

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 621.385.6

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

© 2009 г. Г. С. Воробьев, А. А. Дрозденко, Д. А. Нагорный\*

Сумский государственный университет  
Украина, 40007, Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2  
\*Институт прикладной физики НАН Украины  
Поступила в редакцию 07.03.2008 г.

Принцип работы универсальной установки для измерения статических параметров высокоинтенсивных электронных пучков основан на регистрации переходного излучения, возникающего при падении на металлическую мишень ленточных и аксиально-симметричных пучков. Приведены схемы регистрации излучения, описаны особенности методик измерений в зависимости от конфигурации пучка, впервые представлена конструкция анализатора ленточных пучков электронов. Работоспособность установки подтверждается результатами эксперимента и численного расчета.

PACS: 29.85.Fj, 84.40.Fe

Высокоинтенсивные электронные пучки (э.п.) широко используются в различных промышленных технологических установках для физических исследований и в разнообразных электровакуумных с.в.ч.-приборах. Поэтому необходима максимальная информация о пространственной конфигурации и микроструктуре э.п. В [1] для диагностики высокоинтенсивных э.п. использовано переходное излучение оптического диапазона, возникающее при падении электронов на металлическую мишень. В [2, 3] предложен способ и описана установка для измерения характеристик аксиально-симметричных пучков, в [4] приведена

конструкция вакуумной камеры анализатора э.п. данного профиля.

Ниже описана универсальная установка, в которой путем замены анализатора э.п. выполняется диагностика как ленточных, так и осесимметричных э.п. Даны рекомендации по выбору анализатора излучения в зависимости от поставленной задачи.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Анализатор электронных пучков АЭП с системой регистрации оптического излучения РОИ через металлическое уплотнение подключен к измерительной камере ИК, содержащей манометрические преобразователи РМ и РТ<sub>2</sub>. Пред-

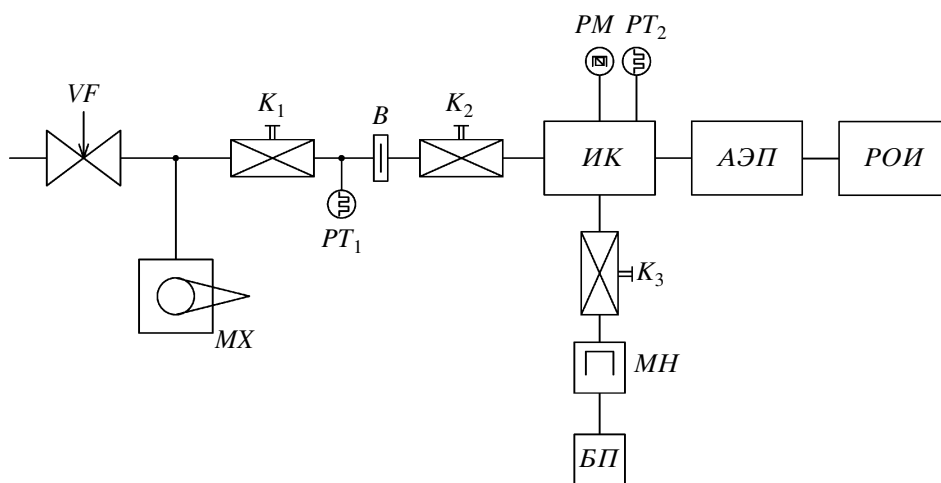


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. АЭП – анализатор электронных пучков, РОИ – система регистрации оптического излучения, ИК – измерительная камера, РМ, РТ<sub>1</sub> и РТ<sub>2</sub> – манометрические преобразователи, МН – магниторазрядный насос, МХ – механический насос, К<sub>1</sub>–К<sub>3</sub>, VF – клапаны, БП – блок питания магниторазрядного насоса, В – вакуумная ловушка.

