

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 535.853.33-3

### СПЕКТРОМЕТР ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ

© 2000 г. А. В. Бурдаков, А. Ю. Заболотский, Б. А. Князев\*, В. С. Койдан, С. В. Полосаткин,  
В. В. Поступаев, А. Ф. Ровенских

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11*

Поступила в редакцию 30.12.99 г.

Спектрометр вакуумного ультрафиолетового излучения, предназначенный для использования в экспериментах на плазменной установке ГОЛ-3-П, построен на базе ранее разработанного вакуумного монохроматора МВ-3. Он укомплектован современными, в том числе и цифровыми, средствами регистрации спектра. Спектрометр может использоваться либо в режиме регистрации спектра с длительностью экспозиции от 1 мкс, либо в режиме измерения изменений во времени интенсивности излучения на выбранной длине волны. Рабочий диапазон длин волн 50–400 нм.

В данной статье описана модернизация вакуумного монохроматора МВ-3 (разработка Ленинградского государственного университета [1]) для использования его в проводимых нами экспериментах по анализу вакуумного ультрафиолетового излучения горячей плазмы на установке ГОЛ-3-П [2], время жизни горячей плазмы в которой составляет десятки микросекунд. При модернизации прибора преследовались следующие цели:

- возможность регистрации спектров вакуумного ультрафиолетового (в.у.ф.) излучения плазмы с временем экспозиции не хуже 1 мкс;
- контроль временного хода интенсивности выбранных линий с разрешением ~20–50 нс;
- перевод системы регистрации полностью на электронику и исключение использования фотоматериалов;
- обеспечение работоспособности прибора на фоне мощного  $\gamma$ -излучения и интенсивных импульсных электромагнитных помех.

Для достижения этих целей монохроматор был оснащен новыми узлами регистрации разложенного в спектр излучения при сохранении существовавшей оптической схемы и точной механики.

#### РЕГИСТРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

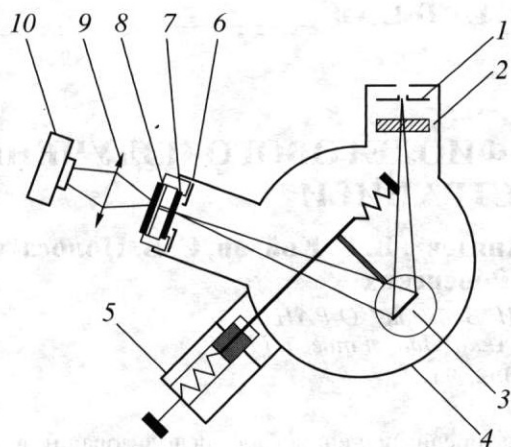
Вакуумный монохроматор МВ-3 рассчитан на работу в диапазоне длин волн 50–400 нм и собран по схеме Сейя–Намиока. В качестве диспергирующего элемента используется вогнутая дифракционная решетка 1200 штрихов/мм с радиусом кривизны 50 см. Особенностью схемы является то, что входная и выходная щели расположены

неподвижно и при изменении длины волны сохраняется угол выхода излучения. Сканирование спектра осуществляется поворотом решетки, при этом угол между падающим и дифрагированным лучами равен 70°.

Для использования в экспериментах на установке ГОЛ-3-П схема прибора была изменена следующим образом (рис. 1). В узел входной щели установлено устройство с фильтром из фторида лития, вдвигаемым снаружи с использованием уплотнения Вильсона. Для безмасляной откачки объема монохроматора соединен технологической высоковакуумной магистралью с насосами ТМН-450. Перепад давления в монохроматоре относительно плазменной камеры установки обеспечивается входной щелью, характерная ширина которой составляет 100 мкм. Разработано два сменных выходных узла: а) для регистрации спектра излучения в заданный момент времени и б) для регистрации яркости выбранной линии с временным разрешением (на рис. 1 прибор показан с узлом регистрации спектра). Для защиты от мощного жесткого излучения, возникающего на установке при включении сильноточного релятивистского электронного пучка, выходной узел имеет местную свинцовую защиту толщиной 5 см.

