

12/III-84



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

1364/84

9-83-837

**В.Е.Миронов, С.М.Сильнов*,
Е.А.Сотниченко*, Б.А.Шестаков**

**ОПЫТНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ
ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА АТОМОВ
НА КУТИ-20 И ПКУТИ**

* Московский инженерно-физический институт

1983

ВВЕДЕНИЕ

Как известно ^{/1/}, в коллективном ускорителе ускоряемые ионы образуются в электронном кольце при ионизации инжектируемых в него атомов. Важным элементом, обеспечивающим эффективную работу ускорителя, является устройство, производящее дозированную подачу в электронное кольцо атомов выбранного для ускорения элемента. Ранее загрузка кольца ионами газообразных элементов проводилась из газодинамического источника ^{/2/}. Результаты ^{/3-5/} позволили разработать схемы загрузки электронных колец ионами в камере адгезатора с помощью лазерного источника атомов, создать его рабочие варианты, исследовать параметры потоков атомов различных элементов. Комплексная проверка работоспособности источника, его влияния на другие системы адгезатора и, наконец, загрузка кольца ионами возможны только в реальных условиях на ускорителе.

В данной статье приводятся результаты опытной эксплуатации одного из рабочих вариантов лазерного источника атомов в условиях действующих систем КУТИ-20 и ПКУТИ, т.е. при сжатии электронного кольца в трех ступенях магнитного поля до радиуса примерно $3 \div 4$ см и первоначальные качественные результаты экспериментов по накоплению ионов свинца в электронном кольце. Так как геометрия источника, условия загрузки кольца, количество в нем электронов и другие физические параметры /кроме частоты срабатывания/ обоих ускорителей практически совпадают, то и приводимые результаты относятся к работе источника и на КУТИ-20, и на ПКУТИ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Центральный вариант лазерного источника атомов предназначен, в основном, для загрузки ионами электронных колец с радиусом от 12 до 3 см. Геометрия источника позволяла, кроме того, инжектировать атомы в кольца больших /до 35 см/ радиусов.

Источник состоит из основного и юстировочного лазеров, системы сканирования, фокусирующей линзы, мишени и несущей конструкции. Фокусирующая линза /фокусное расстояние - 230 мм/ и мишень /в данных экспериментах - из свинца/ размещаются в вакуумной камере адгезатора, оба лазера - вне камеры. Основным лазером является лазер на алюмоиттриевом гранате с примесями неодима с параметрами: длина волны излучения 1,06 мкм, длительность им-

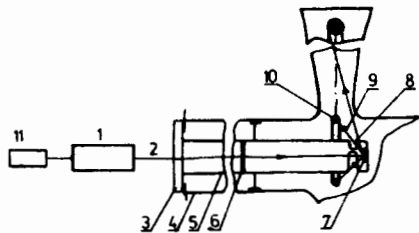


Рис.1. Схемы загрузки электронного кольца ионами и расположения лазерного источника в камере адгезатора /пояснения в тексте/.

пульса на полувысоте - около 10 нс, энергия в импульсе - до 60 мДж, частота срабатываний - до 50 Гц. Юстировочным лазером является гелий-неоновый лазер, работающий в непрерывном режиме; длина волны излучения - 0,63 мкм.

Схема загрузки электронного кольца ионами и расположение источника в камере адгезатора показаны на рис.1. Из лазера 1 излучение 2 проходит через окно 3 в камеру адгезатора 4 и трубу 5 /несущая конструкция/, фокусируется линзой 6 на поверхность мишени 7. Через три коллимирующих отверстия 8 поток атомов 9 попадает в электронное кольцо 10. Ось излучения юстировочного лазера 11 совпадает с осью излучения основного лазера 1. Труба 5 диаметром 20 мм и толщиной стенки 0,5 мм выполнена из нержавеющей стали, имеет три опоры, центрирующие трубу в патрубке. Опоры расположены на расстоянии 30 см от мишени. Поверхность трубы отперфорирована для облегчения получения вакуума в ее полости. Каждое коллимирующее отверстие имеет вид овала с размерами 15x15 мм, а ширина перегородок между отверстиями составляла 3 мм. Продольный размер отверстий мог изменяться с помощью насадки.

