

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С345 Н

П-389

1758/2-77

Ю.А.Плис, Л.М.Сороко

10/5-77
P9 - 104

ИОНИЗАТОР ПУЧКА

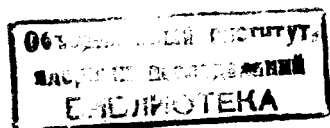
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА

1977

P9 - 10413

Ю.А.Плис, Л.М.Сороко

ИОНИЗАТОР ПУЧКА
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА



Ионизатор пучка поляризованных атомов водорода

Описаны конструкция и принцип работы ионизатора, использующего высоковакуумный разряд Пеннинга. Изложены результаты экспериментов, выполненных на этой установке. Эффективность ионизации атомного пучка составляет $4 \cdot 10^{-3}$ при токе поляризованных протонов 2,4 мкА.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

The Ionizer of the Polarized Hydrogen Atomic Beam

The setup, including the high vacuum Penning discharge, and the principle of its operation are described. The results of the experiments performed on this setup are presented. The efficiency of the ionization of the atomic beam is equal to $4 \cdot 10^{-3}$ at the intensity of the polarized proton beam equal to 2.4 мкА.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

1. Введение

В современных источниках поляризованных ионов /ИПИ/ ионизацию пучка поляризованных атомов водорода осуществляют электронным ударом при высоком вакууме. Полное число протонов, образующихся за 1 с, равно

$$N^+ = \frac{1}{e} \rho V \sigma(U) j_e(U), \quad /1/$$

где ρ - объемная плотность пучка атомов /ат./см³/, V - объем области ионизации, $j_e(U)$ - плотность заряда электронного пучка /А/см²/, а $\sigma(U)$ - эффективное сечение процесса ионизации атомов водорода электронами с энергией eU .

Эффективное сечение ионизации имеет максимальное значение при $U = 70$ В, $\sigma_{\text{макс}} = 7 \cdot 10^{-17}$ см², и при более высоких энергиях аппроксимируется выражением /1/

$$\sigma(U) = \frac{3,15 \cdot 10^{-15}}{U} \lg \frac{U}{0,325}. \quad /2/$$

Ионизацию атомов производят, как правило, в сильном магнитном поле / $B > 1$ кГс/, которое выполняет одновременно две функции. Во-первых, оно необходимо для получения высокой степени поляризации, если ИПИ содержит радиочастотный поляризатор. Во-вторых, магнитное поле удерживает пучок электронов от расширения, вызванного собственным электрическим полем.

Пучок электронов обычно инжектируют внутрь цилиндрического электрода, выполняющего функцию анода и находящегося под потенциалом U_a . Предельное значение электронного тока, удерживаемого магнитным полем при постоянной по сечению пучка плотности

тока и бесконечно большом значении магнитного поля, равно /2/

$$I_e^{\text{макс}} = 32,4 \cdot 10^{-6} U_a^{3/2} \quad /3/$$

и не зависит от диаметра анодного электрода. При максимальном значении электронного тока потенциал на оси анодного электрода понижается до $0,174 U_a$. При конечном значении индукции магнитного поля В пучок электронов испытывает циклоидальное движение с амплитудой /3/

$$a \approx \frac{m E_{\perp}}{e B^2}, \quad /4/$$

где E - радиальное электрическое поле, создаваемое объемным зарядом и равное $E \approx \frac{U_a}{r_a}$, а r_a - радиус сечения анодного электрода. Тогда

$$a \approx 5,7 \cdot 10^{-12} \frac{U_a}{r_a B^2} \quad [\text{СИ}]. \quad /5/$$

Например, для $U_a = 1 \text{ кВ}$, $r_a = 1 \text{ см}$, $B = 1 \text{ кГс}$ $a = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ см}$. При этом $I_e^{\text{макс}} \approx 1 \text{ А}$.

