

УДК 537.533

## Экспериментальное исследование мегаваттного протяженного пучка по излучению света

И. А. Банников

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

И. И. Морозов, М. Ю. Степанов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*Представлены результаты экспериментального исследования мегаваттных пучков ионов. Измерялась интенсивность излучения  $\alpha$ -линии Бальмера атомов дейтерия ( $\lambda = 656,5$  нм) и водорода ( $\lambda = 656,3$  нм), возбуждаемых при прохождении ионного пучка через остаточный газ в камере установки. По оптическим измерениям определялись размеры пучка, положение его центра и расходимость, а также распределение интегральной плотности тока пучка в поперечном сечении. Данные, измеренные оптическим методом, используются для исследования зависимости интенсивности свечения от плотности тока и длительности пучка с учетом изменения давления газа в камере. Предложенная методика успешно используется в качестве мониторинга мощного ионного пучка.*

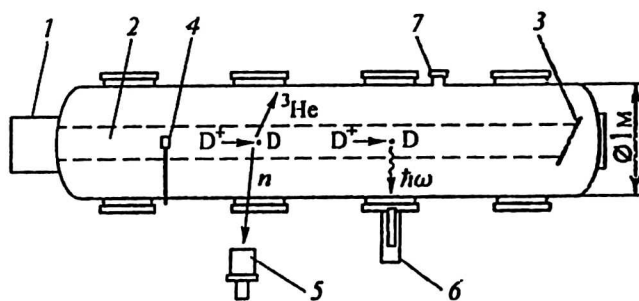
В экспериментах с мегаваттными квазистационарными ионными пучками, а также в процессе кондиционирования источников ИК-50 [1] существует необходимость оперативного контроля за направленностью и параметрами пучка. В первую очередь необходим контроль положения центра пучка и его поперечных размеров. Также представляют интерес определение расходимости пучка, распределение интегральной плотности тока пучка в поперечном сечении и поведение пучка во времени. С этой целью на экспериментальном стенде ИК-50 используется диагностический комплекс, включающий в себя как контактные, так и бесконтактные измерения, сравнение которых дает дополнительную информацию о пучке.

На рис. 1 показана схема экспериментального стенда, на котором проводятся испытания ионных источников ИК-50 и исследуются условия транспортировки пучков. При работе ионного источника концентрация газа в камере изменяется от  $5 \cdot 10^{10}$  до  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>. На рисунке также показано расположение детекторов, с помощью которых проводится диагностика пучков. В основе бесконтактных методов диагностики лежат измерение интенсивности излучения линии Бальмер- $\alpha$  атомов дейтерия и водорода, возбуждаемых при прохождении ионного пучка через остаточный газ в камере установки, и регистрация нейтронов, образующихся в реакциях синтеза в результате взаимодействия дейтонов пучка с атомами остаточного газа дейтерия в камере [2, 3]. Также использовались датчик тока (металлическая пластина, вводимая непосредственно в пучок) и манометрический преобразователь для измерения концентрации газа в вакуумной камере установки.

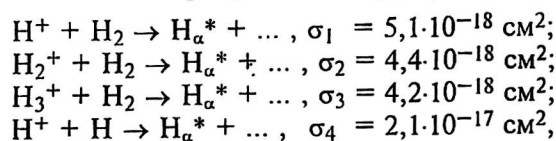
В настоящее время по данным оптических измерений определяются размеры пучка, положение его центра и расходимость, а также наблюдается поведение пучка во времени. Данные измерений используются для определения распределения интегральной плотности тока пучка в поперечном сечении.

Рис. 1. Схема экспериментального стенда для испытания источника ИК-50:

- 1 — ионный источник ИК-50;  
 2 — ионный пучок;  
 3 — приемник пучка (титановый лист толщиной 2 мм);  
 4 — датчик тока; 5 — детектор нейтронов;  
 6 — устройство оптической диагностики;  
 7 — манометрический преобразователь ПММ-46

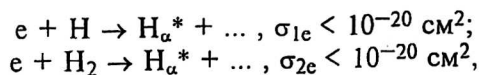


Диагностика основана на измерении интенсивности излучения линии Бальмер- $\alpha$  атомов водорода ( $\lambda = 656,3$  нм) и дейтерия ( $\lambda = 656,5$  нм), возбуждаемых при прохождении ионного пучка через остаточный газ в камере установки. Характерные реакции, происходящие в водородном пучке и приводящие к излучению линии Бальмер- $\alpha$ , согласно [4, 5] для  $E = 30$  кэВ:



где  $\text{H}_\alpha^*$  — возбужденный атом водорода,  $\sigma_i$  — соответствующее данному типу взаимодействия суммарное сечение всех реакций, приводящих к излучению.

