - зависимость  $I = U^{3/2}$

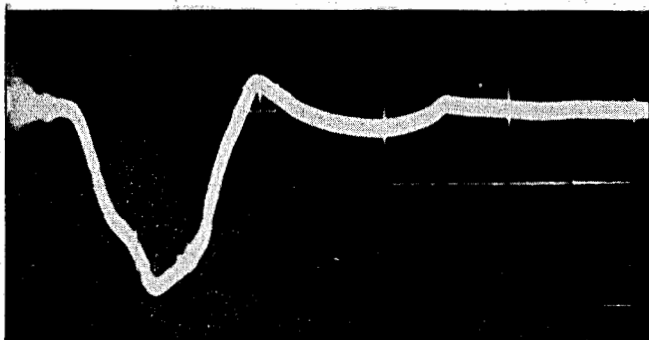


Рис. 10. Импульс электронного тока.

В результате подбора оптимальных параметров источника был получен электронный ток - 200 а (рис. 10). Длительность токового импульса составила 0,15-0,2 мсек. При измерении коротких по времени и больших по величине значений электронного тока возникает целый ряд трудностей, связанных с правильным выбором измерительных сопротивлений и влиянием индуктивностей подводящих проводов. В данном случае положение осложнялось очень высоким уровнем наводок от разрядного тока, и поэтому принципиальное значение имела хорошая экранировка. Чтобы избежать ошибок в измерении, нами было опробовано несколько конструкций измерителей. На рис. 11, 12, 13 показаны различные конструкции цилиндров Фарадея, в которых для запираания электронов вторичной эмиссии применялись как электрические, так и магнитные поля.



На рис. 13 показана конструкция цилиндра Фарадея, применяемого для измерения величины электронного тока в зависимости от сечения пучка. Для этого на цилиндре имелась переменная диафрагма, величина которой изменялась без нарушения вакуума. Все измерители можно было перемещать как в продольном, так и в поперечном по отношению к пучку направлениях без нарушения вакуума.

Для надежности полученных результатов были проведены измерения также с несколькими вариантами пояса Роговского, который помещался как непосредственно на отсасывающий электрод, так и дальше — по направлению движения пучка.

Пояс Роговского применялся также для измерения разрядного тока и импульса отсасывающего напряжения. Во всех случаях обеспечивалась экранировка пояса от

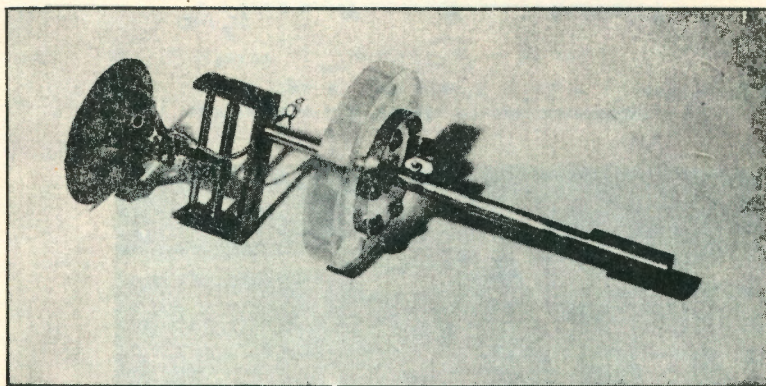


Рис. 11. Измеритель.

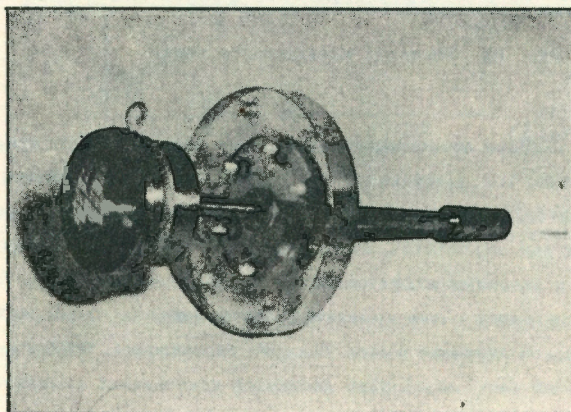


Рис. 12. Измеритель.

высокочастотных наводок. Особое внимание при измерениях уделялось выбору конструкции измерительных сопротивлений при работе с цилиндрами Фарадея. Кроме опытных сопротивлений типа УЛИ, применялись специально изготовленные сопротивления. В частности, силовое сопротивление изготовлялось в виде трубки, к одному концу которой подпаивалась оплетка высокочастотного кабеля. Жила кабеля проходила внутри трубки и подпаивалась к другому ее концу. Такая конструкция существенно снижала индуктивность измерительной цепи. Для измерений применялись также коаксиальные шунты. Все это позволило получить надежные результаты при измерениях величины и формы тока. Фотография тока дана на рис. 10.