Если атомы в пучке с площадью поперечного сечения πR^2 движутся соосно с пучком электронов, то длина области взаимодействия равна длине анодного электрода l , а объем области ионизации равен $V = \pi R^2 l$. Плотность атомов в пучке равна

$$\rho = \frac{F}{\pi R^2 v}, \quad /6/$$

где F - полный поток атомов, а v - средняя скорость атомов. Используя /1/, /2/, /3/ и /6/, находим полное число ионов, образующихся при ионизации:

$$N^+ = \frac{0,2}{\bar{U}} (U_a)^{3/2} \lg\left(\frac{\bar{U}}{0,325}\right) \frac{F l}{r_a^2 v}, \quad /7/$$

где \bar{U} - средняя энергия электронов, а $R \leq r_a$. Эффективность ионизации равна

$$\eta = \frac{N^+}{F} = \frac{0,2}{\bar{U}} (U_a)^{3/2} \lg\left(\frac{\bar{U}}{0,325}\right) \frac{l}{r_a^2 v}. \quad /8/$$

Если $U_a = 1 \text{ кВ}$, $\bar{U} = 0,5 \text{ кВ}$, $l = 10 \text{ см}$, $r_a = 1 \text{ см}$, $v = 3 \cdot 10^5 \text{ см/с}$, то эффективность ионизации равна $\eta = 1,4 \cdot 10^{-3}$.

Повышение потенциала анодного электрода приводит к увеличению эффективности ионизации. Однако это сопровождается увеличением энергетического разброса получающихся ионов и, как следствие, возрастанием эмиттанса пучка ионов.

В обычных конструкциях ионизатора пучка поляризованных атомов катод располагается по одну сторону от анодного электрода, а вытягивающий электрод - по другую. Если на вытягивающий электрод подать отрицательный потенциал относительно катода $> 100 \text{ В}$, то возникают условия для осцилляций электронов вдоль оси анодного электрода и вытягивания ионов из разряда.

2. Разряд Пеннинга

Если потенциал анодного электрода превышает $1,2 \text{ кВ}$, то при определенной напряженности магнитного поля возникает высоковакуумный разряд Пеннинга /4/, основной характеристикой которого является то, что число осцилляций, совершаемое каждым электроном, весьма велико и для поддержания разряда требуется небольшой ток эмиссии. Процесс захвата электронов в облако разряда Пеннинга связан с коллективным взаимодействием электронов.

Примером конструкции с использованием разряда Пеннинга при высоком вакууме является ионизатор, созданный в Резерфордской лаборатории /5/, с магнитным полем $2,7 \text{ кГс}$, током эмиссии $0,8 \text{ мА}$ и потенциалом анодного электрода $U_a = 5 \text{ кВ}$. При этом потенциал разряда на оси анодного электрода составляет $1,5 \text{ кВ}$.

Максимальный заряд электронов, который можно удержать внутри анодного электрода, не зависит от диаметра цилиндра и равен /4/

$$Q = 10^{-12} U_a \ell [К],$$

/9/

где ℓ выражено в см. Объемный заряд электронов создает радиальное электрическое поле и аксиальное распределение потенциала с максимумом в центре анодного электрода. По отношению к положительным ионам, которые образуются внутри разряда, это поле является выталкивающим. Поэтому эффективно используется примерно половина числа ионов, определяемого выражением /1/.

Если давление газа в разряде Пеннинга повышается, то образующиеся ионы нейтрализуют электронное облако и возникает плазма, электрическое поле в которой мало. Благодаря этому возрастает вероятность попадания ионов на анодный электрод. При этом, чем больше длина анодного электрода, тем меньше давление, начиная с которого возникает нейтрализация.

Процессы, происходящие в разряде Пеннинга при высоком вакууме, весьма сложны и многообразны. Это затрудняет проектирование ионизаторов такого типа. Так, например, остается неясным вопрос о том, как влияет напряженность магнитного поля на процессы удержания электронного заряда внутри анодного электрода. В работе /4/ было найдено необходимое условие для постоянства энергии электронов на циклоидальной орбите:

$$\frac{U_a}{B r_a} = \text{const.} \quad /10/$$

Однако плазменные колебания в разряде нарушают это условие подобия. Наконец, при изменении давления остаточного газа и некоторых других параметров разряда возникают переходы из одной моды разряда в другую. Все эти обстоятельства послужили толчком к проведению широкого экспериментального исследования процессов в ионизаторе с разрядом Пеннинга, основные результаты которого приводятся в данной работе.

