

сообщения
Объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

2382 / 2-80

2/6-80

P9 - 13025

С.Н.Доля, В.В.Тихомиров, П.Ф.Черняев

ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА С ТРУБЧАТЫМ ПУЧКОМ

1980

Для создания вращающегося облака электронов ^{/1-4/} может быть использована пушка с трубчатым пучком, который приобретает вращательное движение в области, где магнитное поле резко изменяет свое направление. Существует несколько типов пушек, формирующих трубчатый пучок. Проще всего его можно получить с помощью пушки Пирса, формирующей сплошной пучок, сердцевина которого удалена, а чтобы сохранить условия движения оставшейся трубчатой части пучка, следует применить фокусирующие электроды. Однако такой пучок нельзя ввести в магнитное поле, поскольку на внутреннюю границу пучка, где поле объемного заряда равно нулю, будет действовать неуравновешенная фокусирующая сила Лоренца, в результате чего произойдет сжатие внутренних слоев электронов, и полый пучок превратится в сплошной. Получить трубчатый пучок можно также с помощью кольцевого автоэмиссионного катода, помещенного в магнитное поле. Но для его формирования требуются большие напряжения, а пучок имеет большой энергетический разброс. От всех этих недостатков свободна магнетронная пушка ^{/5,6/}, исследования которой и посвящена данная работа.

Принцип работы пушки магнетронного типа можно представить следующим образом. В цилиндрическом диоде, погружаемом в осевое магнитное поле B_z , при напряжении на аноде U , меньшем значения U_0 , определяемого из соотношения

$$U_0 = \frac{e}{m} \frac{r_a^2}{8} B_z \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2,$$

где e - заряд электрона, m - его масса, r_a - радиус анода, r_k - радиус катода, диод запирается, и между катодом и анодом образуется вращающееся облако пространственного заряда.

Если в таком диоде путем введения дополнительных электродов создать осевую компоненту электрического поля, то электроны, образующие облако пространственного заряда, будут двигаться в аксиальном направлении. Таким образом, на выходе будет формироваться полый поток электронов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на *рис.1*. Электронная пушка 1 вакуумно плотно соединена с переходником 2, служащим для размещения элементов диагно-

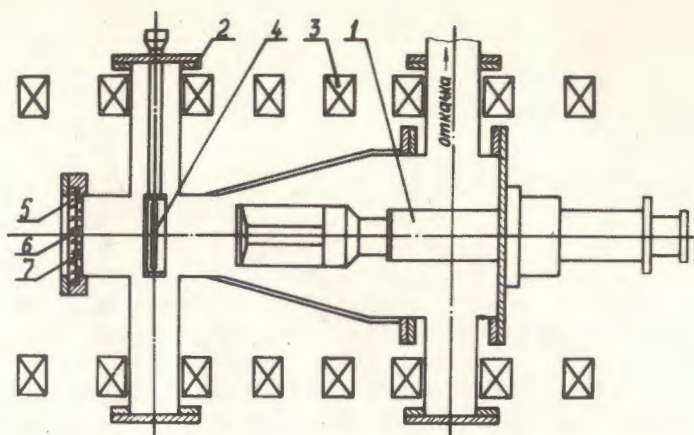


Рис.1. Принципиальная схема установки. 1 - электронная пушка, 2 - вакуумный переходник, 3 - катушки магнитного поля, 4 - цилиндр Фарадея, 5 - вакуумное окно, 6 - люминофор, 7 - алюминиевая фольга.

стики трубчатого электронного пучка. Вся установка размещена внутри катушек 3, предназначенных для создания необходимого магнитного поля.

Визуальное наблюдение электронного пучка производилось через вакуумное окно 5, непосредственно за которым размещался люминофор 6, закрытый от светового излучения катода алюминиевой фольгой 7, толщиной 50 мкм, одновременно служившей и для снятия заряда. Свечение люминофора вызывалось тормозным гамма-излучением электронных колец. Для измерения тока трубчатого пучка использовался цилиндр Фарадея 4. Применявшийся в эксперименте цилиндр Фарадея изображен на рис.2. Пучок направлялся на круглую медную пластину 10, изолированную фторопластовой шайбой 12 от корпуса 8. Исследуемый сигнал через делитель, образованный сопротивлениями 9 и 11, 75-омный тракт, образованный жилой 7 и внутренним отверстием штока 2, и через герметичный вакуумный разъем СРГ-75 выводился на осциллограф.

