

B 38 1.1
B. 25-

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ УСКОРЕНИЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

ТРУДЫ
ЧЕТВЕРТОГО ВСЕСОЮЗНОГО
СОВЕЩАНИЯ
ПО УСКОРИТЕЛЯМ
ЗАРЯЖЕННЫХ
ЧАСТИЦ

(Москва, 18—20 ноября 1974 г.)

Том I



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1975

49. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ (Новосибирск) ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ

С.Б. В а с с е р м а н, И.В. К а з а р е з о в, В.Ф. К у ц е н к о,
В.М. Р а д ч е н к о, Н.Г. Х а в и н, Б.И. Я с т р е б а
Институт ядерной физики Сибирского отделения АН СССР

Импульсные ускорители электронов с высоковольтным генератором на связанных контурах, формирующих импульс напряжения с одновременной его трансформацией, - ускорители типа ЭЛИТ - разрабатываются в Институте ядерной физики с 1965 года. Первый ускоритель этой системы (ЭЛИТ-1) был построен в 1966 году [1,2]. В последующие годы для нужд института, а также для различных организаций в СССР и за границей был создан еще ряд установок с энергией электронов в диапазоне 0,5-2,5 МэВ [3-4]. В последние годы интенсивно проводилась работа по получению на импульсных ускорителях средней мощности в электронном пучке порядка 5-10 кВт. Такие мощности были получены в 1973 г., и в дальнейшем проводились и проводятся длительные испытания машин; основное внимание обращено на вопросы обеспечения высокой надежности ускорителей, предназначенных, в частности, для использования в промышленности.

В докладе описаны три модификации ускорителей типа ЭЛИТ и приводятся результаты испытаний. Основные параметры машин: ЭЛИТ-0,8 А - энергия электронов 0,8 МэВ, импульсный ток 10 А, средняя мощность 0,8 кВт; ЭЛИТ-1Б - 1,2 МэВ, 30 А, 4,5 кВт; ЭЛИТ-2 - 1,7 МэВ, 30 А, 10 кВт.

Упрощенная схема ускорителя и импульсы напряжения и тока пучка показаны на рис. 1.

На рис.2 представлена конструкция ускорителя ЭЛИТ-2. Основные узлы ускорителя помещены в котел I, заполненный сжатым газом (SF_6 - 15 атм). Размеры отдельных узлов ускорителя и зазоров между ними выбирались с учетом обеспечения необходимого уровня электрической прочности, а также коэффициента индуктивной связи контуров, равного во всех рассматриваемых ускорителях 0,6.

Первичная обмотка имеет 5 витков и охлаждается водой. Вторичная обмотка наматывается на каркас из оргстекла и имеет 800 витков. Для подведения мощности к блоку 8 обмотка делается двухслойной. Оба слоя имеют одинаковое число витков и соединены параллельно по импульсному напряжению. Со стороны земли к ним подсоединяется источник напряжения 50 Гц, 750 В. Ускорительная трубка собрана из эпоксидных изоляторов, уплотненных с электродами уплотнителями из вакуумной резины. Вся трубка стянута стержнями из оргстекла. К половине электродов (через один) крепятся магнитные линзы. В первых линзах, где для удовлетворительного согласования электронной пушки с ускорительным каналом требуются относительно более высокие магнитные поля, используются кольцевые магниты из $SrCo_5$. Вакуум в ускорительной трубке создается магниторазрядным насосом НОРД-250, работающим через азотную ловушку.

В настоящее время для ускорителя ЭЛИТ-2 разработана и подготовлена к испытаниям ускорительная трубка из ситалловых изоляторов, уплотненных с электродами индием. Испытание вакуумной плотности макета трубки при многократном нагружении внешним давлением газа до 8 атм прошли успешно.

Ускорительная трубка машины ЭЛИТ-1Б по конструктивной схеме повторяет трубку ЭЛИТ-1 [1]. В ускорителе ЭЛИТ-0,8А используется керамическая трубка из материала 22ХС. Соединение колец с электродами осуществляется термокомпрессионной свар-

кой [5]. В текущем году разработан значительно улучшенный вариант конструкции такой трубки. При общей высоте 40 см трубка (без пучка) выдержала без пробоев испытание импульсным напряжением с амплитудой 1,5 МВ, с длительностью импульса 7 мксек и частотой следования импульсов 50 Гц в течение 2 часов.