Используемый для ускорения электронов резонансный трансформатор обладает сравнительно малым запасом мощности и не может обеспечить ускорение длительных по времени и больших (100а) значений электронного тока без заметного изменения энергии ускоряемых электронов. В нашем случае для получения 5% разброса по энергии в пучке электронов с током в 100 а длительность импульса тока должна составлять  $10^{-8}$  сек. Это накладывает серьезные требования на источник. Источник должен достаточно точно привязываться к фазе высокочастотного напряжений ( $5 \times 10^{-9}$  сек) и обладать крутым передним фронтом нарастания тока. Эти требования существенно снижают возможность использования источника, описанного выше, так как скорость нарастания величины электронного тока определялась скоростью образования плазмы. Поэтому получить длительность фронта нарастания электронного тока меньше  $50 \times 10^{-9}$  сек оказалось невозможным. Кроме того, при работе источника наблюдалась нестабильность амплитуды электронного тока.

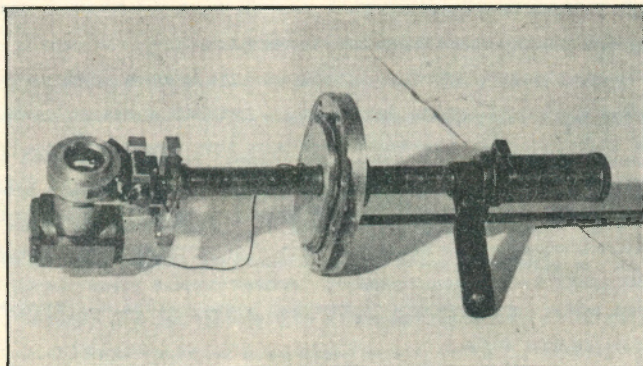


Рис. 13. Измеритель

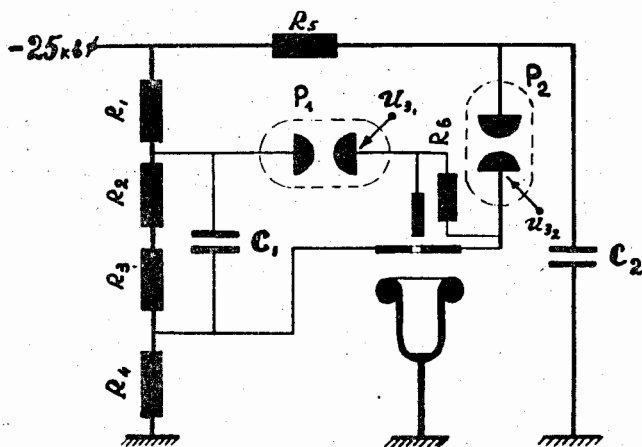


Рис. 14. Схема импульсного питания отсоса.

Если вернуться к описанию работы источника, то нетрудно будет понять, что постоянно действующее отсасывающее поле отсасывает электроны не только в момент максимального плазмообразования, но и в начальный момент, когда электронов в плазме еще очень мало. Этим как раз и объясняется малая крутизна переднего фронта токового импульса.

Поэтому для устранения указанных выше недостатков было предложено производить отсос электронов из разогретого участка плазмы с установившимися параметрами. Такой режим отсоса электронного тока был осуществлен подачей импульсного отсоса, задержанного относительно разрядного тока.

Импульсное питание отсоса осуществляется по схеме, показанной на рис.14. Напряжение конденсатора  $C_2$  через управляемый разрядник  $P_2$  подавалось на безиндуктивное нагрузочное сопротивление, подключенное параллельно промежутку анод-катод. Емкость  $C_2$  выбиралась из расчета получения длительности импульса электронного тока порядка  $2 \times 10^{-7}$  сек. Поджиг разрядника  $P_2$  осуществлялся через управляемую схему задержки. В остальной части схема аналогична схеме, изображенной на рис.3.

Применение импульсного отсоса обеспечило возможность значительно повысить градиент отсасывающего поля.