Юстировка части источника, находящейся внутри камеры адгезатора, проводилась с помощью фиксирующих опор так, чтобы несовпадение оси источника и оси Z адгезатора не превышало 0,5 мм. Юстировка внешней /лазерной/ части источника проводилась при снятом окне 3 с помощью маркера, вводимого в трубу 5. При помощи 50-процентного зеркала можно было наблюдать маркер и место попадания на него излучения. Аналогичным способом, при откачанной камере имелась возможность контролировать попадание излучения на фокусирующую линзу и, соответственно, на мишень. Уплотнение фланца источника с патрубком камеры адгезатора производилось через алюминиевую прокладку, а окно /кварцевое стекло диаметром 44 мм и толщиной 6 мм/ уплотнялось во фланце патрубка через индиевую прокладку. Основной величиной, определяющей параметры потоков атомов, являлась плотность потока лазерного излучения на мишень q /Вт·см⁻²/. Величина q , при фиксированных размере пятна взаимодействия и длительности импульса излучения, однозначно определялась энергией излучения E или напряжением накопителя блока питания $U_{\text{нак}}$ и могла меняться в пределах $/3 \cdot 10^6 \div \pm 6 \cdot 10^8 /$ Вт·см⁻².

Как показано в /4/, в таком режиме нейтральные частицы составляют более 95% от общего числа частиц в потоке. Разлет ионной компоненты сосредоточен в узком телесном угле, заряд ионов - в основном /+1/. Кроме того, выходу ионов в направлении кольца будут препятствовать экранировка трубкой и продольное магнитное поле адгезатора.

Стабильность параметров потоков атомов достигается сменой точки взаимодействия излучения с мишенью /4/. Диаметр пятна взаимодействия - около 1 мм, область сканирования - круг с диаметром около 3 мм. Нестабильность общего числа атомов в потоке при стендовых испытаниях источника от импульса к импульсу не превышала 5%. Ресурс источника при таких условиях - $\geq 10^6$ срабатываний / $q \leq 1 \cdot 10^8$ Вт·см⁻²/.

Задержка между запускающим блоком питания источника сигналом и моментом взаимодействия излучения с мишенью составляет 220 мкс. Запуск производится системой синхронизации работы ускорителя. Часть излучения основного лазера отводится на фотодиод, что позволяет контролировать момент появления излучения.

На рис.2 представлены зависимости скорости атомов свинца в максимуме распределения / $R_k = 4$ см/ для различных значений q .

На рис.3 показаны зависимости средних значений концентрации n_a и парциального давления p_a в потоке атомов свинца при загрузке кольца радиусом 4 см, от величины $U_{\text{нак}}$ /погрешность измерений $\approx 20\%$. Изменения n_a , N_a для фиксированного значения $V_{\text{нак}}$ при изменении R_k показаны на рис.4, а длительность потока атомов - на рис.5. Следует отметить, что параметры потоков атомов удовлетворяют требованиям по загрузке колец ионами, полученными в расчетных работах /например /6/ /.

Процессы накопления ионов в электронных кольцах и поведение электрон-ионных образований детектировались по тормозному излучению электронов /2/. Использовались два детектора, каждый на основе фотоэлектронного умножителя и сцинтиллятора из полистирола. Один из детекторов /обзорный/ располагался на расстоянии ≈ 2 м от камеры адгезатора. Он служил для регистрации γ -излучения, возникающего при посадке кольца на элементах конструкции

