

УДК 537.533.9

СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

В.А. ГРУЗДЕВ, В.Г. ЗАЛЕССКИЙ, Д.Г. РУГОЛЬ, И.С. РУСЕЦКИЙ

*Полоцкий государственный университет
Блохина, 29, Новополоцк, 211440, Беларусь*

Поступила в редакцию 15 октября 2008

Представлено устройство, позволяющее определять эмиттанс и распределение плотности тока по сечению электронного пучка, а также на их основе ряд дополнительных характеристик: диаметр пучка, его яркость, расходимость, хаотическую скорость электронов в пучке. Предложен способ диагностики электронно-оптических систем плазменных источников электронов, основанный на сравнении фазовых объемов формируемых пучков и позволяющий значительно сократить объем экспериментальной работы по оптимизации геометрии таких систем, а также систем фокусировки и отклонения.

Ключевые слова: электронный пучок, эмиттанс, фазовый портрет, расходимость, плазменный источник электронов.

Введение

Параметры высокоэнергетичных электронных пучков в значительной степени определяются характеристиками используемых для их формирования электронно-оптических систем (ЭОС), включающих подсистемы первичного формирования пучка, его фокусировки и отклонения. Для ЭОС твердотельных электронных эмиттеров (ЭОСТЭ), в частности термокатодных, достаточно хорошо развиты расчетные методы синтеза и анализа таких систем [1]. Однако в последние десятилетия появилась необходимость разрабатывать ЭОС для плазменных эмиттеров (плазменных источников электронов — ПИЭЛ) [2], которые находят применение как в электронно-лучевых технологиях [3], так и в экспериментальных исследованиях, что обусловлено рядом преимуществ таких источников по сравнению с термокатодными пушками [4]. Однако такие особенности ЭОС ПИЭЛ в сравнении с ЭОСТЭ, как зависимость положения плазменной эмитирующей поверхности и плотности эмиссионного тока от величины ускоряющего напряжения, зависимость распределения плотности тока эмиссии по плазменной поверхности и самой площади этой поверхности от плотности тока эмиссии, более интенсивные ионизационные процессы в области формирования электронного пучка и другие, делают практически непригодными для применения к ПИЭЛ разработанные для ЭОСТЭ расчетные методы. Поэтому создание ПИЭЛ с конкретными параметрами электронного пучка (мощность, плотность мощности, яркость, расходимость, распределение плотности мощности по сечению пучка) в настоящее время обычно сопровождается достаточно длительной экспериментальной оптимизацией конструкции с применением различных устройств измерения характеристик электронного пучка.

Наиболее универсальной характеристикой электронного пучка считается эмиттанс [5], на основе которого можно определить ряд частных параметров, в частности яркость и расходимость. В известных работах [6, 7], относящихся к проблемам измерения эмиттанса и других характеристик пучков, вопросы, посвященные способам измерения этих параметров и обработки получаемой информации, как правило, не рассматриваются или рассмотрение ограничивается приведением схемы эксперимента [7]. Это ставит перед экспериментаторами задачу создания собственного измерительного оборудования. В данной работе представлен программно-

аппаратный комплекс, позволяющий оценивать эмиттанс и другие характеристики электронного пучка, а также предложен способ оптимизации конструкции ПИЭЛ и оценки качества систем фокусировки и отклонения за счет сравнения фазовых объемов формируемых электронных пучков.

Комплексная характеристика электронного пучка

В первом приближении эмиттанс ε представляет собой площадь фазового портрета электронного пучка (рис. 1) в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения пучка (ось z на рис. 2) — (x, x') и/или, если пучок не обладает радиальной симметрией, в плоскости (y, y') :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\pi} \int dx dx', \quad \varepsilon_y = \frac{1}{\pi} \int dy dy', \quad \varepsilon_4 = \varepsilon_x \varepsilon_y, \quad (1)$$

где x', y' — относительные радиальные скорости электронов (в соответствующих направлениях x и y), которые определяют расходимость пучка ($\Delta\Theta_{x,y}$) в плоскостях (xz) и (yz) [5].

Известно несколько методов оценки эмиттанса [2, 5–7]. Одним из наиболее точных и легко реализуемых технически является метод движущегося зонда и щели (рис. 2).

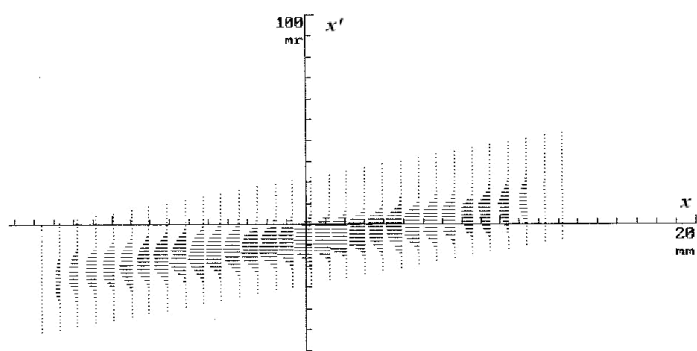


Рис. 1. Фазовый портрет электронного пучка [5, стр. 99]