При регистрации временного хода интенсивности выбранной линии используется прежний узел выходной щели. К этому узлу пристыковывается комбинированный приемник, состоящий из солнечно-слепого ФЭУ-142 (для работы в длинноволновом участке спектра 110–365 нм) и вакуумного фотодиода с алюминиевым катодом (для работы ниже 110 нм). Вакуумный фотодиод расположен перед фотоумножителем и перекрывает половину высоты выходной щели. Фотоумножитель помещен в магнитный экран из стали АРМКО для за-

\*Новосибирский государственный университет.



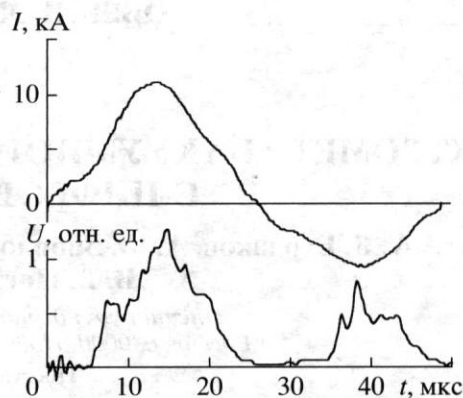
**Рис. 1.** Модернизированный вакуумный монохроматор МВ-3. 1 – входная щель, 2 – убираемый фильтр (LiF), 3 – дифракционная решетка, 4 – корпус, 5 – механизм перестройки длины волны, 6 – убираемая выходная щель, 7 – шевронная микроканальная пластина, 8 – люминофор на волоконной шайбе, 9 – согласующий объектив, 10 – цифровая камера.

щиты от влияния рассеянных магнитных полей вблизи соленоида установки ГОЛ-3-П. Регистрация сигналов осуществляется аналого-цифровым преобразователем Ф4226 (8 бит, 50 нс/отсчет). На рис. 2 приведен типичный сигнал ФЭУ-142 при регистрации линии  $L_{\alpha}$  водорода (121.6 нм).

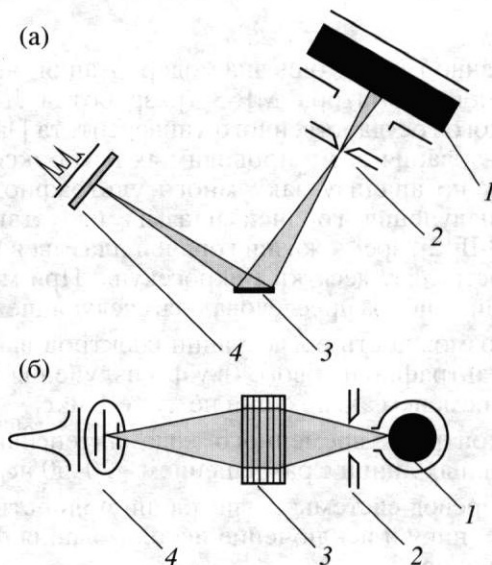
### ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

В монохроматоре применяется сферическая дифракционная решетка. Это позволяет проводить спектральные исследования источника излучения с пространственным разрешением. Используемый источник – плазменный шнур – имеет цилиндрическую геометрию со слабо изменяющимися вдоль продольной оси параметрами. Щель прибора расположена поперек оси шнура. При радиусе кривизны решетки 50 см, расстоянии от решетки до входной щели  $\approx 41$  см [1] на выходную щель фокусируется изображение шнура при расстоянии от источника до входной щели  $\approx 23$  см. Пространственное разрешение прибора составляет  $\Delta r \approx 1$  см при поле зрения 7 см. В этом случае в формировании изображения участвует отрезок шнура длиной  $\sim 2$  см (по координате поперек входной щели, рис. 3).