В трубках всех ускорителей типа ЭЛИТ поверхность изоляторов (как органических, так и неорганических) с вакуумной стороны выполняется ребристой, что по сравнению с гладкими изоляторами позволяет получить в 1,5-2 раза более высокую электрическую прочность. Катоды электронных пушек ускорителей сделаны из таблеток LaB_6 . Выпускные устройства ускорителей имеют сканирующую развертку, осуществляющую смещение каждого импульса относительно предыдущего вдоль выпускного окна.

Важной частью ускорителя является коммутирующее устройство первичного контура. В первых ускорителях первичный контур размыкался после первого цикла колебаний, при этом осуществлялся режим рекуперации энергии. Такой режим достигался применением специальных мер [6]. Однако, неполное использование в этом режиме мощности тиратронов, усложнение обслуживания коммутатора и пониженная надежность его не позволили применить эту схему в описываемых ускорителях. Для ускорителей ЭЛИТ-1Б и ЭЛИТ-2 разработана схема тиратронно-диодного коммутатора с балластным сопротивлением в цепи обратного тока (рис. 3а). Последнее рассеивает оставшуюся после рабочего цикла энергию; амплитуда рабочей полуволны уменьшается незначительно, а последующие колебания становятся сильно затухающими. Длительные испытания коммутатора показали его хорошие эксплуатационные качества. Для ускорителя ЭЛИТ-0,8А разработан и испытан коммутатор с рекуперацией по схеме, представленной на рис. 3б. В этой схеме обратный ток первичного контура заряжает дополнительную емкость. Между импульсами энергия из дополнительной емкости перекачивается через перезарядный дроссель в основную. Таким образом; схема позволяет как и в случае размыкания первичного контура иметь высокий к.п.д. установки. Целесообразность использования этой схемы в более мощных по сравнению с ЭЛИТ-0,8А ускорителях требует дополнительного изучения.

Ускорители испытаны как в режиме большой средней мощности, так и в режиме максимальной импульсной мощности. Для режима большой средней мощности параметры приведены в таблице .

Параметры ускорителей в режиме большой средней мощности

Параметр	ЭЛИТ-0,8А	ЭЛИТ-1Б	ЭЛИТ-2
Средняя энергия электронов в импульсе, МэВ	0,8	1,1	1,5
Разброс энергии, %	10	10	15
Средний ток пучка, мА	1	4	7
Средняя мощность, кВт	0,8	4,5	10
Импульсный ток, А	10	17	20
Длительность имп., мксек	1	2,5	3,5
Импульсная мощность, МВт	8	20	30
Высота/диаметр котла, м	0,6/0,4	0,9/1	1,6/1
Размеры шкафов электропитания, м и их количество, шт	<u>0,8x0,8x1,6</u> 1	<u>0,6x0,9x1,8</u> 2	<u>0,6x0,9x1,8</u> 3

Длительные испытания ускорителя ЭЛИТ-0,8А будут проведены с описанной выше трубкой новой конструкции. Ускоритель ЭЛИТ-1Б при средней мощности пучка 4+5 кВт испытан в течение 1000 час при двух- и трехсменной работе. Период непрерывной работы ускорителя определяется сроком службы электронной пушки. За время прого-

на машины вышло из строя 3 пушки (после 200, 510 и 930 час. работы ускорителя). Ускоритель ЭЛИТ-2 в режиме 10 кВт средней мощности проработал около 200 час. В этом ускорителе пушка заменялась каждые 40+50 час. из-за появления трещин в таблетке эмиттера. Возможные причины этого явления обсуждаются ниже.

На ускорителях достигнуты следующие импульсные параметры: ЭЛИТ-1Б - ток до 30 А, энергия электронов до 1,2 МэВ, длительность импульса (регулируемая с пульта) $30 + 1000$ нсек; ЭЛИТ-2 - ток до 30 А, энергия электронов до 1,7 МэВ при длительности импульса 2 мсек. На несколько модернизированной установке ЭЛИТ-1Б проводятся эксперименты по работе с током пучка около 100 А при длительности импульса 200 нсек.

