

объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

1889/82

19/4-82

P9-82-87

Н.И.Веников*, В.Б.Кутнер, А.С.Пасюк

ИСТОЧНИКИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ
ДЛЯ ЦИКЛОТРОНОВ

Направлено в Оргкомитет Всесоюзного совещания
по ускорителям ионов низких и средних энергий
/Киев, декабрь 1981 г./

* Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова,
Москва.

1982

ИСТОЧНИКИ ИОНОВ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

Для получения ускоренных ионных пучков используются и разрабатываются различные ионные источники и инжекторы: плазменно-дуговой /PIG/, дуоплазмотрон /DP/, искровой /ИИ/, высокочастотный /ECR/, электронно-лучевой /EBIS/, лазерный /ИМЗИЛ/, инжектор с перезарядкой на газовой или твердой мишени^{/1/}.

Усиление в последние годы направления исследований с ускоренными тяжелыми ионами значительно способствовало существенному прогрессу в развитии традиционных и создании новых источников ионов^{/2/}.

Основные направления получения ионных пучков низких и средних энергий связаны с одно- или двухкаскадным ускорением ионов на линейных, тандемных и циклических ускорителях.

Рассматривая проблему ускорения ионов и ядер с помощью ускорителей и ускорительных комплексов, как действующих, так и создаваемых, приходится прежде всего исходить из возможностей ионных источников и перспектив их развития.

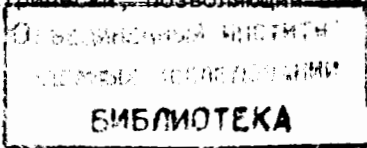
В обзоре^{/3/} проведен анализ различных источников многозарядных ионов для линейных ускорителей.

С учетом преимуществ циклотронного метода ускорения ионов до средних энергий^{/4/} ниже будут обсуждены вопросы современного уровня развития циклотронных ионных источников и перспективы использования на циклотронах источников многозарядных ионов новых типов.

ЦИКЛОТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНОВ

Первоначально на циклотронах многозарядные ионы из водородных источников ускорялись на субгармонике высокого напряжения с последующей обдиркой на остаточном газе и дальнейшим ускорением на основной частоте. Такие ионные пучки имели ничтожную интенсивность и широкий энергетический спектр, поскольку ионы зарождались на различных радиусах циклотрона.

В начале 50-х годов были созданы специальные ионные источники для получения многозарядных ионов: источник с накаливаемым катодом /толстая нить/ и плавающим антикатодом^{/5/}, источник с холодными катодами, имеющими одинаковый потенциал относительно анода^{/6/}, и источник с подогреваемым катодом и холодным антикатодом, соединенными электрически, позволяющий вводить в разряд большую мощность^{/7/}.



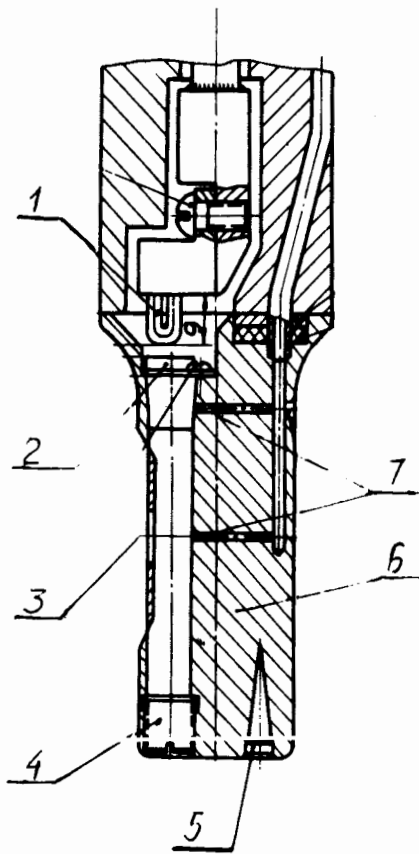
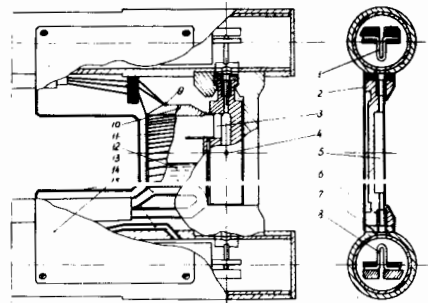


Рис.1. Головка источника легких ионов циклотрона У-200. 1 - катод, 2 - диафрагма, 3 - эмиссионная щель, 4 - антикатод, 5 - канал охлаждения, 6 - анод, 7 - канал ввода газа.