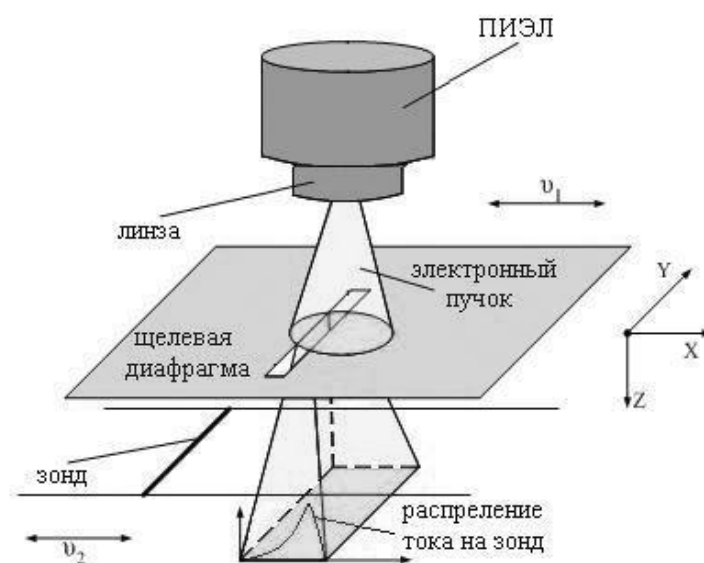


Рис. 2. Метод определения эмиттанса

Если фазовый портрет представляет собой эллипс, то яркость пучка и его эмиттанс связаны между собой соотношением [8]

$$B = \frac{dI}{d\Omega dS} = \frac{1}{\pi^4 \varepsilon_x \varepsilon_y} \quad (2)$$

где $d\Omega$ — телесный угол, опирающийся на площадку dS , в котором распространяется пучок с током dI .

Максимальное значение координаты x_{\max} соответствует размеру пучка (в условиях симметричного пучка – радиусу) в этом направлении. Допуская, что радиальная компонента скорости электронов обусловлена в основном их средней хаотической скоростью \bar{v}_x в плазме, угол расходимости пучка ($\Delta\Theta_x$ (в предположении, что угол мал) можно оценить соотношением

$$x'_{\max} = \Delta\Theta_x \approx \text{tg}\Delta\Theta_x = \frac{\bar{v}_x}{v_z} = \frac{1}{v_z} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}} = \sqrt{\frac{m_e}{eU}} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi eU}}. \quad (3)$$

Угол расходимости можно использовать для оценки электронной температуры в эмиттирующей плазме в ПИЭЛ (в электрон-вольтах):

$$\frac{kT}{e} = \frac{1}{8} \pi U x'_{\max} \quad (4)$$

При оптимизации ЭОС также необходимо определять распределение плотности тока по сечению пучка, причем делать это необходимо в тех же условиях, при которых получен фазовый портрет. Однако применение нескольких измерительных устройств в таких случаях затруднено необходимостью их пространственного совмещения, а при последовательных измерениях не гарантируется соответствие всех параметров в экспериментах (давления газа, точности юстировки и др.). Это снижает достоверность получаемой экспериментальной информации. Кроме того, отдельные параметры электронного пучка, например, распределение тока по сечению пучка и его расходимость, могут изменяться независимо друг от друга при изменении геометрии ЭОС. Поэтому при оптимизации конструкции ПИЭЛ оценку этих параметров и их сравнение для пучков, полученных в различных условиях, нужно проводить одновременно и комплексно.

При измерении эмиттанса любым из известных методов в действительности фиксируется трехмерная характеристика в фазовом пространстве (x, x', j) , на основании которой может быть построена фазовая трехмерная поверхность, ограничивающая фазовый объем пучка. Основанием такой трехмерной поверхности служит фазовый портрет в плоскости (x, x') , который используется для определения эмиттанса и других характеристик пучка. Сечение этой поверхности в плоскости (x, j) соответствует распределению плотности тока (и плотности мощности) электронного пучка. Таким образом, зарегистрировав трехмерную фазовую поверхность в фазовом пространстве (x, x', j) , можно проводить одновременное сравнение формируемых в различных условиях электронных пучков по основным параметрам (яркость, расходимость, распределение плотности тока и др.). Причем в ряде случаев достаточно ограничиться визуальным сравнением фазовых объемов, оценив соответствующие сечения — эмиттанс (фазовый портрет в плоскости (x, x')) и распределение плотности тока (сечение в фазовой плоскости (x, j)). Такой способ может способствовать более эффективному экспериментальному поиску оптимальной геометрии ЭОС, при этом очевидно, что его можно использовать и для оценки качества систем фокусировки и отклонения.

Однако для эффективного использования этого способа оценки качества формируемых электронных пучков обычный способ получения сигнала зонда с помощью осциллографа не применим (рис. 1), поскольку для построения трехмерных поверхностей и проведения на их основе сравнительного анализа необходимо обеспечить хранение и обработку большого объема информации. С этой целью разработан программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий высокую скорость обработки экспериментальных данных (практически в режиме реального времени) и позволяющий строить трехмерное изображение фазового объема пучка с возможно-

стью вращения угла наблюдения, определять эмиттанс, яркость и ряд дополнительных параметров в соответствии с выражениями (1)–(4).