Опыт разработки, испытаний и эксплуатации ускорителей типа ЭЛИТ показывает, что эти машины могут успешно использоваться как инжекторы и для других экспериментальных целей, а также в некоторых промышленных процессах, особенно там, где важным фактором наряду с определенной средней мощностью является высокая импульсная мощность.

В настоящее время основным ограничением роста средней мощности ускорителей представляется ионная бомбардировка катода, которая, по-видимому, объясняет появление радиальных трещин в катоде при средних токах пучка выше некоторой величины (в ЭЛИТ-1Б - 4,5+5 мА, в ЭЛИТ-2 - 3,5+4 мА). Оценки показывают, что плотность энергии, выделяемая ионным пучком в центре катода, составляет несколько десятков Вт/см². Температурные напряжения, которые при этом возникают в катоде, могут быть достаточными для разрушения таблетки. Проводимая в институте работа по замене ускорительных трубок из органических материалов на керамические (или ситалловые) позволит значительно улучшить вакуум внутри трубки и, соответственно, поднять допустимый предельный средний ток электронного пучка.

Конструирование описанных установок осуществлялось Г.С.Крайновым, В.М.Долгушиным, Н.И.Сапутиным, Е.И.Похлебениным и Р.А.Немировской.

Изложенные в докладе работы ведутся под руководством директора института академика Г.И.Будкера. Большой интерес и внимание к этим работам проявляет академик А.Н.Скринский.

Л и т е р а т у р а

1. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман. Атомная энергия, 23, вып.7, (1967).
2. С.Б.Вассерман. Кандидатская диссертация (1967)
3. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин, А.А.Егоров, И.В.Казарезов, А.В.Филипченко, Г.И.Яснов. Труды УП межвузовской конференции по электронным ускорителям в г.Томске. (1970).
4. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, А.А.Егоров, И.В.Казарезов, А.И.Крючков, Е.П.Любавин, В.М.Радченко, И.Л.Черток. Труды конференции МАГАТЭ в Мюнхене по промышленному применению мощных источников радиации (1970).
5. О.А.Бельтюков и др. Сб. "Электровакуумные и газоразрядные приборы", сер.4, вып.8, (1972).
6. А.А.Егоров, В.С.Панасюк, С.М.Ширкин. ПТЭ (1968).