3. Конструкция ионизатора

На рис. 1 приведена конструктивная схема ионизатора пучка поляризованных атомов ИПИ, разработанного и изготовленного в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ для сильноточного фазотрона. Основные элементы ионизатора: нить накала 1, сетка 2, анодный электрод 3 диаметром 2 см и длиной 20 см; ловушка 4, охлаждаемая жидким азотом; электромагнитный соленоид 5 длиной 26 см, содержащий 380 витков медной трубки наружным диаметром 8 мм и толщиной стенок 1 мм.

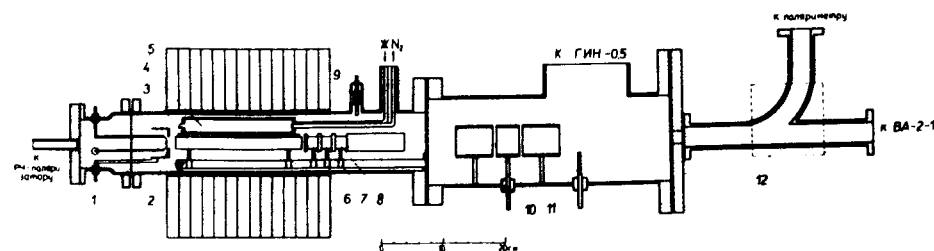


Рис. 1. Общая схема ионизатора: 1 - нить накала /катод/; 2 - сетка; 3 - анодный электрод, 4 - азотная ловушка, 5 - электромагнитный соленоид, 6 - первый электрод, 7 - второй электрод, 8 - третий электрод, 9 - высоковольтный ввод, 10 - одиночная электростатическая линза, 11 - датчик тока $I_{\phi 1}$, 12 - анализирующий электромагнит.

Изменение магнитного поля вдоль оси соленоида приведено на рис. 2. При токе возбуждения 100 А напряженность магнитного поля равна 1,6 кГс в центре соленоида и 1,1 кГс в месте расположения нити накала.

Пучок электронов, удерживаемый магнитным полем внутри анодного электрода, отражается в сторону катода электрическим полем электродов 6 и 7, которые имеют отрицательный потенциал. Электрод 8 находится под потенциалом земли. Пучок ионов фокусируется одиночной электростатической линзой 10 на вход магнитного анализатора 12.

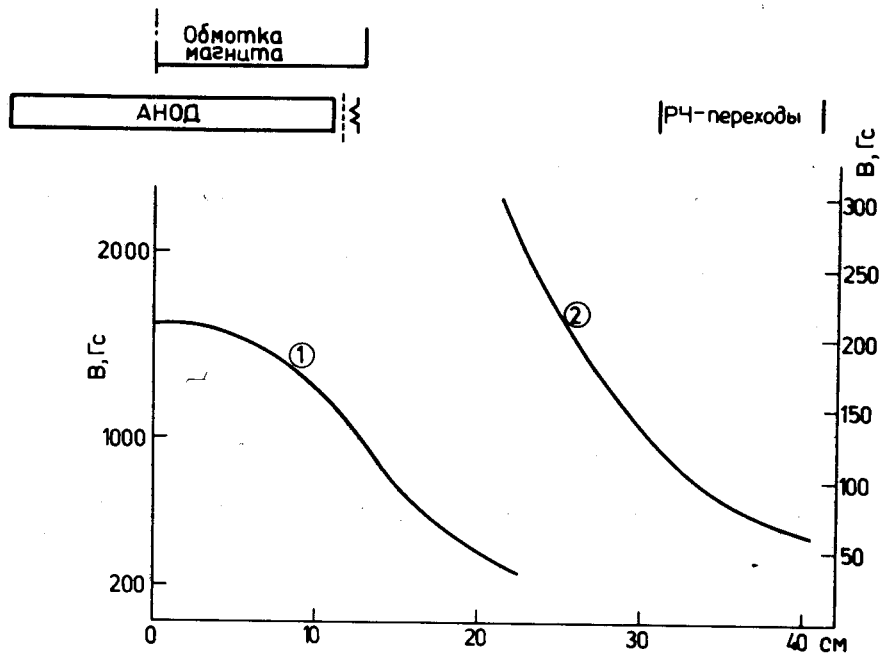


Рис. 2. Распределение магнитного поля вдоль оси ионизатора. Оси координат для кривой 1 - слева, кривой 2 - справа.