Для регистрации спектра с пространственным разрешением используется специальный регистрирующий узел (см. рис. 1), который подсоединяется к спектрометру вместо узла выходной щели. Первичным приемником излучения служит поверхность микроканальной пластины (м.к.п.) открытого электронно-оптического преобразователя (э.о.п.) МКУ-104-2 с диаметром рабочей облас-



**Рис. 2.** Ток разряда (вверху) и сигнал ФЭУ-142 (внизу) при работе в режиме монохроматора на длине волны 121.6 нм (излучение низкотемпературной плазмы прямого разряда).



**Рис. 3.** Схема работы спектрометра с пространственным разрешением: а – вид сверху, б – вид сбоку. 1 – источник в.у.ф.-излучения (протяженный плазменный шнур), 2 – входная щель, 3 – дифракционная решетка, 4 – приемная микроканальная пластина.

ти 40 мм. Для усиления изображения в э.о.п. используются две м.к.п., установленные последовательно (шевронное расположение). Электронное изображение в э.о.п. конвертируется в видимое свечение люминофора выходного экрана э.о.п. Э.о.п. выполняет функции как масштабирующего усилителя, так и затвора, позволяющего выбирать длительность экспозиции  $\geq 1$  мкс.

Видимое изображение спектра фотографируется при помощи цифровой камеры KODAK DC-20. Пример получаемого кадра приведен на рис. 4. Согласование размера кадра с размером экрана э.о.п. осуществляется с помощью объектива



“Юпитер-3” (50 мм, 1 : 1.5). Камера DC-20 отличается следующими преимуществами: компактностью (102 × 61 × 31 мм), что существенно для габаритов радиационной защиты; высокой чувствительностью (800/1600 ISA); возможностью получения истинной измеренной яркости – в ней отсутствует какое-либо сжатие, преобразование или кодировка цифрового изображения внутри камеры; относительной дешевизной. Приемная светочувствительная матрица камеры имеет 501 × 240 ячеек. На матрицу напылен массив цветных светофильтров, который состоит из групп по 4 ячейки, снабженных разными светофильтрами. Светофильтры имеют достаточно плавные зависимости пропускания по спектру, поэтому свечение экрана э.о.п. регистрируется каждым из четырех цветовых слоев со своим коэффициентом чувствительности. Калибровка позволяет привести чувствительности всех слоев к одной и использовать полностью пространственное разрешение камеры. Пример расшифровки спектра, соответствующего кадру, изображенному на рис. 4, приведен на рис. 5.

Разрешающая способность прибора оценивается в 0.5 нм в центре поля при дисперсии 0.14 нм на ячейку. Следует отметить, что угол между приемной поверхностью м.к.п. (расположенной в плоскости выходной щели нормально к дифрагированному лучу) и фокальной плоскостью прибора составляет ~30°. В связи с этим на краях поля зрения возникают aberrации. Однако, благодаря высокой чувствительности прибора, при необходимости можно виньетировать дифракционную решетку, улучшая тем самым спектральное разрешение на краю экрана э.о.п. Наблюдается также положительная (подушкообразная) дисторсия, которую необходимо учитывать при цифровом усреднении яркости вдоль линии. Поскольку воспроизводимость установки длины волны при многократной перестройке спектрометра составляет ~0.03 нм [1], то точная привязка по спектру осуществляется по длинам волн водородных линий  $L_{\alpha}$  и  $L_{\beta}$ .

Необходимо отметить некоторые методические особенности совместной работы э.о.п. с камерой. В режиме большого усиления э.о.п. отдельный канал м.к.п. при попадании фотона работает практически в режиме насыщения и яркость свечения экрана э.о.п. определяется количеством сработавших каналов. В описываемой системе шаг каналов м.к.п. составляет 15 мкм, а оптическая система отображает плоскость люминофора на камеру таким образом, что эффективная ширина элемента матрицы камеры составляет 80 мкм (это разрешение согласуется с размером пятна на экране э.о.п. [3]). С учетом вытянутой формы ячейки матрицы на нее отображается  $n_0 \approx 40$  каналов м.к.п.

