

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

4624/83

29/VI-83
9-83-416

Б.Н.Гикал, И.В.Колесов, А.С.Пасюк,
Ю.А.Быковский, В.П.Гусев, Ю.П.Козырев,
В.Д.Пекленков, Д.А.Узиевко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСКОРЕНИЯ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ИЗ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ
НА ЦИКЛОТРОНЕ У-200

Направлено в журнал "Атомная энергия"

1983

Ускоренные пучки тяжелых ионов широко используются для решения ядерно-физических и прикладных задач ^{/1,2/}. Вместе с тем рамки научно-технических программ определяются возможностями ускорителя, а именно - энергией, интенсивностью и видом ускоряемых частиц, что, в свою очередь, зависит от ионного источника или инжектора.

Особые требования предъявляются к ионному источнику на циклотроне, где наряду с высокой интенсивностью требуется высокая зарядность ионных пучков. До последнего времени на циклотроне применялись дуговые ионные источники. Дальнейший прогресс ускорения ионов на циклотронах может быть связан с использованием источников новых типов, таких, как ECR /источник, использующий механизм нагрева электронов на частоте электронно-циклотронного резонанса/, EBIS /электронно-лучевой источник/, а также лазерный источник, которые активно развиваются в настоящее время ^{/3,4/}. Впервые ядра азота из ECR-источника были ускорены в Карлсруэ ^{/5/}. На циклотроне МИФИ осуществлено ускорение дейтронов из лазерного источника ^{/6/}.

Исследования, проведенные на стенде ионных источников ЛЯР, позволили разработать конструкцию лазерного источника многозарядных ионов для циклотрона ^{/7-9/}

Проблема ускорения ионов из лазерной плазмы, как известно, связана с большими плотностями эмиссионного тока из лазерной плазмы /более 10 А/см²/ и малыми длительностями ионного пакета /~ 1 нс/. Данная работа посвящена исследованию процесса захвата и ускорения тяжелых ионов из лазерной плазмы на изохронном циклотроне ЛЯР ОИЯИ У-200.

ОПИСАНИЕ СХЕМЫ И УСЛОВИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА

Изохронный циклотрон У-200 может ускорять ионы с $\frac{A}{Z} = 2,8 + 5,0$
/A - массовое число, Z - заряд иона/ до энергии $E = 145 \frac{Z^2}{A}$ МэВ.

Диаметр полюса - 200 см, конечный радиус ускорения - 87 см, среднее магнитное поле в зазоре - около 20 кГс, напряжение на дуантах - 55 ÷ 75 кВ ^{/10,11/}.

Лазерный источник конструктивно выполнен таким образом, что при его установке не требуется замены каких-либо узлов ускорителя, остается неизменной и центральная область циклотрона.

Схема расположения лазерного источника на циклотроне приведена на рис.1. Применяемый CO₂-лазер имел частоту повторения

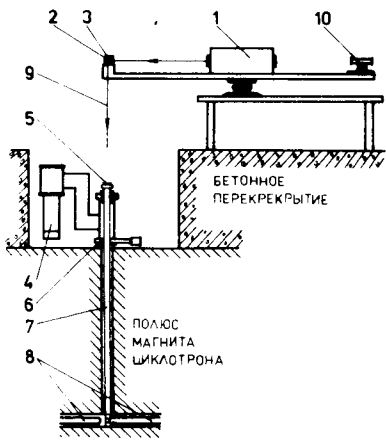


Рис.1. Схема расположения лазерного источника ионов на циклотроне У-200. 1 - CO_2 -лазер, 2 - механизм юстировки зеркала, 3 - зеркало, 4 - вакуумный насос, 5 - окно в штоке источника, 6 - шиббер шлюза циклотрона, 7 - шток источника, 8 - дуанты, 9 - луч лазера, 10 - юстировочный лазер.

импульсов не более 1 Гц. Луч с энергией 0,4 Дж поворачивался зеркалом /3/ на угол 90° , фокусирующая линза, расположенная в штоке источника, создавала плотность мощности лазерного излучения на мишени 10^9 Вт/см^2 . В качестве мишени использовалась углеродная пластинка. Изолированная сетка прозрачностью 30%, установленная на эмиссионной щели, позволяла контролировать ионный ток на выходе из источника.