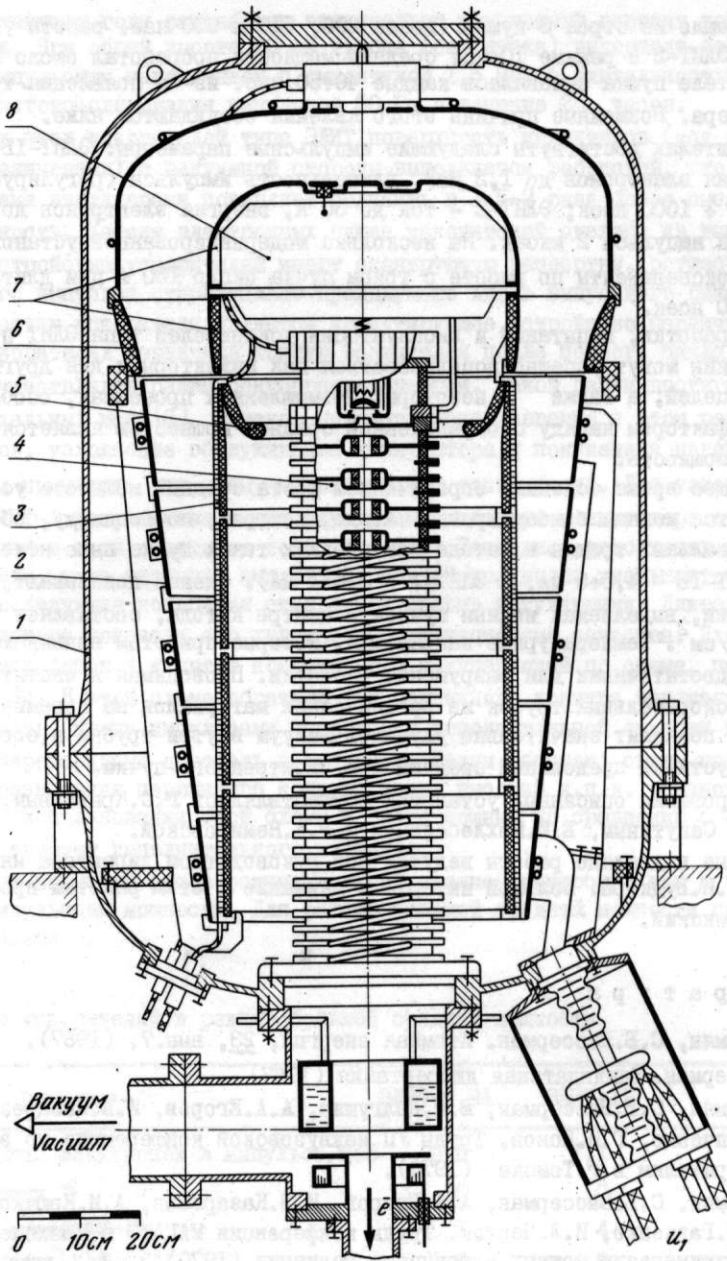


Рис. 2. Конструкция ускорителя ЭЛИТ-2

1 - котел; 2 - первичная обмотка; 3 - вторичная обмотка; 4 - ускорительная трубка; 5 - защитный электрод; 6 - электрод, экранирующий край первичной обмотки; 7 - высоковольтный электрод; 8 - блок управления электронной пушкой

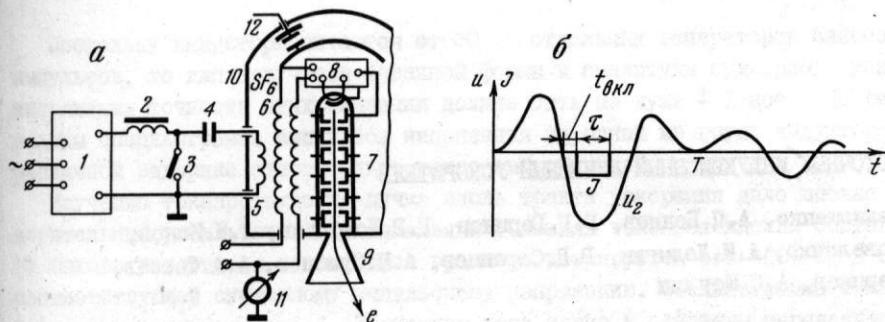


Рис. 1. Схема ускорителя ЭЛИТ (а) и кривые напряжения на трубке и тока пучка (б)

1 - выпрямитель; 2 - зарядный дроссель; 3 - ключ; 4 - накопительная (первичная) емкость трансформатора Тесла; 5 - первичная обмотка трансформатора; 6 - вторичная обмотка трансформатора; 7 - ускорительная трубка; 8 - блок управления током пучка; 9 - выпускное устройство; 10 - бак ускорителя; 11 - прибор для измерения среднего тока пучка; 12 - емкостной делитель для измерения высокого напряжения

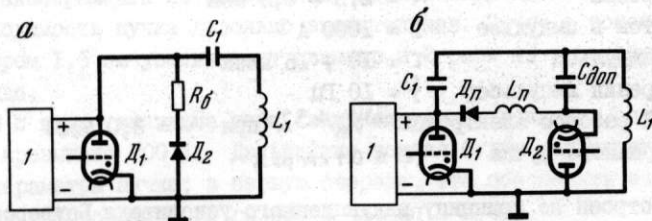


Рис. 3. Схема коммутаторов первичного контура

а - вариант с балластным сопротивлением; б - вариант с рекуперацией; 1 - зарядное устройство; C_1, C - емкость и индуктивность первичного контура; D_1, D_2 - прямой и обратный вентили; R_0 - балластное сопротивление; $D_{п}, L_{п}$ - перезарядная цепь; $C_{доп}$ - дополнительная емкость

58. ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ С ПЕННИНГОВСКОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