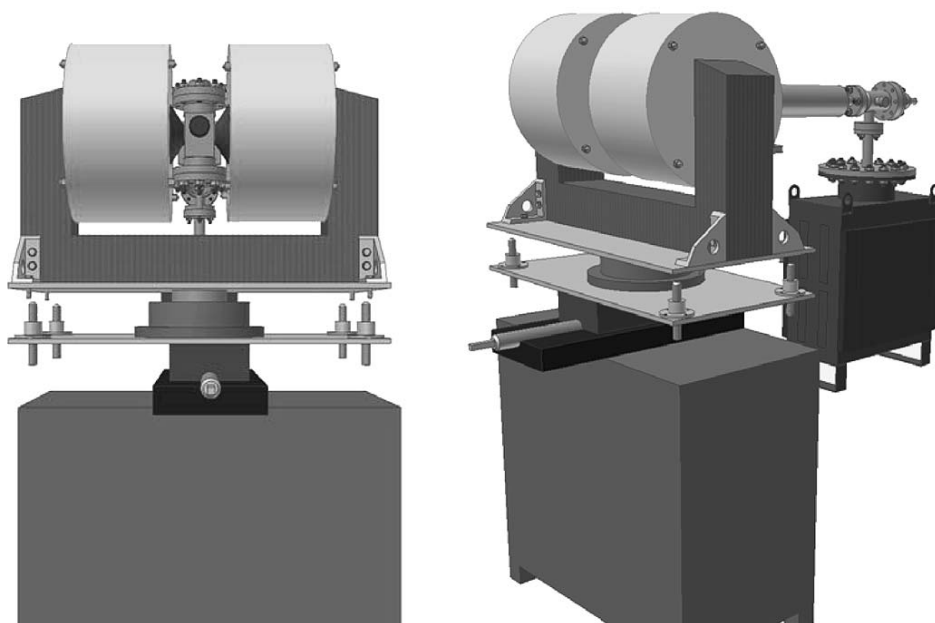


Рис. 2. Внешний вид установки.

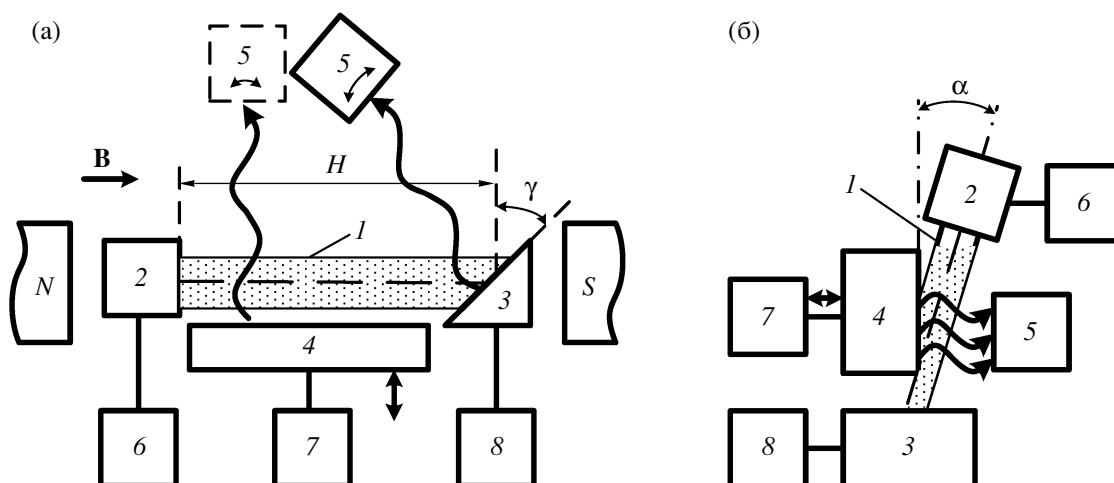


Рис. 3. Структурные схемы регистрации переходного излучения для диагностики ленточного э.п. (а) и аксиально-симметричного э.п. (б). 1 – электронный пучок, 2 – электронная пушка, 3 – медная мишень, 4 – подвижная мишень, 5 – приемник переходного излучения, 6–8 – измерительные приборы.