Вакуум в ионизаторе создается геттероионным насосом ГИН-0,5 с быстротой откачки 500 л/с, предварительный вакуум $\sim 10^{-5}$ Тор со стороны магнитного анализатора - паромасляным агрегатом ВА-2-3 с такой же быстротой откачки. Пропускная способность трубы ионного тракта, через которую проходит также атомный пучок, равна 10 л/с.

Существенным элементом ионизатора является ловушка 4, заполняемая жидким азотом. Ловушка находится под потенциалом земли и имеет тепловой контакт с анодным электродом через стеклянную трубку толщиной 1 мм. В первой серии опытов использовалась ловушка, которая находилась под потенциалом анодного электрода и имела электрические изоляторы в системе заливки азота.

Подача высокого напряжения на электроды ионизатора производится через металлокерамические вводы 9. Электроды изолированы друг от друга при помощи кварцевых трубок, которые несут также функцию жесткого каркаса электродов ионизатора.

Электрическая схема ионизатора приведена на рис. 3.

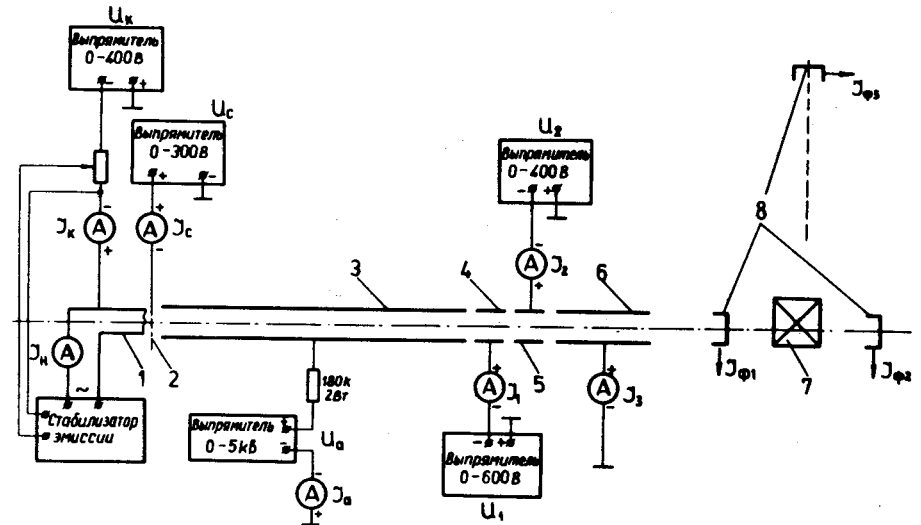


Рис. 3. Электрическая схема ионизатора; 1 - нить накала, 2 - сетка, 3 - анодный электрод; 4, 5, 6 - первый, второй и третий электроды, соответственно, 7 - анализирующий электромагнит, 8 - датчики токов $I_{\phi 1}$, $I_{\phi 2}$ и $I_{\phi 3}$.

Ионные токи измерялись при помощи: 1/ датчика 11 /см. рис. 1/ диаметром 2 см, который располагался на расстоянии 40 см от конца анодного электрода ($I_{\phi 1}$); 2/ датчика диаметром 4 см, который располагался на расстоянии 130 см от анодного электрода ($I_{\phi 2}$); 3/ датчика, который измерял отдельно ионы H_1^+ или H_2^+ ($I_{\phi 3}$); 4/ электродов ионизатора 6, 7 и 8 (I_1 , I_2 , I_3).

Предварительные опыты показали, что устойчивый режим разряда в ионизаторе невозможно получить без

стабилизатора тока эмиссии электронов из нити накала, принципиальная схема которого дана на рис. 4. Сигнал разбаланса, снимаемый с цепочки резисторов 6,3 к и 10 к, усиливался и изменял ток накала путем воздействия на электрическое сопротивление вторичной обмотки трансформатора Тр.2. Диапазон стабилизации тока составлял $0,2 \div 0,8$ мА, максимальный ток накала - 9 А, а потребляемая мощность - около 20 Вт.