В. Г. Дудников

Институт ядерной физики СО АН СССР

В Институте ядерной физики СО АН СССР разработан поверхностно-плазменный метод получения пучков отрицательных ионов, основанный на образовании отрицательных ионов при бомбардировке быстрыми ионами и атомами поверхности электрода, контактирующей с газоразрядной плазмой [1 - 3]. Для эффективной работы поверхностно-плазменных источников необходимо выполнение совокупности противоречивых требований: работа выхода эмиттирующей поверхности должна быть снижена до величины, обеспечивающей адсорбцию атомов рабочего вещества в виде отрицательных ионов и подддерживаться на таком уровне в условиях сильноточного газового разряда; необходим поток диссоциированного рабочего вещества, достаточный для поддержания оптимальной концентрации его атомов на эмиттирующей поверхности при интенсивной ионной бомбардировке; нужен интенсивный поток бомбардирующих поверхность ионов или атомов с энергией, достаточной для эффективной десорбции частиц рабочего вещества в виде отрицательных ионов; слой газа и плазмы между эмиттирующей поверхностью и эмиссионным отверстием должен быть достаточно тонким, чтобы отрицательные ионы, эмиттированные с поверхности и ускоренные приэлектродным потенциалом, не разрушались при движении через этот слой. Совместить эти требования удалось в поверхностно-плазменных источниках с планотронной геометрией газоразрядной камеры [2, 3]. Для уменьшения работы выхода катода, эмиттирующего отрицательные ионы водорода, в разряд добавлялись пары щелочных металлов. Лучшие результаты были получены при добавлении цезия. Потоки адсорбируемых атомов водорода и десорбируемых ионов представлялись плазмой сильноточного тлеющего разряда. Энергия бомбардирующих ионов определялась прикатодным потенциалом. Используемая планотронная геометрия обеспечивала устойчивое горение сильноточного тлеющего разряда в поперечном магнитном поле при геометрической толщине зазора между катодом и анодом до 0,5 мм, что позволяло отрицательным ионам, эмиттированным с катода, проходить к эмиссионному отверстию при плотности тока разряда 10^2 А/см².

Для получения ионных пучков с большой яркостью необходимы высокая эмиссионная плотность потока ионов на эмиссионной поверхности плазмы, низкая ионная температура, оптимальность формы эмиссионной поверхности и её стабильность во времени. Разряды в планотроне обеспечивают потоки отрицательных ионов водорода с эмиссионной плотностью до $3,7$ А/см² [1 - 3]. Быстрые отрицательные ионы, прошедшие через слой плотной плазмы, удаётся охладить за счёт резонансной перезарядки на диссоциированном газе перед эмиссионным отверстием, что создаёт хорошие предпосылки для получения пучков с высокой яркостью. Однако в планотронах с малым зазором между катодом и анодом при условиях, оптимальных для генерации отрицательных ионов водорода, не удаётся поддерживать разряд без высокочастотных флуктуаций параметров плазмы. Изменения параметров плазмы, особенно плотности, вызывает изменения конфигурации эмиссионной поверхности и не позволяет получить пучок с предельной яркостью, определяемой эмиссионной плотностью и температурой ионов. Разряды без наблюдаемых флуктуаций (шумов), эффективно генерирующие отрицательные ионы водорода, удалось реализовать при пеннинговской геометрии газоразрядной камеры. Поскольку для пучков, используемых в ускорителях, яркость является важ-

нейшей характеристикой, были проведены исследования поверхностно-плазменных источников с пеннинговской геометрией газоразрядной камеры.

Конструкция источника показана на рис.1. Пеннинговская газоразрядная ячейка образована рабочими поверхностями катода (9) и прямоугольным анодным окном, ограниченным верхним (II) и нижним (I2) анодными выступами. От традиционных плазменных источников отрицательных ионов с пеннинговской геометрией [4,5] рассматриваемый источник отличается тем, что рабочие поверхности катода приближены к эмиссионной щели (I3), так что значительная часть отрицательных ионов, десорбированных с катода, попадает в выемку нижнего анодного выступа. У отрицательных ионов, десорбированных с катода, велика компонента скорости вдоль магнитного поля и они не могут пройти через эмиссионную щель. Пучок формируется полем вытягивающего электрода (2) из медленных отрицательных ионов, образующихся в выемке нижнего анодного выступа перед эмиссионной щелью за счет резонансной перезарядки быстрых отрицательных ионов на диссоциированном водороде. Все эксперименты проводились с эмиссионной щелью $0,5 \times 10$ мм, ориентированной перпендикулярно магнитному полю, формируемому полюсами (3). Зазор между эмиссионной щелью и вытягивающим электродом около 1 мм.