Рис.2. Схема источника полутяжелых ионов. 1,8 - катоды; 2,15 - экраны; 3 - паропровод; 4 - эмиссионная щель; 5 - разрядный канал; 6 - коллиматор разряда; 7 - термоизоляция разрядной камеры; 9 - термopара; 10 - тигель; 11 - электропечь; 12 - литий или соль бериллия; 13 - система охлаждения дна тигеля; 14 - канал ввода газа.



На их основе созданы современные наиболее интенсивные циклотронные источники: легких ионов^{/8/} /рис.1/, полутяжелых ионов^{/9/} /рис.2/, тяжелых ионов с испарением^{/10/} и катодным распылением рабочего вещества^{/11,12/} /рис.3,4/.

Общей особенностью всех ионных источников, традиционно используемых на циклотронах, является то, что дуговой разряд низкого давления / $\sim 10^{-3}$ торр/ происходит в сильном / ~ 20 кЭ/ продольном магнитном поле, в котором осуществляется осцилляция электронов.

Традиционные циклотронные ионные источники в отличие от вновь разрабатываемых являются внутренними источниками и располагаются в центральной области ускорителя. Ввод их в циклотрон может осуществляться как радиально, так и аксиально. Источники, вводимые аксиально, более компактны, но значительно сложнее конструктивно по сравнению с источниками, вводимыми радиально, как правило, выполняемыми на двух штоках.

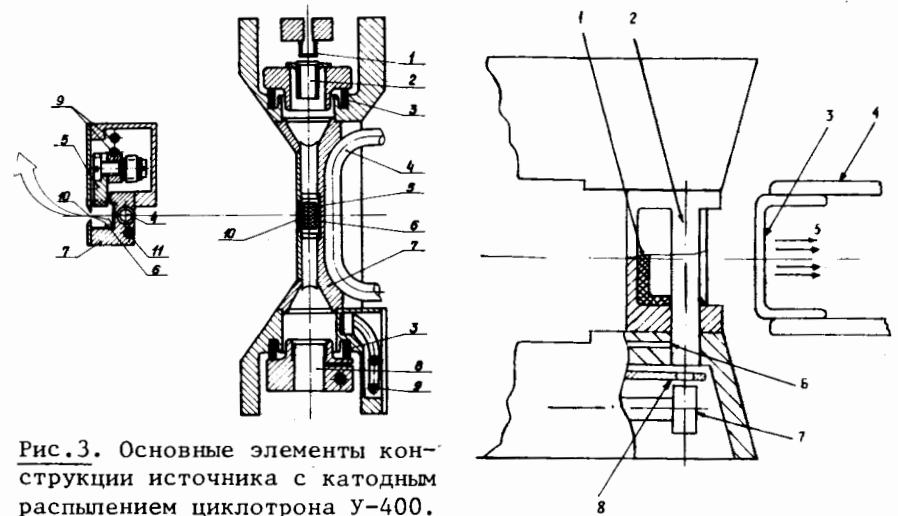


Рис.3. Основные элементы конструкции источника с катодным распылением циклотрона У-400.

1 - нить накала, 2 - катод, 3 - уплотняющий изолятор, 4 - охлаждение разрядной камеры, 5 - распыляемый электрод, 6 - сборник распыленного вещества, 7 - разрядная камера, 8 - антикатод, 9 - канал охлаждения распыляемого электрода, 10 - эмиссионная щель, 11 - канал ввода газа.

Рис.4. Схема источника ORIC. 1 - распыляемый вкладыш, 2 - камера, 3 - пуллер, 4 - дуант, 5 - пучок, 6 - канал ввода газа, 7 - поворотный узел с катодами, 8 - коллиматор.

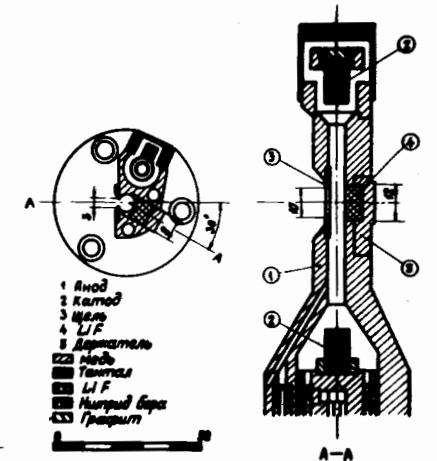


Рис.5. Схема источника с катодным распылением рабочего вещества возвратными ионами. 1 - анод, 2 - катод, 3 - эмиссионная щель, 4 - распыляемый материал /LiF/, 5 - держатель.