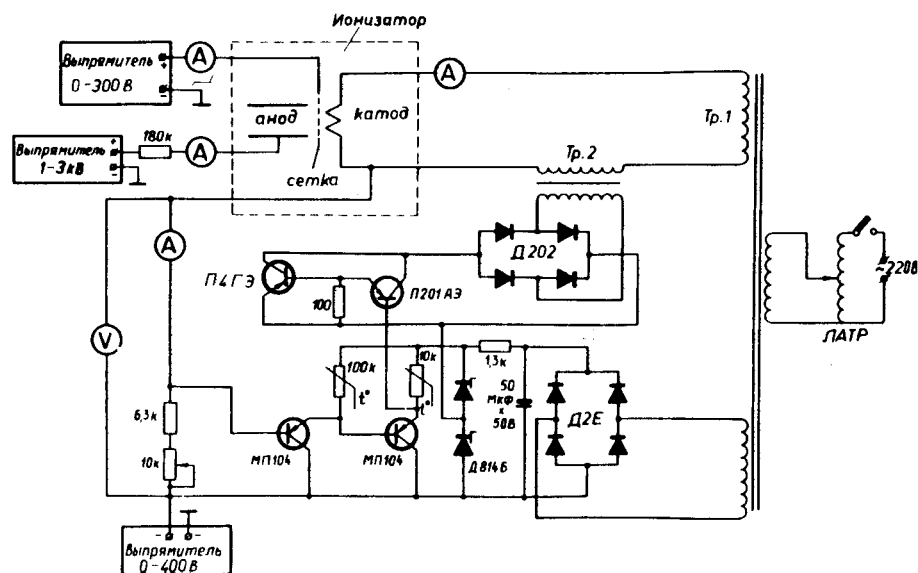


Рис. 4. Принципиальная схема стабилизатора эмиссии.

4. Результаты экспериментов

Цель экспериментов заключалась в достижении высокой эффективности ионизации пучка поляризованных атомов и определении параметров устойчивого режима работы ионизатора. Описываемым опытам предшествовали исследования ионизатора с холодным^{/6/} и нака-

ленным^{/7/} катодами. Было найдено, что эффективность ионизации в системе с холодным катодом равна $7 \cdot 10^{-4}$ при длине анодного электрода 3,6 см и диаметре 1,2 см. Для поддержания разряда в системе с увеличенной длиной анодного электрода пришлось ввести нить накала. Эффективность ионизации составила $2,7 \cdot 10^{-3}$ при длине анодного электрода 13 см и диаметре 1,8 см. Конструкция данного ионизатора была разработана с учетом характеристик разряда, полученных на модели ионизатора с накаливаемым катодом^{/см. /7/}.

Основными параметрами, характеризующими работу ионизатора поляризованных атомов с разрядом Пеннинга, являются: ток эмиссии катода, напряженность магнитного поля, давление остаточного газа и напряжение на анодном электроде. В большинстве опытов потенциал катода $U_k = 0$, потенциал сетки $U_c = 300$ В, потенциалы электродов 6,7 и 8, соответственно, $U_1 = -600$ В, $U_2 = -400$ В и $U_3 = 0$. На рис. 5в,г видно, что ток эмиссии слабо влияет на величину ионного тока и энергию ионов в интервале от $I_{k1} = 0,3$ мА до $I_{k2} = 0,8$ мА. Дополнительные опыты, выполненные без стабилизации тока эмиссии, показали, что режим разряда мало меняется при изменении катодного тока $I_k = 0,1$ мкА, когда разряд гаснет, до $I_k = 2$ мА. Обычно $I_k \approx 0,7$ мА, а ток в цепи анодного электрода $I_a \approx 0,2$ мА.