В ионном пучке присутствуют компенсирующие положительный объемный заряд электроны с энергией 5–10 эВ. Согласно [5]:



поэтому данного типа реакции можно не рассматривать как дополнительный источник света.

Для измерения интенсивности излучения линии Бальмер- $\alpha$  была использована оптическая система, показанная на рис. 2. Использовались сферическая линза с фокусным расстоянием 7 см и пленочный интерференционный фильтр линии Бальмер- $\alpha$ .

Излучение регистрировалось при помощи линейки из 16 фотодиодов ФД-256. Поданное на фотодиод обратное напряжение смещения обеспечивает линейный режим работы фотодиода, тем самым световой поток прямо пропорционален току фотодиода. На рис. 2 показано расположение фотодиодов в линейке. По вертикали они расположены в два ряда по 8 фотодиодов так, что между центрами каждых двух соседних фотодиодов расстояние 4 мм.

Сигналы с линейки фотодиодов подаются на АЦП-101SK [6] в стандарте КАМАК, далее цифровые осциллограммы считываются и запоминаются в ЭВМ, и одновременно выводятся на экран монитора. Запуск АЦП синхронизирован с моментом поджига дуги в генераторах плазмы источника ИК-50, что соответствует моменту появления пучка.

Каждый фотодиод регистрирует излучение источника света, “вырезанного” из области пучка и представляющего собой вытянутый вдоль оси наблюдения параллелепипед. Расчеты, учитывающие параметры оптической системы, показывают, что фотодиод “вырезает” из пучка параллелепипед с сечением  $\sim 2,2 \times 2,2$  см. Калибровка оптической диагностики с использованием точечного источника света показала, что расстояние между центрами объемов, “вырезаемых” двумя соседними фотодиодами, составляет 2,2 см.

Калибровка также показала, что 85 % света, регистрируемого фотодиодом, приходит из области размерами 2,2 см.

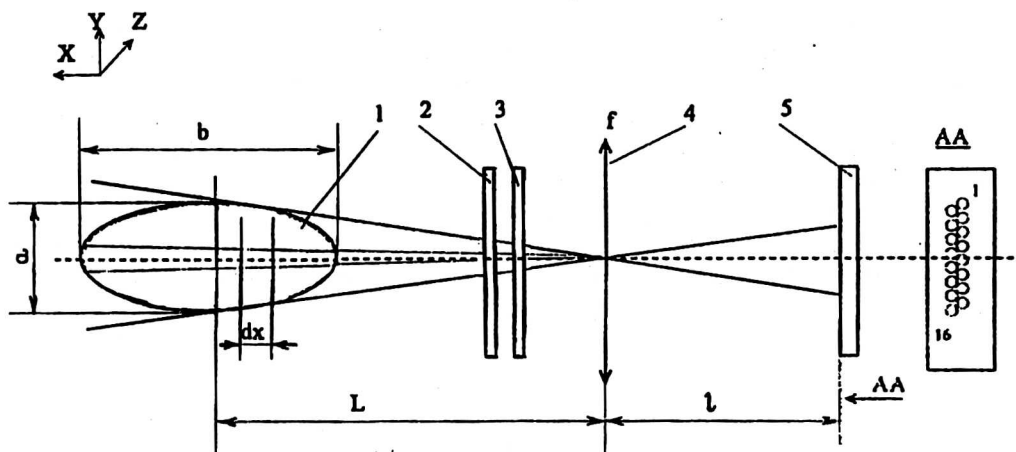


Рис. 2. Схема оптической диагностики и расположение фотодиодов в линейке:

- 1 — излучающий объем; 2 — пленочный интерференционный фильтр линии Бальмер- $\alpha$ ;
- 3 — ослабляющий фильтр; 4 — линза с фокусным расстоянием 7 см; 5 — линейка из 16 фотодиодов ФД-256; AA — плоскость фотодиодов;  $L = 1,5$  м;  $l = 10$  см;  $a = 12$  см;  $b = 24$  см

Фотодиод измеряет поток, который пропорционален интегралу плотности тока пучка:

$$W\alpha \sim \iiint j(x, y, z) dx dy dz.$$

Если считать, что по координатам  $y$  и  $z$  (см. рис. 2) плотность тока  $j(x, y, z)$  меняется слабо в пределах “вырезаемого” объема, то можно написать:

$$W\alpha \sim \int j(x, y, z) dx.$$

Таким образом, отдельный фотодиод измеряет поток, пропорциональный интегральной плотности тока вдоль поперечного сечения пучка по одной координате. Следовательно, по изменению величины сигнала от диода к диоду можно судить о размерах пучка и положении его в пространстве. При перемещении системы измерения вдоль самого пучка (координата  $z$ ), зная размеры сечения пучка в разных точках по  $z$  (например на выходе из источника и возле приемной мишени), можно рассчитать расходимость пучка или определить место его кроссовера.