Особое внимание было уделено вопросам согласования работы лазера, циклотрона и измерительной аппаратуры. Главное требование заключалось в том, чтобы "выстрел" лазера происходил во время установившегося ВЧ-напряжения на дуантах, а аппаратура была готова к регистрации ионов. Это достигалось следующим образом: ВЧ-генератор циклотрона работал в обычном режиме с длительностью импульса - 1,5 мс, частотой следования 150 Гц. После появления сигнала "Пуск" от переднего фронта генератором импульсов Г5-15 регулировалась задержка между лазерным импульсом и запуском запоминающего осциллографа С8-2, которым регистрировались ионный ток на выходе из источника, сигналы с внутреннего или внешнего пробников циклотрона и ВЧ-напряжение на дуантах /рис.2/. Конструкция пробника позволила при исследовании высокочастотных сигналов уменьшить сигнал наводки в 5-10 раз по отношению к импульсу тока пучка.

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ

Исходя из возможностей лазера и условий ускорения были выбраны ионы C_{12}^{3+} , ускоряемые на второй гармонике при частоте ВЧ-генератора 15,1 МГц.

Из-за малой частоты работы лазерного источника / ~ 1 Гц / режим ускорения ионов C_{12}^{3+} отлаживался на обычном дуговом источнике, который затем заменялся лазерным.

В лазерном источнике, в отличие от дугового, не требуется напускать газ в разрядную камеру, поэтому удалось получить рабочий вакуум в циклотроне, равный $4 \cdot 10^{-7}$ Тор. Таким образом,

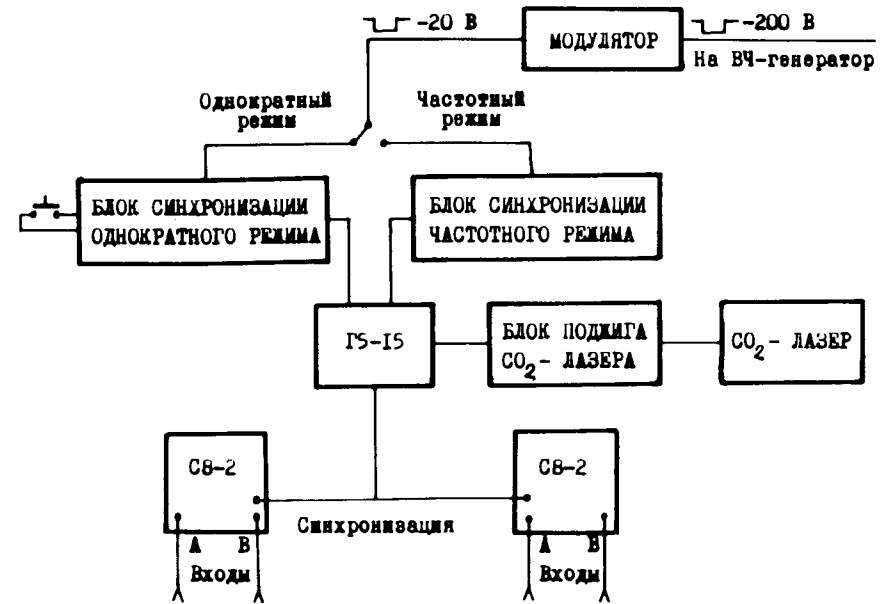


Рис.2. Блок-схема системы согласования циклотрона, лазера и измерительной аппаратуры.

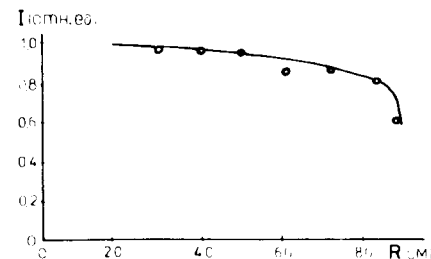


Рис.3. Потери пучка в процессе ускорения. Сплошная линия - дуговой источник, точки - лазерный источник.

потерями частиц из-за обдирки на остаточном газе можно было пренебречь /12/.

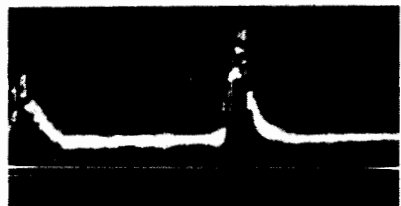
Интенсивность ускоренных ионов, измеренная внутренним пробником на радиусе 30 см., составила $4,5 \cdot 10^9$ част./имп., длительность импульса по основанию - 2,5 мкс /1,5 мкс на полувысоте/, в результате средний ток в импульсе составил 860 мкА. Потери частиц в процессе ускорения соответствовали обычным потерям на У-200 /рис.3/. Вывод ускоренных ионов производился методом перезарядки ($\text{C}_{12}^{3+} \rightarrow \text{C}_{12}^{6+}$) и составил около 70%.