Спектр масс ионов и их энергия определялись при помощи магнитного анализатора с поворотом на угол 90° и радиусом поворота, равным 10 см. На рис. 5а показан типичный спектр масс ионов. Первый пик соответствует ионам H_1^+ , а второй - ионам H_2^+ . Средняя энергия протонов равна $E_{cp} = 1$ кэВ, а разброс по энергии $\Delta E = \pm 0,1$ кэВ. Поскольку потенциал анодного электрода равен 2,5 кВ, то понижение потенциала на оси анодного электрода составляет около 1,5 кВ. Остаточное давление в этих экспериментах составляло $\approx 10^{-6}$ Тор. Если оно повышается до $\approx 4 \cdot 10^{-6}$ Тор, то ионный ток уменьшается в несколько раз, а энергия ионов возрастает до величины, близкой к потенциалу анодного электрода. Например, при $U_a = 2$ кВ $E_{cp} = 1,8$ кэВ с разбро-

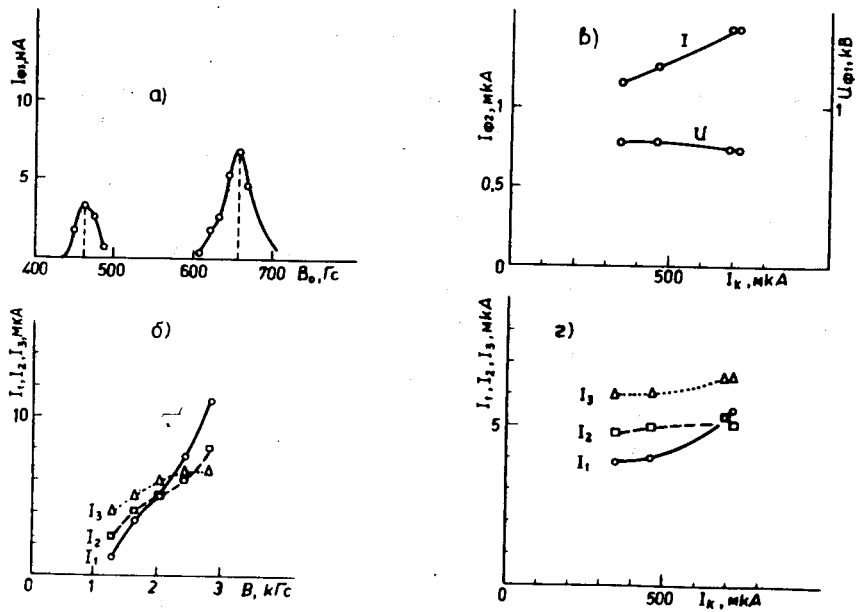


Рис. 5. а/ Зависимость тока $I_{\phi 3}$ от поля анализирующего магнита; $U_a = 2,5$ кВ, $B = 2,8$ кГс, $I_k = 740$ мкА, $p = 10^{-6}$ Тор. б/ Зависимости токов на 1, 2 и 3 электродах от магнитного поля ионизатора; $U_a = 2$ кВ, $I_k = 720$ мкА, $p = 8 \cdot 10^{-7}$ Тор. в/ Зависимость тока $I_{\phi 2}$ и оптимального напряжения на фокусирующей линзе от тока эмиссии; $U_a = 2,5$ кВ, $B = 2,8$ кГс, $p = 2 \cdot 10^{-6}$ Тор. г/ Зависимости токов на 1, 2 и 3 электродах от тока эмиссии; $U_a = 2,5$ кВ, $B = 2$ кГс, $p = 8 \cdot 10^{-7}$ Тор.

сом $\Delta E = \pm 0,5$ кэВ. Как отмечалось выше, такое повышение энергии ионов связано с нейтрализацией ими электронного облака.

На рис. 6 дана зависимость от магнитного поля интенсивностей ионов, выходящих из разряда Пеннинга и измеренных различными датчиками: $I_{\phi 1}$, $I_{\phi 2}$, I_1 , I_2 и I_3 . Ионные токи, в основном, растут при увеличении магнитного поля. Отличие зависимости тока ионов для дальнего датчика $I_{\phi 2}$ связано, в частности, с эффектом расфокусировки пучка ионов магнитным полем соленоида.