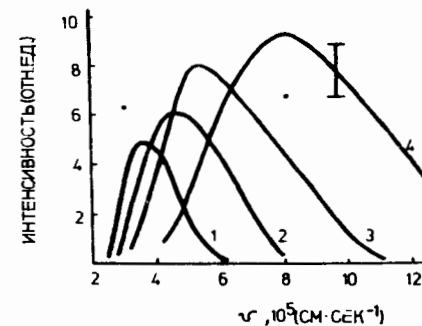


Рис.2. Распределение по скорости атомов свинца: 1 - $q \approx 2,7 \cdot 10^7$ Вт·см⁻² / $U_{\text{H}} = 775$ В, фильтр ПС-3/; 2 - $q \approx 4,3 \cdot 10^7$ Вт·см⁻² / $U_{\text{H}} = 680$ В/; 3 - $q \approx 1,6 \cdot 10^8$ Вт·см⁻² / $U_{\text{H}} = 775$ В/; 4 - $q \approx 2,5 \cdot 10^8$ Вт·см⁻² / $U_{\text{H}} = 850$ В/.

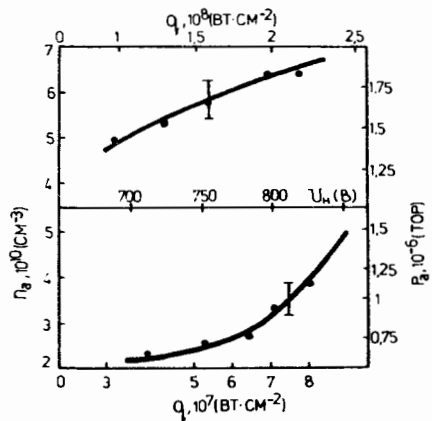


Рис.4. Зависимости средних значений концентрации p_a и потока атомов N_a при изменении R_k для значения величины $q \approx 2,5 \cdot 10^8$ Вт·см⁻² / $U_H = 850$ В/.

камеры после окончания процесса сжатия, а также при потерях в процессе сжатия кольца. Второй детектор располагался непосредственно у измерительного патрубка адгезатора и регистрировал γ -излучение из медианной плоскости камеры. Детекторы регистрировали излучение как в токовом, так и в счетном режимах в строб-импульсах различной длительности $\tau_{стр}$. Число зарегистрированных за единицу времени γ -квантов N_γ пропорционально произведению числа электронов N_e и ионов N_i в кольце.

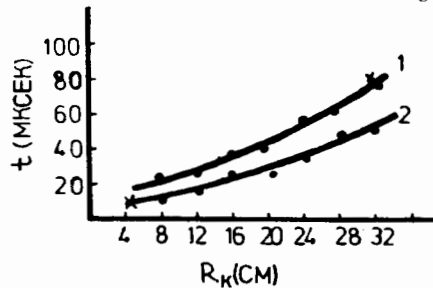
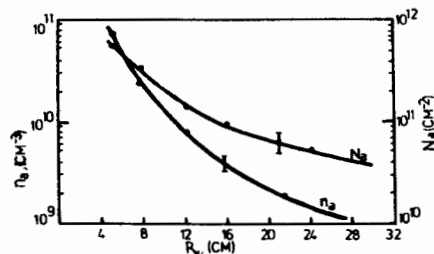


Рис.5. Зависимость длительности потока атомов от значения R_k .
1 - $q \approx 2,5 \cdot 10^8$ Вт·см⁻² / $U_H = 850$ В/;
2 - $q \approx 4,3 \cdot 10^7$ Вт·см⁻² / $U_H = 680$ В/.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты по загрузке электронного кольца ионами с помощью лазерного источника проводились в основном при вакууме $2 \cdot 10^{-8} \div 2 \cdot 10^{-7}$ Тор. Установлено, что размещение источника в камере

Рис.3. Зависимость средних значений концентрации p_a и парциального давления p_a в потоке атомов свинца при загрузке кольца радиусом $R_k = 4$ см от величины U_H и q . Нижняя кривая соответствует случаю ослабления лазерного излучения фильтром ЖЗС-9 /коэффициент пропускания 0,34/.