Порции водорода или дейтерия дозировались электромагнитным затвором (I0). Пары цезия поступали в разряд при нагревании таблеток из смеси хромата цезия с титаном, помещаемых в полость верхнего анодного выступа или в контейнер (7).

Свойства разрядов в пеннинговской и планотронной геометрии [2,4] аналогичны, за исключением того, что в источнике с пеннинговской геометрией удаётся подобрать условия, при которых параметры разряда не испытывают наблюдаемых флуктуаций. Характерные осциллограммы напряжения на разряде (U_p), тока разряда (I_p), тока отрицательных ионов на коллектор за поворотным магнитом (I^-) и полного тока в цепи вытягивания (I_0) приведены на рис.2. При концентрации цезия, оптимальной для генерации отрицательных ионов, напряжение на разряде $I20 + 50$ В. Конструкции газоразрядной ячейки обеспечивали устойчивое горение тлеющего разряда до $I_p \sim 200 + 300$ А.

Корпус газоразрядной камеры (4) укреплен между полюсами магнита на керамических изоляторах (5). Для первичного формирования и ускорения пучка отрицательных ионов (I) на корпус газоразрядной камеры подавалось напряжение до 30 кВ. Были исследованы эмиссионные свойства источника при различных конфигурациях газоразрядной ячейки и области формирования пучка. Лучшие из исследованных конфигураций обеспечивали получение пучка отрицательных ионов водорода с интенсивностью 0,15 А при токе разряда 180А и полном токе в цепи вытягивания 0,4А.

Для получения нужного распределения плотности ионов в фазовом пространстве пучок пропускался через поворотный магнит (I4) с неоднородным полем. Поворотный магнит (угол поворота 90° , радиус орбиты 8 см, показатель спада поля $\sim I$) преобразует сечение пучка в прямоугольник с размерами 1 см \times 1,5 см (вдоль поля). Для ионов с энергией 18 кэВ отсюда следует верхняя оценка для нормализованного эмиттанса $6 \cdot 10^{-5}$ см. рад.

Источники устанавливались в контейнере с размерами 10 \times 20 \times 25 см, сообщающемся с вакуумной камерой объемом 150л. Камера откачивалась паромасляным насосом Н-5 с вымораживающей ловушкой. При частоте следования импульсов 100 Гц установленное показание вакуумметра с датчиком ЛМ-2 $2 + 3 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст.

Исследованный источник позволяет получать пучки отрицательных ионов изотопов водорода с параметрами, достаточными для удовлетворения потребностей комплексов перезарядной инъекции [6,7] и мезонных фабрик [8]. Использование разряда без шумов создаёт предпосылки для получения пучка отрицательных ионов с предельной яркостью, определяемой эмиссионной плотностью и температурой ионов на эмиссионной поверхности, реализованные в дуговом источнике протонов с сеточной системой формирования пучка [9]. Естественно, что магнитное поле в области формиро-

вания пучка и повышенные сечения перезарядки затрудняют получение пучка с предельной яркостью, но можно надеяться, что эти трудности преодолимы.

В заключение выражаю благодарность Димову Г.И. за обсуждения и внимание к работе.

Л и т е р а т у р а

1. Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Лудников. Докл. АН СССР, 213, № 6, 1283, (1973).
2. Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Лудников. Изв. АН СССР, серия физ., т.37, № 12, 2573 (1973).
3. Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Лудников, *Nucl. Fus.*, 14, 113 (1974).
4. М.Д.Габолич. Физика и техника плазменных источников ионов. М., 1972.
5. Прелек, Слютерс. Приборы для научных исследований, № 10, 3 (1973).
6. Г.И.Будкер, Г.И.Димов. Труды международной конференции по ускорителям заряженных частиц, 1963г. Атомиздат, 1964.
7. Г.И.Будкер, Г.И.Димов, В.Г.Лудников. Атомная энергия, 22, 348, (1967).
8. М.И.Авраменко и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям, т.1, стр. 261. М., "Наука", 1973.
9. Г.И.Димов, Г.В.Росляков. Приборы и техника эксперимента, № 1, 29, (1974).