варительная откачка объема ИК–АЭП и магнито-разрядного насоса МН до вакуума  $\sim 0.5$  Па осуществляется через систему клапанов  $K_1$ – $K_3$  механическим насосом МХ. По достижении требуемого вакуума клапаны  $K_1$  и  $K_2$  перекрываются, и включается магнито-разрядный насос МН для безмасляной откачки объема ИК–АЭП до  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  Па. Высоковакуумная часть установки с АЭП размещена на юстировочном устройстве, позволяющем перемещать измерительный комплекс по координатам  $X$ ,  $Z$  с погрешностью до

$\pm 10^{-2}$  мм и поворачивать вокруг оси  $Y$  с погрешностью  $\pm 0.5^\circ$ . Если учесть, что при фокусировке ленточных э.п. магнитное поле является осесимметричным, то такая система юстировки позволяет решить задачу взаимной ориентации пучка и поля с достаточной точностью. На рис. 2 представлен общий вид установки.

На рис. 3 демонстрируются две наиболее распространенные структурные схемы регистрации переходного излучения, возникающего при падении электронов на металлическую мишень. Схе-

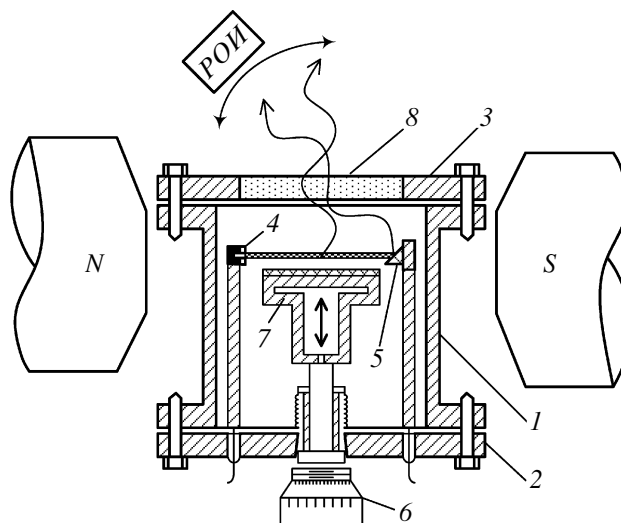
ма рис. 3а служит для диагностики ленточного э.п., который формируется, например, диодной пушкой в сопровождении магнитного фокусирующего поля. Рис. 3б демонстрирует схему регистрации при диагностике аксиально-симметричного э.п. при фокусировке электростатическими линзами.

В первом варианте (рис. 3а) плоскопараллельный э.п. 1 формируется электронной пушкой 2 и сопровождается продольным магнитным полем с индукцией **В**. На пути движения электронов на расстоянии *H* от катода под углом  $\gamma = 45^\circ$  к направлению оси э.п. установлена полированная медная мишень 3 (угол  $\gamma$  определяется из соображений удобства вывода излучения из вакуумной камеры и последующей его регистрации). Расстояние *H* – порядка 10–20 длин волн статических пульсаций пучка, что позволяет незначительным изменением анодного напряжения пушки или величины магнитного поля проследить на мишени все фазы пульсаций в поперечном сечении э.п.

Для регистрации излучения в процессе движения э.п. установлена дополнительная подвижная мишень 4. При расстояниях мишени 4 от оси э.п., больших половины максимума амплитуды пульсаций, электроны полностью попадают на мишень 3 и возбуждают переходное излучение, интенсивность которого регистрируется приемником 5, установленным на шарнире.