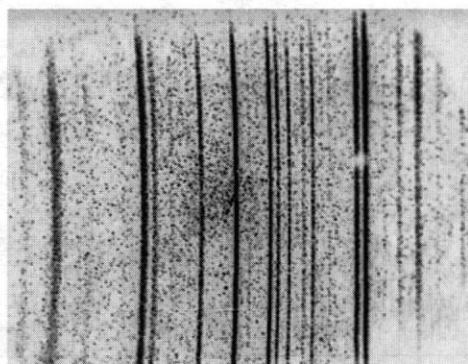


Рис. 4. Фотография с экрана э.о.п. (негативное изображение). По горизонтали – длина волны (номер ячейки приемной матрицы), по вертикали – координата по радиусу плазмы от –3.5 см (нижний край) до 3.5 см (верхний край).

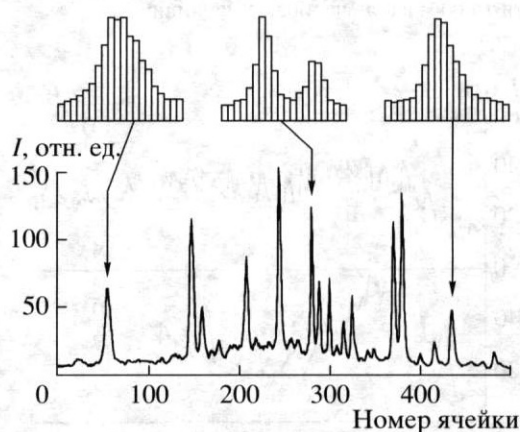
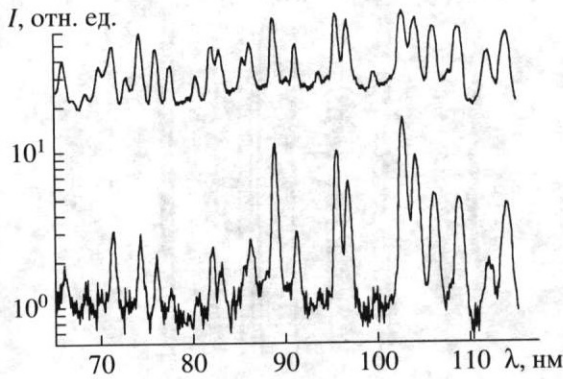
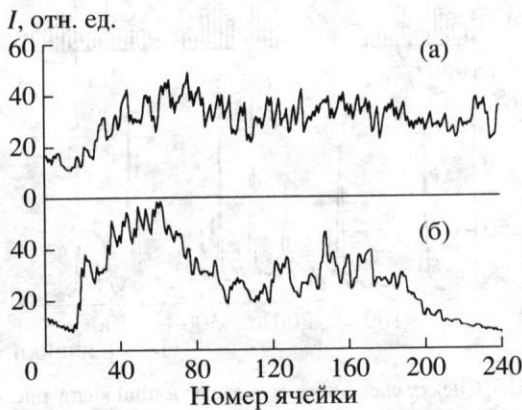


Рис. 5. Спектр свечения, соответствующий кадру рис. 4. Вверху показана аппаратная ширина некоторых линий. Усреднение по десяти точкам вдоль изображенной линии.