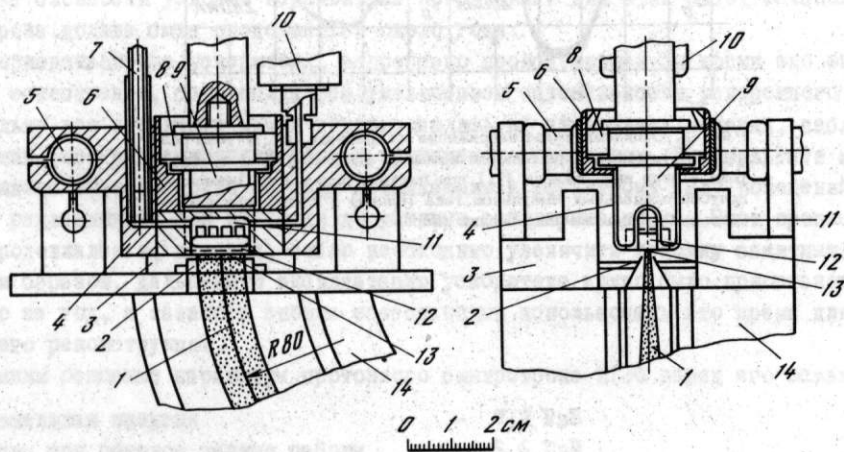


Рис. 1. Конструкция поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода с пенинговской геометрией газоразрядной камеры.

1 - пучок отрицательных ионов; 2 - пластины вытягивающего электрода; 3 - полюсные наконечники магнита; 4 - корпус газоразрядной камеры; 5 - высоковольтные изоляторы; 6 - анодная вставка; 7 - нагреваемый контейнер с цезием; 8 - катодный выступ; 9 - катод; 10 - импульсный затвор (дозатор водорода); 11 - верхний анодный выступ с цезием; 12 - нижний анодный выступ; 13 - эмиссионная щель; 14 - поворотный магнит

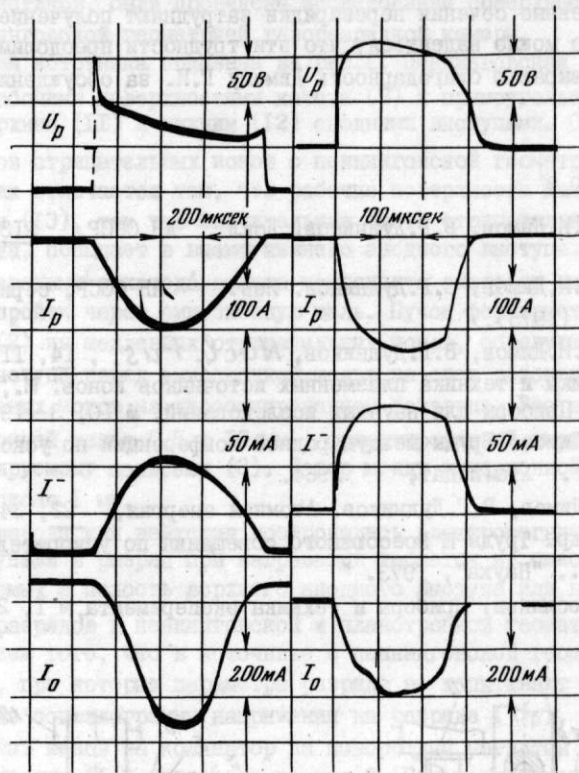


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на разряде (U_p), тока разряда (I_p), тока отрицательных ионов на коллектор (I^-) и полного тока в цепи вытягивания (I_0) при питании разряда от генератора полусинусоидальных импульсов тока (слева) и генератора прямоугольных импульсов напряжения (справа)