Следует отметить, что для японского циклотрона^{/13/} разработан вариант газоразрядного источника со сменной газоразрядной камерой на одном горизонтальном штоке.

Для получения из твердых веществ ионных пучков с малой интенсивностью служат источники, в которых рабочее вещество поступает в разряд из антикатода и катода^{/14/} или из специального вкладыша в разрядной камере, распыляемого так называемыми "возвратными" ионами. Последний способ был впервые предложен в Ок-Ридже^{/12/} и недавно применен на циклотроне в Токио^{/15/} для получения ионов лития /рис.5/.

Однако эти конструктивно простые источники имеют существенный недостаток, заключающийся в отсутствии независимой от режима работы циклотрона регулировки подачи рабочего вещества и сильной зависимости выхода требуемых ионов от многих величин, в частности, параметров разряда, расхода газа, высокочастотного напряжения ускоряющего дуанта, приводящих к нестабильности пучка ускоренных ионов.

С целью получения интенсивных пучков ионов из твердых веществ применяются более сложные конструкции ионных источников с испарением или катодным распылением рабочего вещества^{/9-11/}.

ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ И ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ПУЧКОВ ИЗ ЦИКЛОТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

В первых исследованиях ионных источников на циклотронах было установлено, что параметры разряда /ток и напряжение дуги, мощность подогрева, расход газа/ и геометрические размеры газоразрядной камеры и эмиссионной щели существенно влияют на интенсивность ускоренного пучка.

Дальнейшие работы с ионными источниками позволили изучить условия получения более интенсивных и высокозарядных ионных пучков.

Изучение влияния материалов катода на параметры разряда и выход многозарядных ионов показало^{/16/}, что тантал позволяет при токе разряда до 15 А поддерживать напряжение на дуге до 1000 В. Применение танталового катода привело к увеличению интенсивности пучка и достижению более высокозарядных состояний ионов. На стенде ионных источников получены ионы Xe^{15+} с импульсным током 10 мкА. За счет применения катодов из тантала удалось увеличить интенсивность пучков на циклотронах У-200, У-300 и У-400 в 1,5÷2 раза.

Важным фактором, влияющим на выход многозарядных ионов, являются характеристики магнитного поля в области разряда. Установлено^{/17/}, что незначительное отклонение оси разрядной камеры источника ионов от направления силовых линий магнитного поля /смещение катода относительно оси камеры - 1 мм/ приводит к снижению тока ионов Ar^{8+} в 10 раз. Работа источников на циклотроне У-300 показывает, что чем выше заряд извлекаемых ио-

нов, тем точнее должна быть юстировка оси камеры относительно силовых линий магнитного поля.

Изучению влияния неоднородного магнитного поля на выход ионов посвящено несколько теоретических и экспериментальных работ. В работе^{/18/} показано, что магнитное поле, сформированное определенным образом вдоль оси разряда, приводит к увеличению в 2-3 раза тока семи- и восьмизарядных ионов ксенона.

В ионных источниках с подогревным катодом присутствие посторонних атомов в большинстве случаев приводит к снижению интенсивности пучка основных ионов^{/19,20/}, причем чем тяжелее атом примеси, тем больше ее влияние на выход многозарядных ионов.

Однако в ряде случаев использование добавочного газа позволяет также стабилизировать разряд. При добавлении таких тяжелых газов, как криптон и ксенон, к легким /кислороду, неону/ достигается устойчивость разряда в источнике, стабильность ускоренных пучков на циклотроне У-200, а также экономия дорогостоящих изотопов^{/19/}.

Использование в качестве балластного газа водорода^{/18/} приводит к увеличению в 2 раза тока пятизарядных ионов азота.

Подмешивание около 4% ксенона в рабочий газ в источнике с холодными катодами на циклотроне в Ок-Ридже^{/21/} позволило увеличить в 5 раз интенсивность пучка шестизарядного неона.

Исследования ионного источника на циклотроне ИАЭ показали, что повышение плотности импульсной мощности с помощью коллимации разряда приводит к увеличению в несколько раз интенсивности ускоренного пучка. В 1,5÷2,5 раза возрастает средняя интенсивность выводимого из циклотрона пучка многозарядных ионов и в случае поддержания маломощного /"дежурного"/ разряда в промежутках между мощными импульсами^{/22/}.