Все элементы оптической системы размещены на платформе длиной 55 см. Платформа крепится на два прутка, которые в свою очередь при помощи кронштейнов крепятся к фланцу, имеющему смотровое окно, через которое и производится наблюдение пучка. Оптическая система устанавливается как на верхнем, так и на боковом фланце установки, благодаря чему возможно проводить измерения вдоль обеих координат поперечного сечения пучка. Расположение данной диагностической системы схематически показано на рис. 1. Вакуумная камера состоит из четырех последовательно соединенных блоков (см. рис. 1), каждый из которых имеет по одному смотровому окну сбоку и сверху, это позволяет проводить измерения вдоль направления распространения пучка с шагом 1 м.

Достоинства оптической диагностики — ее бесконтактность и расположение ее средств вне вакуумной камеры, что не требует вакуумных вводов.

На рис. 3 представлены результаты проведенных измерений, демонстрирующие характер поведения пучка. Измерения были проведены на расстоянии 200 см от источника при токе пучка  $I = 30$  А. На рис. 3, а показана зависимость сигнала с одного фотодиода от времени. Величина этого сигнала пропорциональна интегралу плотности тока ионов в пучке, таким образом, мы имеем возможность наблюдать динамику поведения тока пучка во времени. На рис. 3, б показан сигнал с датчика тока (ток измерялся на введенную в пучок металлическую пластину площадью  $12 \text{ см}^2$ ). Ниже на рисунке 3, в показан график изменения концентрации газа в камере при прохождении ионного пучка, измерения проводились манометрическим преобразователем ПММ-46. Резкие провалы на осциллограммах излучения линии Бальмера- $\alpha$  и с датчика тока обусловлены пробоями в электродной системе ионного источника.

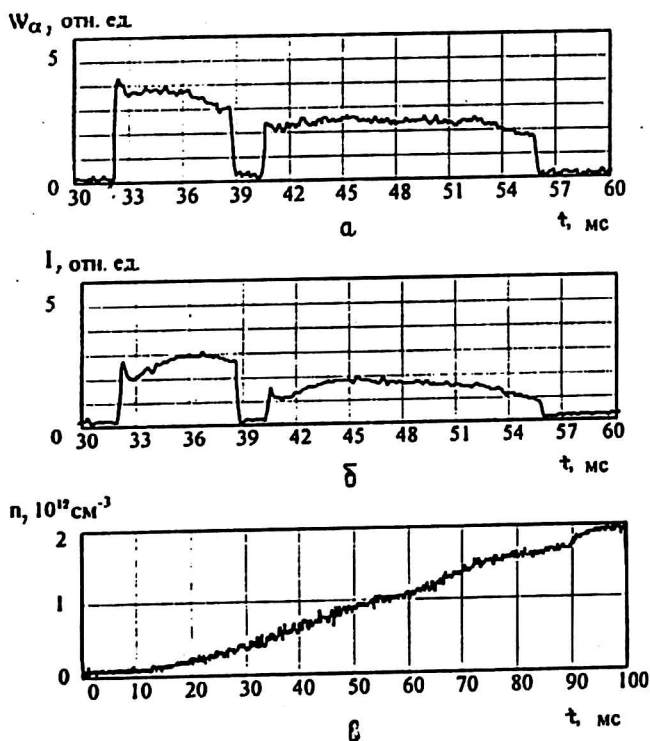


Рис. 3. Зависимости от времени:  
 а — интенсивность излучения  $\alpha$ -линии серии Бальмера;  
 б — сигнал с датчика тока;  
 в — концентрация газа в вакуумном объеме стэнда ИК-50 при прохождении ионного пучка через камеру

На рис. 4 приведено измеренное распределение интегралов плотности тока в поперечном сечении пучка в начале импульса (распределение вдоль меньшего размера пучка). Измерения были проведены на расстоянии 300 см от источника при токе пучка  $I = 30$  А; 16 измеренных точек на графике соответствуют сигналам с 16 фотодиодов линейки (см. рис. 2). На основании этих измерений можно делать выводы о размере пучка и положении его центра относительно центра камеры.

Калибровка оптической системы показала, что центр линейки (центр между 8-м и 9-м фотодиодами) направлен на центральную ось камеры. Поскольку центр пучка совпадает с максимумом распределения интегралов плотности тока, из приведенного на рис. 4 распределения следует, что центр пучка проходит по центру камеры с точностью  $\pm 0,5$  см. Также видно, что распределение симметрично относительно центра камеры.