Конструктивные параметры источника с импульсным отсосом остались те же, что и при питании отсоса постоянным напряжением, поэтому при выборе оптимального рабочего режима источника использовались характеристики, приведенные выше. Дополнительно снята зависимость (рис.15) электронного тока от времени задержки отсасывающего напряжения относительно разрядного тока. Хорошо видно, что ток достигает

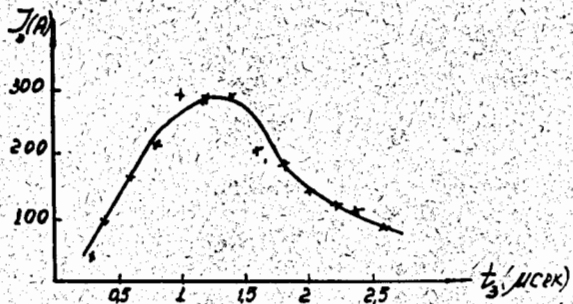
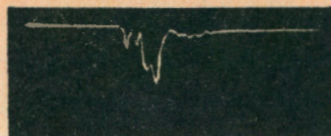


Рис. 15. Кривая  $I_{э} = f(t_{зд})$ .

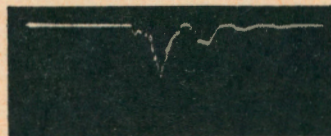
максимальной величины при задержке  $1,6 \cdot 10^{-6}$  сек. На рис. 16 показаны импульсы тока, снятые при различных временах задержки вблизи оптимума. На рис. 17 показаны разрядный ток, импульс отсоса, задержанный относительно разряда и отсасываемый электронный ток.

При импульсном отсосе крутизна переднего фронта импульса тока определяется крутизной переднего фронта импульса отсоса.

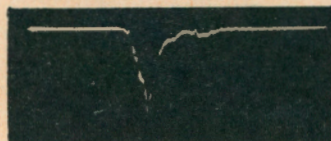
Импульс отсоса в рабочем режиме, а следовательно, и импульс тока имеют некоторые искажения, которые объясняются наличием индуктивных сопротивлений подводящих проводов и емкости монтажа, поэтому для работы желательно иметь источник импульсов отсоса с минимальным волновым сопротивлением порядка 1-5 ом. В приведенной схеме в качестве источника импульсов отсоса используются емкости, которые, как правило, имеют собственную индуктивность. Были проведены исследования влияния различных типов конденсаторов в цепи отсоса на форму импульса тока. На рис. 18 показаны импульсы тока для трех различных конденсаторов в цепи отсоса. Видно, что если конденсаторы типа ФГТИ и КВ (6,в) позволяют получить  $\tau \sim 150 - 200$  нсек, то конденсатор типа КОБ-3<sup>19/</sup> - 10 нсек. С целью получения более длинных импульсов электронного тока с данной конструкции источника отсасывающий импульс подавался с искусственной формирующей линии (рис. 19), имеющей волновое сопротивление  $\sim 8$  ом. Амплитуда импульса была равна 20 кв и определялась номиналом емкостей. Исследование возможности получения максимального электронного тока производилось по схеме, показанной на рис. 19. Снималась зависимость электронного тока от величины отсасывающего напряжения; при этом отмечалась закономерность  $I \sim U^{3/2}$ . Максимальный электронный ток 800 а был получен при напряжении



$t_{\text{зад}} = 1 \text{ мсек}$



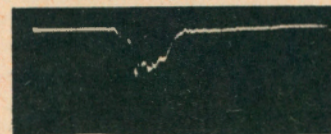
$t_{\text{зад}} = 1,2 \text{ мсек}$



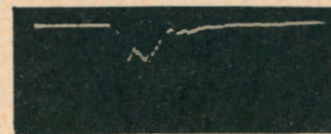
$t_{\text{зад}} = 1,4 \text{ мсек}$



$t_{\text{зад}} = 1,6 \text{ мсек}$



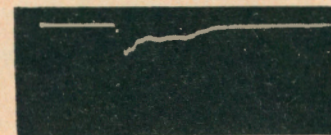
$t_{\text{зад}} = 1,8 \text{ мсек}$



$t_{\text{зад}} = 2,0 \text{ мсек}$



$t_{\text{зад}} = 2,2 \text{ мсек}$



$t_{\text{зад}} = 2,4 \text{ мсек}$

Рис. 16. Осциллограммы импульсов электронного тока.