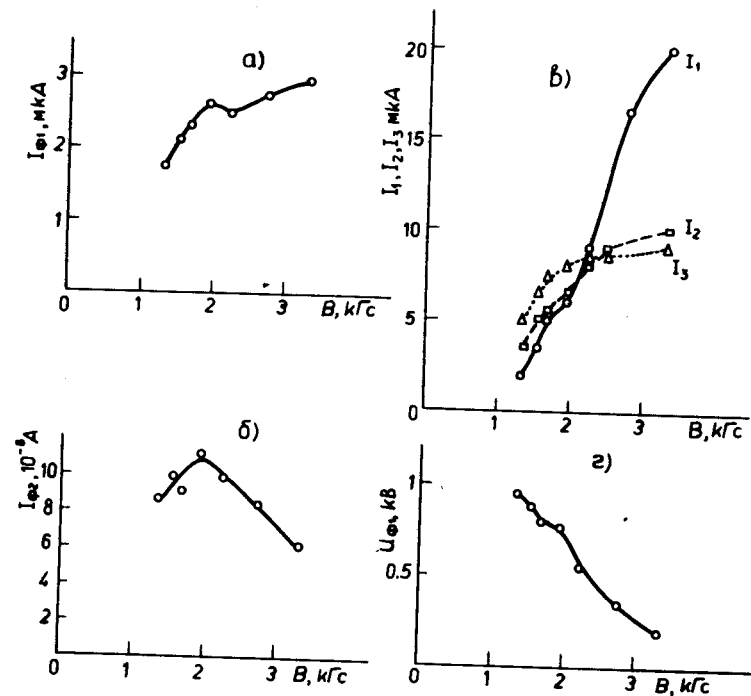


Рис. 6. Зависимость от магнитного поля ионизатора: а/ тока $I_{\phi 1}$; б/ тока $I_{\phi 2}$; в/ токов на электродах 1, 2 и 3; г/ оптимального напряжения на фокусирующей линзе; $U_a = 2$ кВ, $I_k = 740$ мкА, $p = 10^{-6}$ Тор.

Измерения энергии ионов были проведены при двух значениях магнитного поля в центре соленоида: 1,3 кГс и 2,8 кГс. Соответствующее им понижение потенциала на оси анодного электрода равно 0,6 кВ и 1,5 кВ, соответственно. Отсюда можно сделать вывод о том, что с повышением магнитного поля усиливается эффект осцилляций электронного тока внутри анодного электрода. Этот же вывод следует из графика на рис. 6г. Повышение потенциала анодного электрода приводит к увеличению ионного тока $I_{\phi 1}$ /рис. 7а/. Более сложные зависимости ионных токов $I_{\phi 2}$, I_1 , I_2 , I_3 /рис. 7б, в/ можно объяснить, как и на рис. 6б, особенностями фокусировки ионов, а не процессами в разряде.

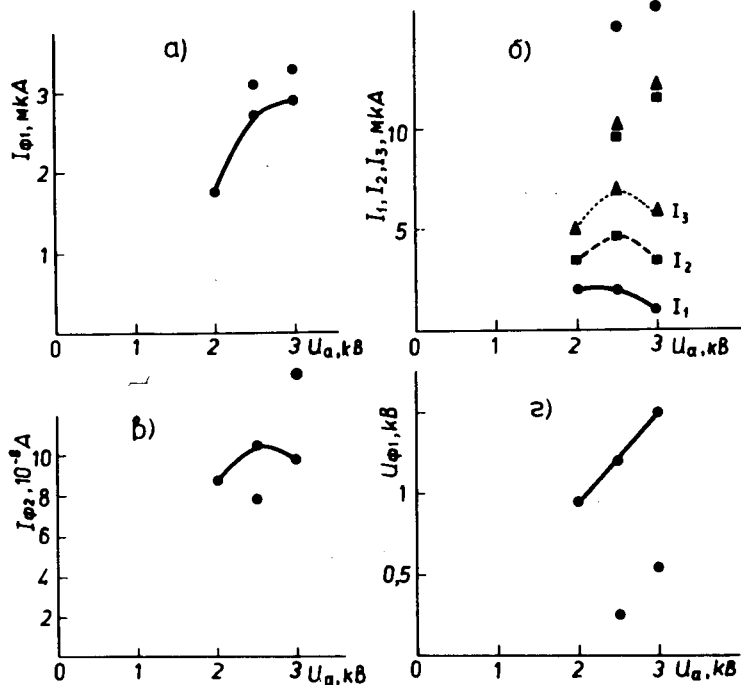


Рис. 7. Зависимости от анодного напряжения U_a : а/ тока $I_{\phi 1}$; б/ тока $I_{\phi 2}$; в/ токов на электродах 1, 2 и 3; г/ оптимального напряжения на фокусирующей линзе, $B = 1,35$ кГс, $I_k = 740$ мкА, $p = 10^{-6}$ Тор. Отдельно стоящие точки соответствуют $B = 2,8$ кГс.