адгезатора не привело к ухудшению вакуума в ней. Первые сто - двести срабатываний источника приводили к ухудшению вакуума на $1 \div 2 \cdot 10^{-7}$ Тор, в дальнейшем ухудшения практически не наблюдалось. Связан этот процесс, по-видимому, с удалением при первых срабатываниях пленки окислов материала мишени и адсорбированных на поверхности мишени газов. Таким образом, после установки источника, разгерметизации камеры необходимо производить отдельное включение источника для "чистки" поверхности мишени.

Источник, размещенный в камере адгезатора, не оказывал влияния на импульсные магнитные поля адгезатора, т.е. на динамику сжатия электронных колец. Это подтверждает правильность выбора материалов источника и его конструкции, достаточную точность юстировки трубы в патрубке.

Относительная стабильность мощности излучения /так же, как и его положение во времени/ в реальных условиях работы на ускорителе могла оперативно контролироваться с помощью фотодиода, разброс значений не превышал 5%.

Использованная система юстировки лазерного излучения и механизм сканирования по мишени показали свою надежность: на мишени /после примерно $3 \cdot 10^4$ срабатываний/ область эрозии представляет кольцо с размерами, соответствующими расчетным.

Рабочая частота срабатывания источника доходила до 10 Гц.

По окончании первой серии экспериментов на КУТИ-20, на стенде были проверены параметры рабочего варианта источника. Измерения показали, что параметры потоков атомов, с точностью до 10%, не изменились.

Проведенные эксперименты позволили оценить по тормозному излучению электронов в кольце длительность потока атомов τ и скорость его распространения. На рис.6 приведена осциллограмма сигнала тормозного излучения при инъекции атомов в кольцо с $R_k \approx 35$ см /в постоянном магнитном поле, без сжатия кольца/. При этом глубина потенциальной ямы в кольце незначительна для захвата ионов, т.е. длительность тормозного излучения электронов соответствует времени их взаимодействия с атомами инжектируемого потока. Видно, что длительность потока атомов / ≈ 80 мкс/ хорошо согласуется с данными рис.5. На расстоянии 35 см пакет атомов "расплывается" до таких величин из-за начального разброса скоростей атомов. На рис.7 приведена осциллограмма сигнала тормозного излучения из кольца радиусом примерно 3,5 см, в которое инжектируется поток атомов. После начального сигнала, соответствующего прохождению через кольцо потока атомов с длительностью $\tau \approx 10 \div 15$ мкс /что также совпадает с данными рис.5/ наблюдаются сигналы тормозного излучения электронов на накапливаемых ионах. По величине задержки Δt /на рис.6 и 7/ между сигналом с фотодиода лазера и сигналом тормозного излучения на атомах потока, с учетом известного расстояния мишень - кольцо была экспериментально определена скорость атомов свинца. Полученные значения V достаточно хорошо совпадают с данными рис.2.

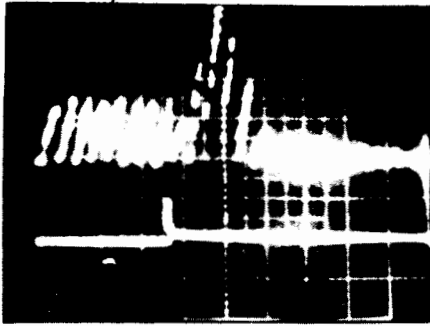


Рис.6. Осциллограммы сигналов с фотодиода лазера /внизу/ и детектора /вверху/ при инъекции атомов в кольцо с $R_k \approx 35$ см /50 мкс/дел, $\tau_{стр.} = 30$ мкс, $U_H = 850$ В/.