На рис.6 представлены сравнительные данные относительного выхода ионов криптона и ксенона по зарядностям при импульсной подаче газа в источник в сравнении с режимом непрерывного напуска^{/23/}. В этом источнике достигнута максимальная интенсивность пучков ионов Xe^{15+} , которая в импульсе составляет 50 мкА.

Интенсивность ионных пучков в циклотроне может быть также повышена за счет улучшения начальной оптики источника. В этом случае источник находится под положительным потенциалом^{/24/} или имеет систему экстракции под потенциалом. Разработанный источник с вытягивающим электродом на циклотроне в Ок-Ридже позволил увеличить токи пучков $^{40}\text{Ar}^{3+}$ на 5-ой гармонике и $^{20}\text{Ne}^{1+}$ на 7-ой гармонике от наноампер до микроампер^{/25/}.

Система импульсного извлечения ионов из источника циклотрона ИАЭ увеличивает в 2÷3 раза интенсивность ионов в сгустке во внешнем пучке по сравнению с системой извлечения электродом с постоянным напряжением^{/26/}.

9. Веников Н.И. и др. Авторское свидетельство СССР, №197786 с приоритетом от 31.08.65. Бюлл. ОИПОТЗ №13, 1967, с.81.
10. Пасюк А.С. и др. АЭ, 1970, 28, с.75.
11. Третьяков Ю.П. и др. Развитие ионного источника с катодным распылением рабочего вещества для циклотронов ЛЯР ОИЯИ. В кн.: Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1981, т.1, с.81.
12. Hudson E.D., Mallory M.L., Lord R.S. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1976, NS-28, p.106.
13. Kageyama T., Ikegami K., Kohno I. IPCR Cyclotron Progress Report, 1980, vol.14, p.4.
14. Пасюк А.С., Третьяков Ю.П., Горбачев С.К. АЭ, 1968, 24, с.21.
15. Tanabe T., Ohshiro Y., Sato K. Nucl. Instr. and Meth., 1980, 178, p.315.
16. Пасюк А.С., Кутнер В.Б., Третьяков Ю.П. ПТЭ, 1980, №1, с.41.
17. Пасюк А.С., Кузнецова И.П., Кутнер В.Б. ОИЯИ, 7-8620, Дубна, 1975.
18. Маков В.Н. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1976, NS-23, p.1035.
19. Пасюк А.С., Кутнер В.Б., Кузнецова И.П. ОИЯИ, 9-11280, Дубна, 1978.
20. Веников Н.И., Старостин Н.В. ПТЭ, 1963, №2, с.25.
21. Hudson E.D. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1977, 141, p.381.
22. Venikov N. et al. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1979, NS-26, p.1996.
23. Pasyuk A.S., Kutner V.B. In: Proc. of the XV Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Minsk, 1981, p.641.
24. Holin S., Komn R., Linkkonen E. JYFL Annual Report, Jyväskylä, 1976, p.5.
25. Mallory M.L., Hudson E.D., Lord R.S. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1973, NS-23, p.147.
26. Веников Н.И. и др. ЖТФ, 1976, 46, с.772.
27. Vechtold V., Friedrich L., Schweickert H. In: Proc. IX Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Caen, France, 1981, p.111.
28. Loiseaux J.-M. Nucl. Phys., 1981, A354, p.415.
29. Ананьин О.Б. и др. В кн.: Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1981, т.1, с.98.
30. Ананьин О.Б. и др. ОИЯИ, P9-81-632, Дубна, 1981.
31. Becker R. Scaling of Measured Ionization Cross Section for Argon and Xenon. Workshop on ECR-Ion Source and Related Topics. Darmstadt, GSI-81, 1981, p.165.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 февраля 1982 года.

Веников Н.И., Кутнер В.Б., Пасюк А.С.
Источники многозарядных ионов для циклотронов

P9-82-87

Дан обзор современного уровня развития циклотронных ионных источников и обсуждены перспективы использования на циклотронах новых типов источников многозарядных ионов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Venikov N.I., Kutner V.B., Pasyuk A.S.
multicharged ion sources for cyclotrons

P9-82-87

The present state of cyclotron ion sources development is reviewed, the prospects of application of new types of multicharged ion sources on cyclotrons are discussed.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.