Динамический диапазон м.к.п., работающей в режиме коротких импульсов, ограничивается большим мертвым временем сработавшего канала [4]. Для сохранения линейности работы прибора как целого доля сработавших каналов не должна превышать 1/3–1/4. Это означает, что для слабых спектральных линий велика статистическая неопределенность измерения интенсивности излучения. Повысить точность этого измерения можно за счет уменьшения пространственного разрешения, проводя усреднение вдоль изображения линии при обработке кадра. Уровень темнового сигнала в типичных условиях составляет 4–6 единиц (уровень черного соответствует 0, белого – 255) и слабо изменяется по полю кадра, а разброс темнового сигнала на соседних ячейках обычно меньше единицы. Это позволяет проводить вычитание темновой засветки, что улучшает возможность обнаружения слабых линий. В наших условиях (кадр 1 мкс) линейность нарушается при за-



**Рис. 6.** Динамический диапазон прибора. Приведены два последовательных разряда в одинаковом режиме, чувствительность спектрометра отличается в 20 раз (за счет изменения напряжения на м.к.п.). Линейность сохраняется до сигнала ~50 единиц. Усреднение по десяти точкам вдоль изображения линии.



**Рис. 7.** Распределение яркости вдоль выбранной спектральной линии (приведены линии, соответствующие линиям спектра, изображенного на рис. 5, с номером ячейки по длине волны  $\lambda = 299$  (а) и  $435$  (б)). Усреднение по координате вдоль линии не проводилось.

светке, соответствующей амплитуде ~50 единиц, т.е. динамический диапазон в пределах одного кадра составляет ~50 (рис. 6). Расширить динамический диапазон можно, изменяя коэффициент усиления э.о.п., длительность экспозиции и ширину входной щели.

Оценим погрешность измерения в такой схеме. Обозначим среднюю плотность потока фотонов на единицу площади входной поверхности первой м.к.п. в э.о.п. (за поверхность удобно взять изображение ячейки фотоприемной матрицы DC-20) за время экспонирования через  $n$ , а вероятность создания “первичного” электрона в одном из каналов через  $\eta$ . После усиления в канале м.к.п. электронный поток попадает в несколько каналов второй м.к.п., вновь усиливается и после ускорения в плоскопараллельном промежутке кон-

вертируется в фотоны в люминофоре К-71. Конверсию “первичного” электрона в фотоны определим как усиление  $G$ . Наконец, фотоны через оптическую систему фокусируются на приемную матрицу фотокамеры, где создают  $\gamma$  электронов на один излученный люминофором фотон.

Погрешность измерения интенсивности падающего излучения отдельной ячейкой м.к.п. определяется статистическими флуктуациями падающего излучения  $\sigma_n$  (фотонный шум), флуктуациями вторичной эмиссии  $\sigma_n$ , усиления  $\sigma_G$  и конверсии  $\sigma_\gamma$ . Тогда дисперсия  $\sigma$  сигнала  $\langle s \rangle = \langle n \rangle \eta G \gamma$  будет равна [5]<sup>1</sup>

$$\sigma^2 \approx (\sigma_n \eta G \gamma)^2 + \langle n \rangle (\sigma_n G \gamma)^2 + \langle n \rangle \eta (\sigma_G \gamma)^2 + \langle n \rangle \eta G \sigma_\gamma^2. \quad (1)$$

Поскольку усиление для шевронной сборки велико,  $G \sim (10^6 - 10^7)$ , а  $\eta \sim 10\%$  и  $\gamma \sim (10^{-2} - 10^{-3})$ , то погрешностями  $\sigma_G$  и  $\sigma_\gamma$  в формуле (1) можно пренебречь. Из оставшихся членов первый описывается распределением Пуассона и  $\sigma_n^2 = \langle n \rangle$ , второй – биномиальным и  $\sigma_n^2 = \eta(1 - \eta)$  [6]. В результате для отношения сигнал/шум получаем выражение

$$\langle s \rangle / \sigma = \sqrt{\eta \langle n \rangle}. \quad (2)$$

Следует, однако, иметь в виду, что при использовании одиночной м.к.п. и при малых  $\eta$  и  $\gamma$  может возникнуть ситуация, когда последним членом в формуле (1) пренебречь нельзя.