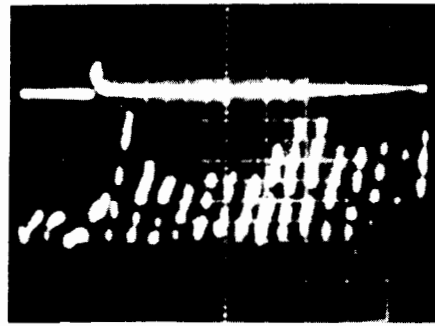


Рис.7. Осциллограммы сигналов с фотодиода лазера /вверху/ и детектора /внизу/ при инъекции атомов в кольцо с $R_k \approx 4$ см /20 мкс/дел, $\tau_{стр.} = 10$ мкс, $U_H = 680$ В/.

Эксперименты по загрузке колец ионами свинца проходили при оценочном количестве электронов в кольце $/5 \div 7/ \cdot 10^{12}$.

Поперечное сечение потока атомов медианной плоскостью имеет размер несколько сантиметров /из-за относительно больших размеров коллимирующих отверстий в трубе/, однако длительность потока /несколько десятков микросекунд/ значительно меньше времени сжатия кольца /около 2,5 мс/. Поэтому, с учетом времени распространения потока, было возможно инжектировать атомы в электронные кольца определенного радиуса.

На рис.8 приведены осциллограммы тока в обмотке третьей ступени сжатия и сигнала тормозного излучения из кольца после срабатывания источника. Источник сработал за 600 мкс до максимума тока, ФЭУ работал в режиме счета γ -квантов в строб-импульсах. Видно, что после прохождения потоков атомов через кольцо интенсивность γ -излучения сохраняется. Таким образом, произошло накопление ионов свинца в электронном кольце. Отношение количества γ -квантов N_γ из сжатого кольца при его загрузке ионами свинца и при накоплении ионов из остаточного газа камеры /источник отключен/ в одинаковых по длительности стробах составляло величину $50 \div 70$.

Как уже указывалось, с помощью изменения мощностного режима работы источника возможна регулировка концентрации атомов n_a в потоке, пересекающем электронное кольцо. Диапазон изменения n_a определялся предварительной настройкой лазерного источника. Плотность потока лазерного излучения на мишень могла меняться путем изменения $U_{нак}$, а также с помощью ослабляющих излучение светофильтров. Перекрывался практически весь диапазон рабочих значений концентрации атомов. При плотности потока $q \approx$

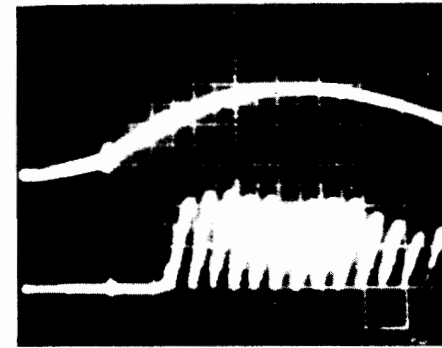


Рис.8. Осциллограмма сигналов тока в третьей ступени сжатия /вверху/ и детектора /внизу/ /200 мкс/дел, $\tau_{стр.} = 100$ мкс, $U_H = 680$ В/.

$= 2,5 \cdot 10^8$ Вт·см $^{-2}$ ($n_a \approx 5 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$) происходит полный или частичный развал кольца /рис.9/.

На рис.9а показана осциллограмма сигнала с обзорного детектора. Видно, что инъекция в кольцо

потока с повышенной концентрацией атомов приводит к появлению большого по величине сигнала тормозного излучения, предшествующего сигналу "обратной" высадки. При меньших значениях q первый сигнал отсутствует. Сигнал со второго детектора, работающего в токовом режиме при сопротивлении нагрузки ФЭУ 50 Ом, приведен на осциллограмме рис.9б. Отсутствие сигналов тормозного излучения после первого импульса наглядно показывает прекращение в кольце процессов накопления ионов. При $q \approx 1 \cdot 10^7$ Вт·см $^{-2}$ ($n_a \approx 5 \cdot 10^8$ см $^{-3}$) тормозного излучения из кольца с учетом чувствительности используемых детекторов не наблюдалось. Таким образом, представляется возможным при соответствующей настройке лазерного источника количественно оптимизировать процесс загрузки кольца ионами.