Ток поляризованных протонов, определяемый по сумме токов на все датчики /измерялся прирост токов над фоном при включении атомного пучка/, при поле $B = 2$ кГс равен 2 мкА для $U_a = 2,5$ кВ и 2,4 мкА для $U_a = 3$ кВ. Таким образом, наблюдается пропорциональный рост тока при увеличении анодного напряжения. Протонный ток распределяется примерно поровну между четырьмя датчиками, измеряющими токи $I_1, I_2, I_3, I_{\phi 1}$. Это связано с тем, что ионы не подвергаются дополнительному ускорению после выхода из ионизатора.

В приведенных выше результатах учтен эффект вторичной электронной эмиссии /путем подачи положительного потенциала +300 В на датчики/, а также эффект компрессии атомного пучка, наблюдающийся в момент перекрытия пучка датчиком $I_{\phi 1}$. Атомы, испытавшие соударения с датчиком, рекомбинируют и повышают парциальное давление молекулярного водорода. Измеренное значение $\Delta p(H_2) \approx 10^{-7}$ Тор.

Интенсивность пучка атомов, проходящих через ионизатор, составляет $4 \cdot 10^{15}$ ат./с, диаметр сечения пучка - 1,6 см, а средняя скорость атомов - $2,4 \cdot 10^5$ см/с. Отсюда находится плотность атомов $\rho = 8 \cdot 10^9$ ат./см³ или $3 \cdot 10^{-7}$ Тор по парциальному давлению. Измеренная эффективность ионизации для $U_a = 3$ кВ, равная $\eta^{эксп.} = 4 \cdot 10^{-3}$, согласуется с теоретической оценкой $\eta^{теор.} = 3 \cdot 10^{-3}$, полученной для максимального значения электронного тока $/3/ I_e^{макс} = 5,3$ А.

5. Заключение

1. Показано, что в ионизаторе Пеннинга осциллирует электронный ток ≈ 5 А, что близко к максимально возможному значению тока для $U_a = 3$ кВ.

2. Увеличение магнитного поля и анодного напряжения в исследованной области до $U_a = 3$ кВ, $B = 2,8$ кГс ведет к росту ионного тока.

3. Ток поляризованных протонов, выходящих из ионизатора, при $U_a = 3$ кВ, $B = 2$ кГс составляет 2,4 мкА. Это соответствует эффективности ионизации $\approx 4 \cdot 10^{-3}$, что совпадает со значением, полученным для лучших типов ионизаторов.

Авторы благодарят Н.П.Кузнецова за изготовление и наладку стабилизатора эмиссии.

Примечание. Во время подготовки статьи к печати авторам стала известна работа^{/8/}, в которой сообщает-

ся об исследовании ионизатора Пеннинга в магнитном поле 75 кГс при потенциале анодного электрода 8 кВ. При этом энергия ионов оказалась равной 2 кэВ, чему соответствует радиальное падение потенциала 6 кВ. При плотности атомов в пучке $5,4 \cdot 10^{10}$ ат./см³ получен ионный ток 60 мкА. Эти результаты подтверждают данные, полученные авторами, в частности монотонный рост эффективности ионизации с напряженностью магнитного поля.

Литература

1. Браун Л. и др. Поляризация нуклонов, М., Госатомиздат, 1962, стр. 60.
2. Pierce J.R. *Theory and Designs of Electron Beams*, N.Y., 1954.
3. Glavish H.F. *Nucl.Instr. and Meth.*, 1968, 65, p. 1.
4. Helmer J.C., Jepsen R.L. *Proc. IRE*, 1961, 19, p. 1920.
5. *PLA Ann. Progr. Report*, 1965, RHEL/R112, p.12.
6. Плис Ю.А., Сороко Л.М. *ЖТФ*, 1969, 39, с.1622.
7. Плис Ю.А., Сороко Л.М. *ОИЯИ*, Р9-4653, Дубна, 1969.
8. Kruger A. e.a. *Nucl.Instr. and Meth.*, 1976, 138, p. 201.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 февраля 1977 года.