Вакуумный узел 3 позволяет перемещать шток 2 либо полностью перекрывая пучок цилиндром, либо убирая его из зоны пучка, что необходимо для визуального наблюдения пучка по люминофору. Этот узел расположен эксцентрично оси фланца 4, что позволяет путем его поворота в накидном фланце 6 регулировать положение цилиндра в пределах ± 10 мм. Для обеспечения регулировок применяются ручки 5.

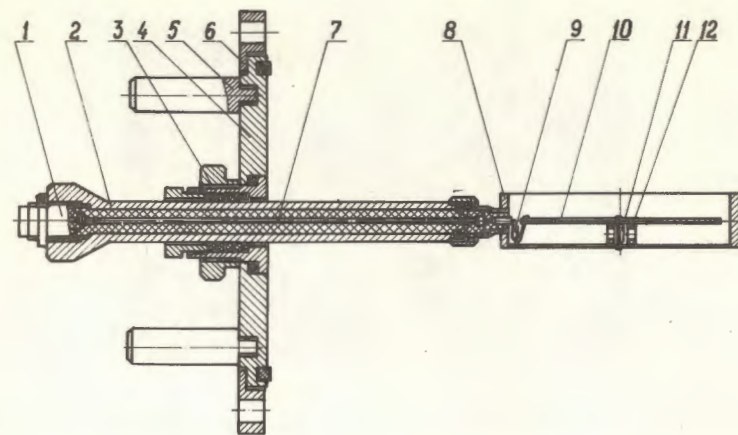


Рис.2. Цилиндр Фарадея. 1 - вакуумный разъем, 2 - шток, 3 - вакуумный узел, 4 - фланец, 5 - ручки для обеспечения регулировок, 6 - накидной фланец, 7 - внутренняя жила коаксиального фидера, 8 - корпус цилиндра, 9,11 - сопротивления делителя, 10 - медная пластина, 12 - фторопластовая шайба.

Вакуумная система установки состоит из последовательно соединенных высоковакуумного насоса ВА-05 с охлаждаемой азотом ловушкой, и механического насоса ВН-2 МГ. Все уплотнения в установке - резиновые. Вакуумная система позволяет получать вакуум порядка $2 \cdot 10^{-8}$ Торр.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Целью данной работы было измерение зависимости тока от напряжения, а также размеров пучка в зависимости от величины магнитного поля. Особое внимание уделялось возможностям работы и особенностям эксплуатации катодов данного типа.

Импульс тока пучка [рис.3], зарегистрированный цилиндром Фарадея, подавался на осциллограф OSA, с экрана которого делались фотографии. Скорость развертки - 200 нс/см, видны послеимпульсы тока, совпадающие с отрицательными выбросами напряжения. Осциллограмма напряжения с той же скоростью развертки приведена на рис.4. Напряжение регистрировалось делителем с выходным сопротивлением $R_{\text{вых}} = 1,6$ кОм и коэффициентом деления 250. Длительность импульса тока по основанию - 500 нс, на полувысоте - 250 нс. Ток в 300 А, полученный при



Рис.3. Осциллограмма импульса тока $J = 300$ А, длительность импульса по полувысоте - 250 нс.



Рис.4. Осциллограмма импульса напряжения $U=80$ кВ, длительность импульса на полувысоте - 250 нс.

напряжении 80 кВ, является предельным для описанной в данной работе установки. Поднять ток можно либо увеличивая напряжение, что в данный момент не позволяет сделать электрическая прочность катодной ножки, либо увеличивая первеанс пушки путем изменения ее геометрии.

Величина аксиального магнитного поля, требуемого для фокусировки электронного пучка, оценивалась на основе следующих соображений. В цилиндрическом диоде после отсечки анодного

тока границу облака пространственного заряда можно задать радиусом Хелла, определяемым из соотношения ^{16/}:

$$r_x \left(1 - \frac{r_k^2}{r_x^2}\right)^2 = 45,5 \frac{U}{B^2}, \quad /1/$$

где r_x и r_k - радиусы Хелла и катода в сантиметрах, U - напряжение на аноде в вольтах, B - магнитное поле в гауссах. Решая это уравнение для $r_k = 4,5$ см /катод лампы ГИ-27/, найдем толщину облака