При инъекции атомов в кольцо большого радиуса /вплоть до 35 см/ и дальнейшем его сжатии наблюдались устойчивые сигналы тормозного излучения, существовавшие до момента разрушения кольца после окончания сжатия. Такой экспериментально зарегистрированный факт указывает на возможность использования времени сжатия загруженного кольца для повышения среднего заряда накапливаемых ионов.



а/



б/

Рис.9. Осциллограммы сигналов тормозного излучения в случае разрушения кольца /500 мкс/дел, $U_H = 850$ В/ а/ с обзорного детектора; б/ с детектора камеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты показали, что лазерный источник атомов применим для загрузки ионами электронных колец в коллективном ускорителе.

Опытная эксплуатация источника показала правильность выбора конструкции, используемых в ней материалов, а также высокую надежность работы. Подтверждены значения основных параметров потока атомов свинца, полученных в результате предварительных стендовых исследований работы лазерного источника. Устойчивые сигналы тормозного излучения показывают загрузку электронного кольца ионами свинца.

Управляемость процессом загрузки кольца с помощью лазерного источника позволит в дальнейших экспериментах оптимизировать режим накопления ионов тяжелых элементов и получить его количественные характеристики.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам ОНМУ, обеспечившим уверенную работу ускорителей при опытной эксплуатации лазерного источника атомов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.
2. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-12963, Дубна, 1980.
3. Быковский Ю.А. и др. ОИЯИ, Р13-83-502, Дубна, 1983.
4. Быковский Ю.А. и др. ОИЯИ, Р9-83-501, Дубна, 1983.
5. Миронов В.Е. и др. ОИЯИ, 9-83-536, Дубна, 1983.
6. Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д. ОИЯИ, 9-80-124, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 декабря 1983 года.

Миронов В.Е. и др.

9-83-837

Опытная эксплуатация лазерного источника атомов на КУТИ-20 и ПКУТИ

Описываются схемы загрузки ионами электронных колец с помощью лазерного источника атомов и его размещение в камере адгезатора. Приводятся параметры потоков атомов свинца, инжектируемых в электронное кольцо. Для качественной диагностики процессов загрузки кольца ионами использовались детекторы тормозного излучения электронов на базе ФЭУ и сцинтилляторов. КУТИ-20 и ПКУТИ работали в режиме сжатия колец до радиуса примерно $3+4$ см с числом электронов в кольце $(5+7) \cdot 10^{12}$ при вакууме $2 \cdot 10^{-8}$ Тор. Экспериментально зарегистрирована устойчивая загрузка колец ионами свинца. Управляемость процессом загрузки позволяет сделать вывод о возможности его оптимизации и получении количественных характеристик. Опытная эксплуатация лазерного источника атомов показала высокую надежность его работы.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Mironov V.E. et al.

9-83-837

Test Exploitation of Laser Atomic Source on KUTI-20 and 11 KUTI Accelerators

Schemes of ion loading of electron rings by using the laser atomic source, and its disposition in an adgezator chamber are described. Parameters of Pb atom fluxes, injected into electron ring, are presented. Detectors of bremsstrahlung, based on PELL and scintillator, were used for qualitative diagnosis of processes of ring loading with ions. KUTI-20 and PKUTI operated in the regime of ring compression up to about $3+4$ cm radius, at ring electron number $(5-7) \cdot 10^{12}$ at vacuum $2 \cdot 10^{-8}$ Tor. Stabilized ion loading of rings is registered experimentally. Control of loading process permits to draw a conclusion that its optimization and quantitative characteristics can be obtained. Primary exploitation of laser atomic source showed a high reliability of its work.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.