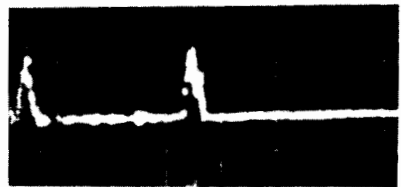
R = 30 см 2,5 мкс



R = 50 см 2,5 мкс



R = 70 см 5 мкс



R = 85 см 10 мкс

Рис.4. Осциллограммы импульсов ускоренного пучка на различных радиусах циклотрона. Первый пик - импульс общего тока лазерной плазмы, второй - импульс ускоренного пучка.

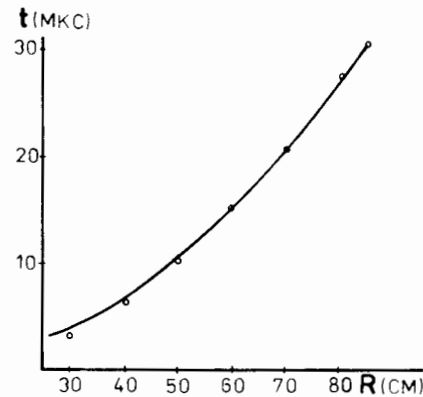


Рис.5. Зависимость времени ускорения от радиуса при напряжении на дуантах 55,6 кВ. Сплошная линия - расчет, точки - измерение.

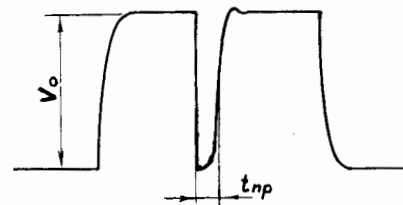
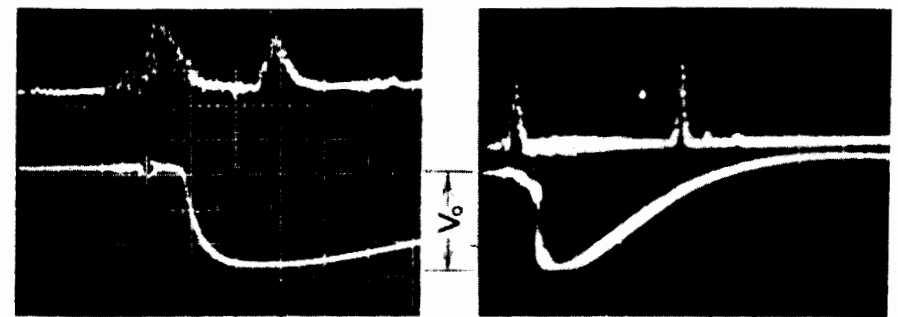


Рис.6. Огибающая ВЧ-напряжения на дуанте в случае пробоя.



R = 40 см 2,5 мкс R = 80 см 10 мкс

Рис.7. Осциллограммы импульсов ускоренного пучка и напряжения на дуантах в случае пробоя вытягивающего промежутка. Верхний луч: первый пик - импульс общего тока лазерной плазмы, второй пик - импульс ускоренного пучка ионов, нижний луч - огибающая ВЧ-напряжения на дуантах.

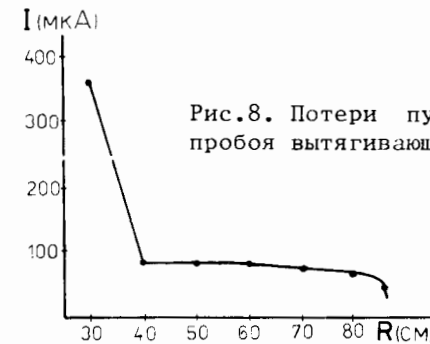


Рис.8. Потери пучка при ускорении в случае пробоя вытягивающего промежутка.

Короткий пакет ионов, сформированный в лазерном источнике, позволил измерить время ускорения в циклотроне как разность между временем выхода ионов из источника и появлением ускоренного пучка на пробнике циклотрона. Измерения с высокой точностью совпадают с расчетом, приведенным по формуле

$$t = \frac{E}{4fZeV_0 \sin \phi}, \text{ где } f - \text{ частота вращения ионов,}$$

E - энергия ионов, Z - заряд ионов, V_0 - напряжение на дуантах, ϕ - фаза прохождения ионов ускоряющего промежутка.