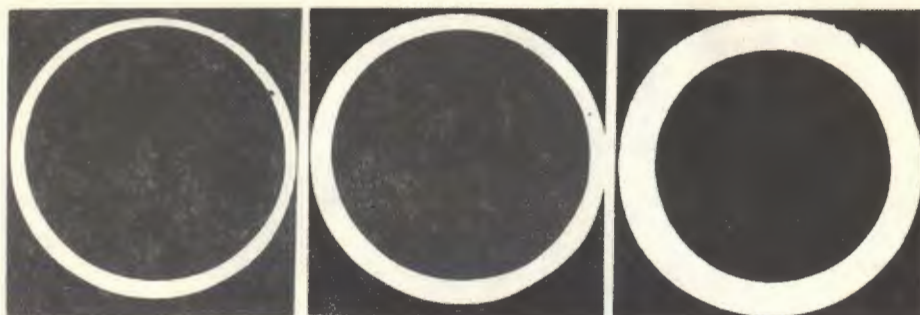
$$r_x - r_k = \Delta = \frac{1}{2} \sqrt{45,5 \frac{U}{B^2}}. \quad /2/$$

Для напряжения $U=60$ кВ и напряженности поля $B=1$ кГс теоретическая толщина трубчатого пучка $\Delta=0,8$ см. На рис.5а изображен пучок, полученный на установке, при приведенных выше условиях. Средняя толщина трубки равна 0,6 см, что несколько меньше теоретической, причем есть все основания считать, что действительная толщина стенки еще меньше, так как фотографии делались с люминофора, светившегося от тормозного гамма-излучения пучка, направленного во все стороны. В обоснованности данного предложения мы убедились, установив экран с более толстым слоем люминофора. В результате видимая толщина пучка возрастала.

При уменьшении магнитного поля до $B=0,8$ кГс толщина трубки по теории должна была вырасти до 1 см. Полученная на установке фотография изображена на рис.5б. Толщина трубки равна 0,8 см. При дальнейшем уменьшении магнитного поля до $B=0,6$ кГс толщина трубки должна увеличиться до 1,3 см.

На рис.5в показано кольцо, полученное на установке. Толщина трубки равна 1,3 см, что в данном случае совпало с теорией. Кроме того, данные фотографии позволяют сделать вывод о влиянии точности установки катода и величины магнитного поля на разностенность трубчатого пучка. Толщина стенки изображенного на рис.5а кольца колебалась от 0,4 до 0,7 см, что объясняется несовпадением оси катода и оси магнитного поля. Кольцо на рис.5б имеет колебания толщины от 0,6 до 0,8 см, а кольцо, показанное на рис.5в, имеет уже равностенную по периметру трубку. Таким образом, увеличение магнитного поля предъявляет более жесткие требования к установке катода, а также предполагает наличие юстировочного узла, для точной установки катода без снятия вакуума.

При разработке установки и рассмотрении перспектив применения катодов данного типа были серьезные опасения, что разогретая до 3000 °С тонкая вольфрамовая сетка катода будет сильно провисать, а возможно, даже и рваться. Вертикальный



а/

б/

в/

Рис. 5. а/ Профиль пучка в магнитном поле $B=1$ кГс. Диаметр пучка 9 см. б/ Профиль пучка в поле 800 кГс. в/ Профиль пучка в магнитном поле $B=600$ кГс.

способ расположения пушки отвергнут ввиду перспектив использования данной пушки для совместной работы с установками, имеющими горизонтальное расположение. Компенсатор удлинения оказался неприемлем ввиду чрезвычайной хрупкости катодной сетки /брался катод из лампы, бывшей в употреблении/. С этой целью проведен эксперимент по нагреву горизонтально расположенного катода в вакууме, причем оба электрода были жестко закреплены, в результате чего оказалось, что сетка не только не рвется, но и заметна ее провисание невооруженным глазом не представляется возможным. В процессе эксплуатации катода в установке выяснилось, что он устойчиво работает, начиная с вакуума 10^{-2} Торр. Опасения, что катод будет быстро разрушаться ионной бомбардировкой, пока не подтвердились. Кроме того, при многократном напуске атмосферы в систему, катод не отравлялся. К достоинствам его мы относим и возможность применения масляной откачки и резиновых уплотнений, что значительно упростило всю систему и облегчило ее эксплуатацию. К недостаткам катода относится прежде всего его большая хрупкость, что сильно осложняет процесс снятия катода с лампы и установку его на катодной ножке. Этот недостаток может быть устранен, если брать неотожженные катоды на заводе-изготовителе. Кроме того, новые катоды будут иметь большую эмиссию и срок службы. К недостаткам катода относится также и то, что он требует больших ~ 550 А/ токов накала и соответственно выделяет большое количество тепла, для снятия которого пришлось установить систему водяного охлаждения анода и катодной ножки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обсудим области применения пушки для решения различных физических задач. Рассмотрим прежде всего возможность ускорения электронного кольца с ионами на "головке" трубчатого пучка. Суть модели заключается в следующем: выведенное из адгезатора и ускоренное кольцо с ионами догоняет трубчатый пучок, электроны которого отражаются от кольца и передают ему свой аксиальный импульс.