С уменьшением расстояния между поверхностью мишени 4 и осью э.п. 1 электроны начинают бомбардировать плоскость металла, также вызывая переходное излучение, угол которого отличен от угла  $\gamma$ . При этом возможна регистрация реальной картины статических пульсаций э.п. в пространстве дрейфа. Катодный ток пушки и токи на мишенях 3 и 4 измеряют приборами 6, 7 и 8.

Во втором варианте (рис. 3б) схема регистрации переходного излучения упрощается за счет осевой симметрии э.п. и отсутствия в области электродов пушки магнитного поля [3, 4]. Подробное описание вакуумной камеры АЭП для диагностики аксиально-симметричных пучков представлено в [4]. Аналогичный по назначению АЭП



**Рис. 4.** Конструктивная схема анализатора электронных пучков АЭП. 1 – откачиваемый корпус, 2 – фланец для крепления мишени и пушки, 3 – узел вывода и регистрации излучения, 4 – система крепления электронной пушки, 5 – неподвижная мишень, 6 – микрометрический винт, 7 – подвижная мишень, 8 – кварцевое окно, РОИ – система регистрации оптического излучения.

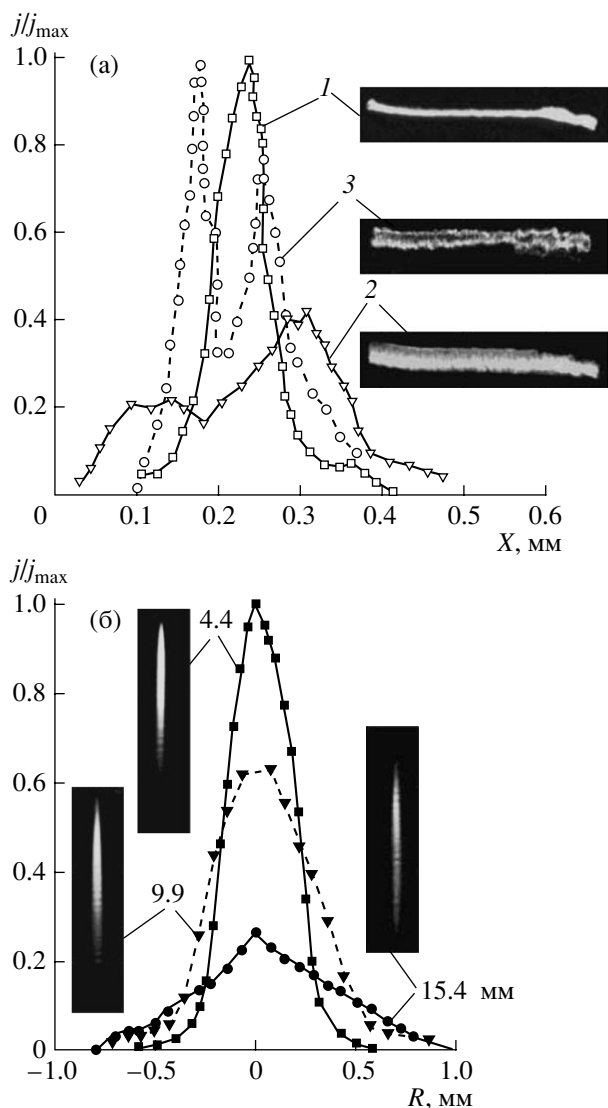
при исследовании ленточных пучков имеет существенные конструктивные отличия, которые следуют из сопоставления схем на рис. 3.

Устройство АЭП, расположенное между полюсами электромагнита, изображено на рис. 4. Анализатор излучения состоит из следующих основных узлов: откачиваемого корпуса 1, узла крепления мишени и пушки 2, узла вывода и регистрации излучения 3. Все элементы и узлы АЭП выполнены из немагнитных материалов. На задней стенке боковой поверхности корпуса имеется патрубков с присоединительным фланцем для подключения к вакуумной системе.