В нашем случае на одну ячейку в максимуме интенсивности попадает ~10 вспышек, т.е.  $\langle s \rangle / \sigma \sim 30\%$ . Интегрируя по десяти ячейкам вдоль линии, имеем  $\langle s \rangle / \sigma \sim 10\%$ . Уровень статистического шума сигнала может быть также оценен из рис. 7, на котором приведено распределение яркости вдоль выбранных линий из спектра рис. 5. Точность измерения приблизительно совпадает с приведенными выше оценками. На рис. 7б отчетливо видны два максимума, которые указывают на радикальную неоднородность свечения плазменного столба на этой длине волны.

Из других методических особенностей прибора следует отметить, во-первых, некоторую несогласованность спектральной чувствительности камеры с цветом свечения люминофора используемого э.о.п. (который оптимизирован для работы с фотопленкой). Во-вторых, наличие цветочувствительности, которая, на первый взгляд, затрудняет работу камеры в составе спектрометра, на самом деле оказывается практически полезной – по цвету легко отбраковываются как артефакты в постановке эксперимента (например,

<sup>1</sup> В работе [5] эта формула записана с ошибкой, которая здесь исправлена.



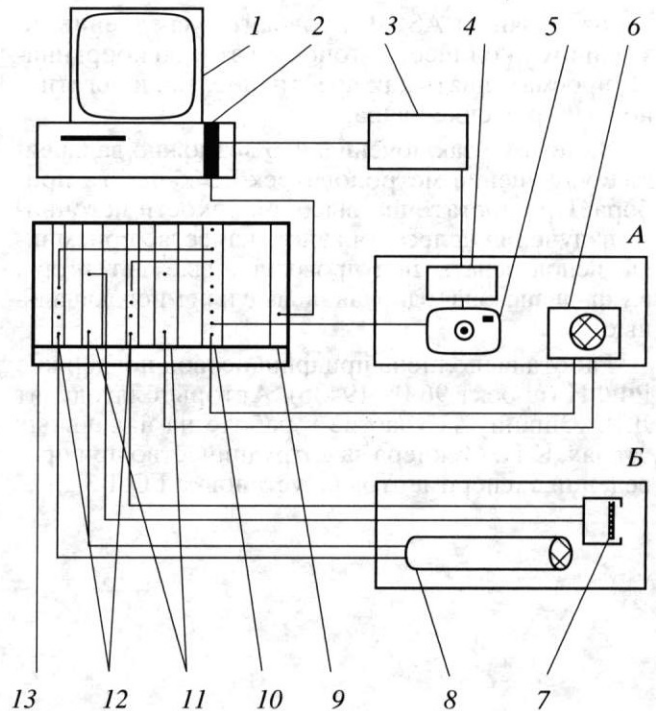
пробой по поверхности при недостаточно хорошем вакууме), так и отдельные ячейки матрицы, засвеченные жестким рентгеновским излучением (как правило, это одиночные ячейки с большой интенсивностью сигнала).

С помощью описанного приемника были проведены измерения в диапазоне длин волн 50–250 нм. При приближении к коротковолновой границе диапазона падала спектральная контрастность изображения (возрастал уровень паразитной засветки в центре поля м.к.п.). По-видимому, это обстоятельство связано с тем, что на приемник начинает частично попадать излучение, отраженное решеткой в нулевом порядке и затем рассеянное на элементах выходного патрубка.

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ

Спектрометр в составе диагностического комплекса установки ГОЛ-3-II находится в экспериментальном радиационно-опасном зале. Поэтому работа со спектрометром полностью автоматизирована (за исключением перестройки длины волны, которая при необходимости проводится вручную). Блок-схема управления спектрометром приведена на рис. 8. Основная часть электронных устройств выполнена в стандарте КАМАК. Используются блоки синхронизации (с точностью установки запускающего импульса 100 нс), источники напряжения для питания м.к.п. и ФЭУ-142 (точность 1 В), аналого-цифровые преобразователи для измерения электрических сигналов (ФЭУ-142, контроль импульса на м.к.п.). Источник 5 кВ для питания ускоряющего зазора м.к.п.–люминофор внешнего управления не имеет.