При таком ускорении кольца пучком следует выдержать некоторые специальные условия. Первое из них заключается в том, что энергия электронов пучка должна быть меньше потенциала кольца относительно земли. Этот потенциал можно вычислить приближенно по формуле

$$U = \int eE_z dz \approx \frac{eN_e}{\pi R}.$$

Для кольца УТИ число электронов $N_e \approx 10^{13}$, радиус кольца в конце сжатия $R=4$ см и, таким образом, потенциал U составляет ~ 100 кВ. Мощность пучка, необходимая для ускорения от энергии 1,5 МэВ/нукл. - энергии в конце выводного соленоида до энергии 7 МэВ/нукл., соответствующей порогу ядерных реакций тяжелых элементов, должна линейно увеличиваться вместе со скоростью ионов /при постоянной ускоряющей силе, действующей на электронное кольцо с ионами/ от 50 до 100 МВт. Следовательно, для поддержания синхронизма ускорения при анодном напряжении пушки $U=100$ кВ ток должен увеличиваться от 500 до 1000 А. Это увеличение тока аналогично изменению давления вдоль трубки дрейфа, при ускорении в прямых пучках, однако здесь его осуществить легче, благодаря тому, что мощность пучка зависит от анодного напряжения по известному закону $P \sim U^{5/2}$, и синхронизма можно достичь, изменяя анодное напряжение в процессе ускорения.

Оценим напряженность поля, действующего на электронное кольцо с ионами по формуле

$$E_z = \frac{en_e}{2\pi R} \left(1 + \ln \frac{8R}{\Delta}\right), \quad /4/$$

где n_e - линейная плотность электронов пучка, определяемая как $n_e = \frac{J}{eV}$, J - ток пучка, V - скорость электронов.

Напряженность поля должна оставаться постоянной в процессе ускорения и составлять для кольца УТИ величину $E_z = 15$ кВ/см. Подставляя в формулу /4/ значение $J = 1$ кА и скорость $V=0,5$ с, что соответствует 100 кВ анодного напряжения, найдем, что величина ускоряющего поля составляет $E_z = 100$ кВ/см.

Реально эта величина в несколько раз меньше за счет конечности фронта пучка. В процессе ускорения по мере нарастания

тока будет поддерживаться очевидный синхронизм между нарастанием скорости кольца с ионами и увеличением тока пучка /фактической плотности/, так что ускоряющее поле будет поддерживаться постоянным.

Полный пучок можно использовать также в ускорителях средних энергий ^{7/}, где этот пучок модулируется, проходит область реверса магнитного поля, захватывает ионы и ускоряется вместе с ними во внешних магнитных полях.

Создание плотных электронных сгустков интересно также с точки зрения эффективной ионизации тяжелых ионов. Для этого трубчатый пучок следует прежде всего промодулировать и ускорить до энергии $E \approx 1,5 \div 2$ МэВ. Проходя область реверса магнитного поля, сгустки затормаживаются, приобретают вращательную скорость и захватываются во внешнюю яму. Как показывают расчеты, плотность электронов в таких образованиях достигает значения $n_e \approx 10^{12}$ см⁻³, а время их удержания составляет $\tau \approx 10$ с. За это время происходит, по расчетам, полная ионизация атомов урана.

Пушка устойчиво работает в течение длительного времени. Установка много раз подвергалась разгерметизации. Сам катод был извлечен из лампы, проработавшей свыше 1000 ч, и тем не менее дает устойчивую эмиссию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hester R. et al. Phys. Fluids, 1975, v.18, No.1, p.96.
2. Fleischmann H. et al. Plasma Physics, 1976, v.16, No.1, p.113.
3. Минц А.Л. и др. Радиотехника и электроника, 1975, т.20, с.2524.
4. Destler W. et al. IEEE Trans. on Nucl. Science, 1975, NS-22, No.3, p.995.
5. Степанов А.Д. и др. ОИЯИ, Р9-8038, Дубна, 1974.
6. Воронков Р.Н. и др. Отчет РИ АН СССР, №607, М., 1963.
7. Бонч-Осмоловский А.Г., Доля С.Н. ОИЯИ, Р9-10648, Р9-10649, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 января 1980 года.