Ширина пучка определялась как ширина кривой Гаусса на высоте  $1/e$ , которой аппроксимировались измеренные значения распределения интегралов плотности тока. Из измерений, представленных на рис. 4, следует, что шири-

на пучка по меньшему размеру на расстоянии 300 см от источника составляет  $20 \pm 1,5$  см.

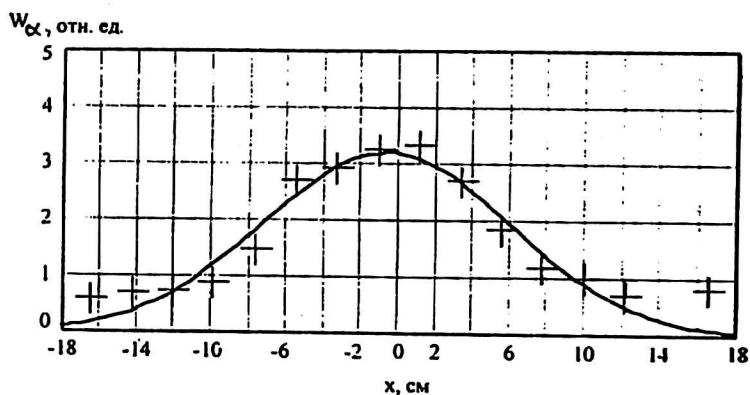


Рис. 4. Распределение интегралов плотности тока в поперечном сечении пучка (вдоль меньшего размера пучка)

На рис. 5 приведены измеренные значения ширины пучка по меньшему размеру на равных расстояниях от источника вдоль направления распространения пучка. Ширина пучка на выходе из источника, определяемая апертурой ионно-оптической системы, составляет 12 см. Из графика видно, что до 3 м пучок равномерно расходится. При этом эффективная расходимость пучка на 3 м составляет  $(1,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$  рад.

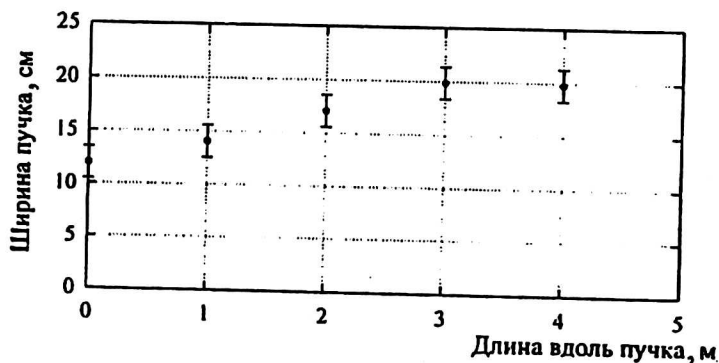


Рис. 5. Ширина пучка по меньшему размеру на разных расстояниях от источника

Систематическая погрешность эксперимента, связанная с нестабильностью работы системы питания источника и системы газонапуска, в сумме не превосходит 10 %. Ошибка, связанная с юстировкой оптической системы, также не превышает 10 %.

Предложенная методика успешно используется в качестве мониторинга мощного ионного пучка. На основе оптического метода разрабатывается метод реконструктивной томографии пучка, что позволит измерять не только интегральные плотности тока пучка, но и определять распределение плотности тока по сечению.

### Литература

1. *Dimov G. I., Morozov I. I.*//Rev. Sci. Instrum., 1990. № 1(II). P. 401.
2. *Морозов И. И., Соколов В. Г., Степанов М. Ю.*//Прикладная физика. 1999. № 5. С. 88.

3. Морозов И. И., Соколов В. Г., Степанов М. Ю. // Приборы и техника эксперимента. 1999. № 2. С. 95—99.
4. Atomic data for controlled fusion research. (Oak Ridge National Laboratory), 1977.
5. Haifield L. L., Hughes R. H. // Phys. Rev., 131, 2556 (1963).
6. Батраков А. М., Козак В. Р., Кругляков М. Э. Препринт 88—98 ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1988.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 98-02-17815).

## An experimental research of megawatt extended beam on light radiation

*I. A. Bannikov*

Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia

*I. I. Morozov, M. Yu. Stepanov*

Budker Institute of nuclear physics, Novosibirsk, Russia

*The results of an experimental research of ion megawatt beams are submitted. The radiation intensity of Balmer atom  $\alpha$ -line of deuterium ( $\lambda = 656,5$  nm) and hydrogen ( $\lambda = 656,3$  nm) raised at passage of ion beam through residual gas in the chamber of installation was measured. On optical measurements of the beam sizes, situation of its center and beam divergence and also distribution of integrated current density in cross section were determined. The data measured by optical method are used for research of radiation intensity dependence from current density and beam duration with the account of gas pressure change in the chamber. The offered technique is successfully used as monitoring powerful ion beam.*