В состав установки входят две камеры DC-20, подключенные к одному последовательному порту компьютера типа IBM PC, работающие в режиме внешней синхронизации. Выбор нужной камеры осуществляется с отдельного пульта, откуда подаются команды *Готов*, *Стирание*, *Запуск*. Камера гальванически соединена с портом компьютера только во время обмена информацией для уменьшения риска получения неисправности из-за сильных электромагнитных помех, возникающих в момент срабатывания установки. Особенностью устройства камеры DC-20 является то, что процесс фотографирования начинается с задержкой ~580 мс относительно момента прихода команды *Запуск*. Нестабильность появления импульса синхронизации фотовспышки, совпадающего по времени с началом экспозиции, составляет ~2 мс. Поэтому в наших экспериментах камера обычно работала при максимальном времени экспозиции 30 мс, для того чтобы кадр э.о.п. был зарегистрирован с большой степенью надежности. Соответственно имеющийся на камере датчик освещенности был затемнен (установка экспозиции происходит только автоматически по показаниям этого датчи-



**Рис. 8.** Схема управления и регистрации: А – узел для регистрации спектра излучения в заданный момент времени, В – узел для регистрации яркости выборочной линии с временным разрешением. 1 – персональный компьютер IBM PC; 2 – интерфейсная плата PPI-AN-2 (позволяет подключить к PC два крейта КАМАК); 3 – пульт управления цифровыми камерами; 4 – плата управления цифровыми камерами; 5 – цифровая камера DC-20; 6 – электронно-оптический преобразователь; 7 – вакуумный фотодиод; 8 – ФЭУ-142; 9 – контроллер крейта K0607; 10 – генератор временных интервалов ГВИ-8М; 11 – высоковольтный источник питания; 12 – аналого-цифровой преобразователь Ф4226; 13 – крейт КАМАК.

ка). В случае процессов большей длительности проверялась возможность регулировки выдержки при помощи засветки датчика освещенности источником калиброванной яркости. Реальное значение установленной экспозиции в конкретном кадре содержится в информации, передаваемой камерой.

На установке ГОЛ-3-II камеры соединены с компьютером экранированными витыми парами длиной ~100 м. Скорость устойчивой передачи данных составляет 57600 бод. Объем файла данных во внутреннем формате камеры составляет ~125 кбайт, часть кадров записывается также в формате TIFF (для сохранения аспектного отношения размерность этого файла составляет 493 × 373 точки, объем ~566 кбайт). Результаты обрабатываются с использованием файлов внутреннего формата. Разработанная программа обработки позволяет просматривать разные цветовые плоскости, удалять рентгеновскую наводку, записывать горизонтальные и вертикальные се-

чения в файлы ASCII, проводить усреднение по заданному количеству точек по второй координате, просматривать как позитивное, так и негативное изображение кадра.

Заметим в заключение, что возможно дальнейшее улучшение метрологического качества прибора. При достаточно высокой яркости источника излучения целесообразно в качестве приемника использовать полупроводниковые детекторы в.у.ф.-диапазона (одноканальные или многоканальные).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 96-02-19436). Авторы благодарят Л.В. Юшкину за участие в работе на начальных этапах, К.И. Меклера за сотрудничество при проведении экспериментов на установке ГОЛ-3-И.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акоюн М.Е., Балякин И.И., Вилесов Ф.И. // ПТЭ. 1961. № 6. С. 96.
2. Agafonov M.A., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T. и др. // Plasma Physics and Contr. Fusion. 1996. V. 38. № 12A. P. A93.
3. Князев Б.А. // ПТЭ. 1991. № 1. С. 185.
4. Wiza J.L. // Nucl. Instrum. and Methods. 1979. V. 162. P. 587.
5. Frenkel A., Sartor M.A., Wlodawski M.S. // Applied Optics. 1997. V. 36. P. 5288.
6. Frieden B.R. Probability, statistical optics, and data testing: a problem solving approach. Springer-Verlag, 1983.