Как уже отмечалось в работе ^{19/}, головную часть импульса лазерной плазмы в основном составляют ионы высокой зарядности /рис.4,5/. В процессе эксперимента наблюдались случаи пробоя с дуантов /рис.6/. На циклотроне пробой с дуантов развивается с задержкой 3-4 мкс по отношению к импульсу лазера, и вызван

Выведенный пучок был получен интенсивностью $2 \cdot 10^9$ частиц/имп. Измеренная полупроводниковым детектором энергия ионов равнялась 108 МэВ, что соответствует энергии трехзарядного углерода при ускорении с хорошей центровкой орбит.

в основном низкозарядной и нейтральной компонентами плазмы. Длительность пробы составляла 20-30 мкс. Исследования показали, что в этом случае также возможно ускорение ионов до конечного радиуса /рис.7/, однако процесс сопровождается дополнительными потерями частиц, основная часть которых теряется на радиусах между 30 и 40 см, а также увеличением времени ускорения в циклотроне /рис.8/. Пробой с дуантами нужно рассматривать скорее как исключение, поскольку может быть достигнут режим, при котором он не наблюдается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте на циклотроне удалось впервые ускорить ионы из лазерной плазмы, плотность ионного тока из которой на порядок выше по сравнению с дуговым источником, а также исследовать процесс ускорения плотного сгустка ионов длительностью в несколько микросекунд.

Установлено, что при интенсивности в импульсе около 1 мА может быть реализован режим работы циклотрона, исключающий пробой и понижение ВЧ-напряжения на дуантах, и осуществлено ускорение ионов с обычными для У-200 потерями.

Повышение рабочего вакуума в циклотроне при работе с лазерным источником особенно перспективно при ускорении высокозарядных ионов, так как в этом случае существенно снижаются потери частиц из-за обдирки.

Использование малых количеств рабочего вещества в лазерном источнике позволяет ускорять редкие изотопы.

Дальнейшие перспективы развития лазерного источника для циклотронов связаны с повышением мощности и частоты срабатывания лазера, с оптимизацией конструкции ионного источника.

В заключение авторы выражают благодарность Г.Н.Флерову за постоянный интерес к работе и полезные дискуссии, Р.Ц.Оганесяну, Г.Г.Гульбекяну - за участие в обсуждении результатов эксперимента, Е.А.Корчагину - за техническую помощь в подготовке установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Флеров Г.Н. и др. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981.
2. Оганесян Ю.Ц. ОИЯИ, Р9-12843, Дубна, 1979.
3. Кутнер В.Б. ОИЯИ, Р9-81-139, Дубна, 1981.
4. Веников Н.И. Препринт ИАЭ-3217, М., 1979.
5. Bechtold et al. Proc. IX Inter.Conf. on Cycl. and their Application, Caen, France, 1981, p. 321.

6. Ананьин О.Б. и др. Письма в ЖЭТФ, 1973, 17, с. 460.
7. Ананьин О.Б. и др. ОИЯИ, Р9-80-832, Дубна, 1980.
8. Ананьин О.Б. и др. ОИЯИ, Р9-81-632, Дубна, 1981; ЖТФ, 1972, 52, с. 1472.
9. Ананьин О.Б. и др. ОИЯИ, Р9-81-639, Дубна, 1981; ЖТФ, 1983, 53, с. 94.
10. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, 9-3988, Дубна, 1968.
11. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-4233, Дубна, 1968.
12. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-548, Дубна, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 июня 1983 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Гикал Б.Н. и др. 9-83-416
Исследование процесса ускорения тяжелых ионов из лазерной плазмы на циклотроне У-200

На циклотроне У-200 удалось впервые ускорить тяжелые ионы из лазерной плазмы. Реализован режим работы циклотрона, исключаящий пробой или понижение ВЧ-напряжения на дуантах, и осуществлено ускорение с обычными для У-200 потерями частиц. Средняя интенсивность выведенного пучка ионов C_{12}^{3+} , которые выбраны в качестве тестовых, составила $2 \cdot 10^9$ част./с.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Gikal B.N. et al. 9-83-416
Investigation of Heavy Ion Acceleration from Laser Plasma at the U-200 Cyclotron

Heavy ions from laser plasma have been accelerated for the first time on the U-200 cyclotron. The operation of the cyclotron without breakdown from dees and reducing dee voltage has been realised. The average intensity of extracting test ion beam C_{12}^{3+} was equal to $2 \cdot 10^9$ particle/s.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.