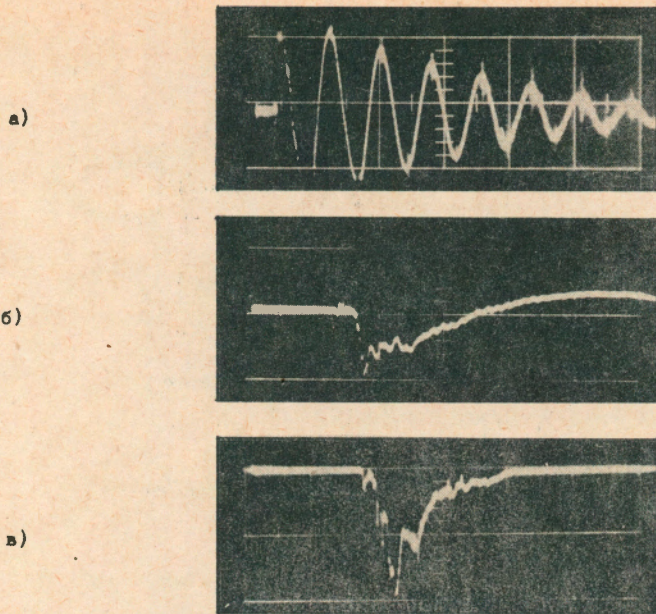


Рис. 17. а) разрядный ток  $t_p = 500$  нсек/см. б) импульс отсоса  $t_p = 200$  нсек/см.  
в) импульс тока  $t_p = 200$  нсек/см.

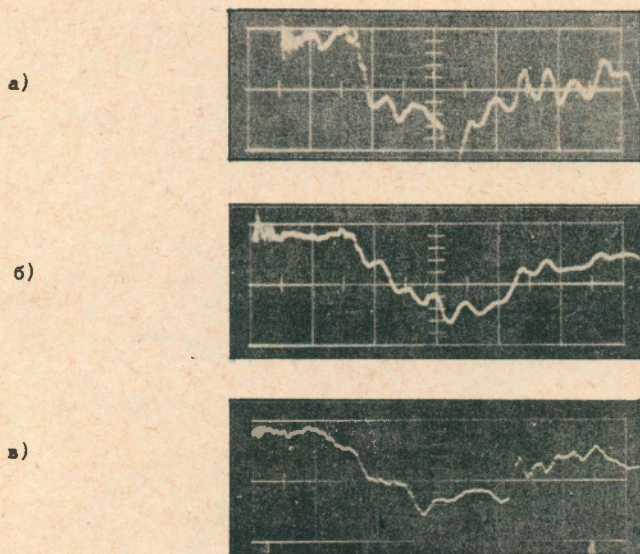


Рис. 18. а)  $C_{отс} = 10000$  пф (КОБ-3), б)  $C_{отс} = 10000$  пф (КВ-10),  
в)  $C_{отс} = 10800$  пф (ФГТИ)  $t_p = 100$  нсек/см.

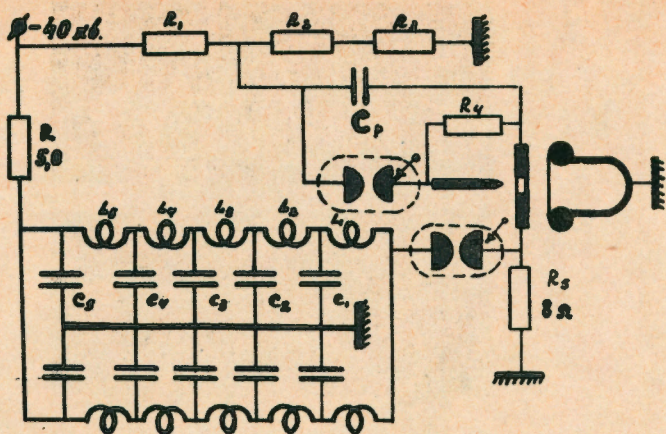


Рис. 19. Схема питания источника с формирующей линией.

отсоса 60 кв. С ростом амплитуды тока форма импульса искажается, что объясняется недостаточной величиной емкостей разряда и отсоса. При увеличении емкостей форма импульса восстанавливается. При увеличении разрядной емкости оптимальный участок плазмы смещается в сторону больших времен.

Проведенные исследования показали возможность получения электронных токов при помощи искрового источника 1000 и более ампер с длительностями до  $10^{-6}$  сек.

В заключение авторы благодарят П.Ф. Черняева, внесшего большой вклад в создание экспериментальной установки.

#### Л и т е р а т у р а

1. А.А.Плютто, К.Н.Кервалидзе, И.В.Кварцхава, "Искровой источник многозарядных ионов". Атомная энергия, т. III, № 8, 158, 1957.
2. А.А.Плютто, "Ускорение положительных ионов в расширяющейся плазме вакуумных искр", ЖЭТФ, 39, 1589, 1960.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 июня 1964 г.