На фланце 2 размещены: система крепления электронной пушки 4 и неподвижной мишени 5; вакуумированный через сильфон микрометрический винт 6, с помощью которого перемещают

Параметры	Тип камеры		
	Фотокамера	Видеокамера	Цифровая фотокамера
Тип приемника	Фотопленка	П.з.с.-матрица	К.м.о.п.-матрица
Тип объектива	Микропланар	Микропланар	MP-E65 f/2.8 1–5× Macro
Увеличение	5×	5×	5×
Эффективное количество точек по сечению э.п.*	10 <sup>4</sup> –10 <sup>5</sup>	10 <sup>1</sup> –10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup> –10 <sup>3</sup>
Время обработки информации	несколько часов	реальное время	несколько минут

\* Эффективное количество точек, составляющих свечение э.п., как правило, не превышает 25% числа пикселей камеры.



**Рис. 5.** Распределение плотности тока по толщине ленточного пучка (а) и аксиально-симметричного пучка при различных расстояниях от второго анода (значения у кривых) (б). 1 и 2 – соответственно минимум и максимум статической пульсации, 3 – пучок при высокой неоднородности эмиссии.

мишень 7. Возникающее на мишенях 5 и 7 излучение выводится через кварцевое окно 8 на систему РОИ.

Выбор системы РОИ определяется требованиями, предъявляемыми к точности анализа микроструктуры электронного пучка: погрешности измерений, скорости обработки данных, наглядности получения информации и т.д. К настоящему времени для регистрации переходного излучения с поверхности мишени применяются фотокамера, видеокамера и цифровая фотокамера. Их основные параметры приведены в таблице.

Из таблицы видно, что максимальной разрешающей способностью обладает фотокамера [1–3],

однако низкая оперативность обработки экспериментальных данных в ряде практических приложений сводит на нет ее преимущества. Телевизионный метод регистрации видеокамерой позволяет исключить из процесса измерения промежуточный этап – обработку фотопленки и ее расшифровку. Тем не менее, видеокамера зачастую не может удовлетворить требованиям точности измерений, особенно при научных исследованиях. А если речь идет о слабых э.п. (т.е. при низкой интенсивности свечения пучка), то применение видеокамеры становится невозможным.

Как сочетающая достаточно высокую точность и скорость анализа излучения перспективной является цифровая фотокамера, подключенная к современному высокопроизводительному компьютеру, управляющая программа которого позволяет проводить анализ изображения переходного излучения в автоматическом режиме и накапливать результаты измерений. В этом методе регистрации цифровая камера должна обладать качественной оптической системой и линейной (либо программируемой) светочувствительностью матрицы.

Работоспособность описанной установки диагностики пучков проверялась экспериментально. На рис. 5 представлены типичные распределения плотности тока по толщине ленточного и аксиально-симметричного пучков электронов. Здесь же приведены фотографии излучения следов э.п., соответствующих графическим зависимостям. Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждается численным анализом статических характеристик э.п. [5].

Оценка предельных значений мощности исследуемых электронных пучков (от единиц Вт/см<sup>2</sup> до ≥100 кВт/см<sup>2</sup>) указывает на возможность применения метода переходного излучения при диагностике высокоинтенсивных пучков, используемых в технологических установках и для физических исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балаклицкий И.М., Белоусов Е.В., Корж В.Г. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1982. № 5 (25). С. 38.
2. Белоусов Е.В., Воробьев Г.С., Корж В.Г. и др. Патент 2008737 С1 РФ. МКИ H01J-9/42, G01T1/29 // Бюл. № 4. 1994.
3. Воробьев Г.С., Нагорный Д.А., Пушкарев К.А. и др. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1998. № 6. С. 59.
4. Белоусов Е.В., Воробьев Г.С., Корж В.Г. и др. // ПТЭ. 1996. № 6. С. 137.
5. Воробьев Г.С., Дрозденко А.А., Пономарев А.Г. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2006. № 6 (49). С. 11.