Программно-аппаратный измерительный комплекс

В состав комплекса входит электромеханический измерительный блок, предназначенный для получения сигнала, содержащего информацию о параметрах пучка и система обработки информации. В измерительном блоке, схема которого представлена на рис. 3, реализован известный метод измерения эмиттанса [5], основанный на вырезании щелевой диафрагмой части пучка и сканировании вырезанной части на некотором фиксированном расстоянии под диафрагмой подвижным (в нашем случае — вращающимся) зондом (рис. 1). Пучок принимается на заземленную металлическую пластину из тугоплавкого материала (тантал) со щелью 1 регулируемой ширины (порядка 1 мм). Под пластиной находится вращающийся зонд 3, выполненный из тугоплавкого материала (нихром, вольфрам) $\varnothing 0,1$ мм, длиной 50 мм, для обеспечения приемлемой теплостойкости (нагрев до 1000 К) механической системы измерительного блока. Зонд закреплен на диске с диаметром, обеспечивающим почти параллельное положение зонда 3 относительно щели 1 при его движении. Вращательное движение зонда обеспечивается двигателем 5. Скорости движения зонда в пределах щели значительно (на 2 порядка) превышает скорость перемещения щели. Диск 3 и ось двигателя 5 изолированы друг от друга, что позволяет измерять ток зонда. Двигатель и пластина жестко закреплены на стойке 7, установленной на подвижной каретке 8. Каретка со всей конструкцией (поз. 5 и 7) способна перемещаться в горизонтальной плоскости в двух направлениях относительно рамы 4 измерительного блока ($-x$, $+x$). Изменение направления движения производится реверсированием двигателя 6. Следует отметить, что во время измерения параметров пучка, направления движения каретки и зонда должны совпадать. Обратное направление движения каретки необходимо только для возврата каретки в исходное положение.

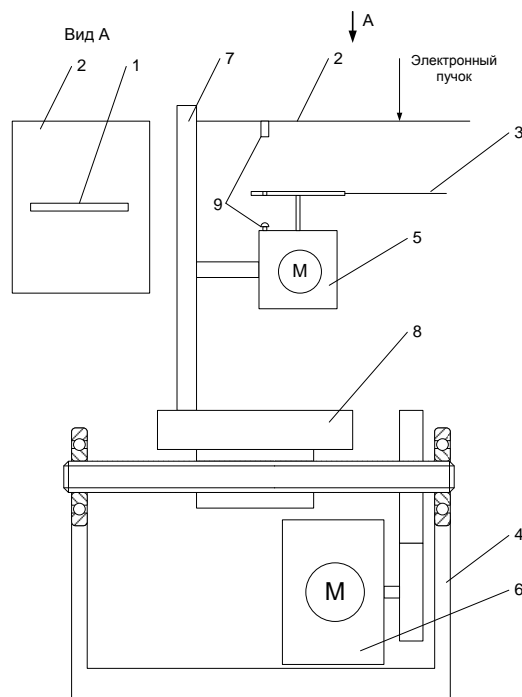


Рис. 3 – Схема электромеханического измерительного блока: 1 — щель; 2 — пластина; 3 — сканирующий зонд с диском; 4 — рама; 5 — двигатель датчика; 6 — двигатель перемещения; 7 — стойка; 8 — каретка; 9 — оптопара

Токовый сигнал вращающегося зонда для устранения высокочастотных помех пропускается через фильтр и затем преобразуется в напряжение. Для получения цифрового сигнала, который в дальнейшем обрабатывается на компьютере, в программно-аппаратном комплексе,

вместо традиционно применяемых в таких случаях аналого-цифровых преобразователей, использована звуковая карта компьютера. Это позволило значительно упростить и удешевить устройство при сохранении высокого качества получаемого сигнала и обеспечения возможности, если необходимо, редактирования и предварительного просмотра получаемого сигнала с помощью известных программных пакетов обработки звука.

Данные с аналогового входа звуковой карты компьютера оцифровываются в wav-файл формата РСМ, представляющий собой последовательность 16 семплов, взятых с фиксированным интервалом. Частота дискретизации составляет 44,1 кГц, разрядность семплов — 16 бит. Полученный таким образом wav-файл содержит набор распределений тока в вырезанных из пучка щелевой диафрагмой областях в зависимости от положения диафрагмы относительно оси пучка.

Для исключения влияния скорости движения зонда (относительной скорости зонда и щели) на распределение тока на зонд использован метод получения опорного сигнала, который позволяет автоматически синхронизировать сигналы на зонд, снятые при различных положениях щели. С этой целью коллинеарно со щелью по диаметру вращающегося зонда установлена оптопара 9 (рис. 3), которая формирует опорный сигнал при каждом прохождении отверстия во вращающемся диске с зондом через световой луч.

При использовании стереовхода звуковой карты опорный сигнал автоматически синхронизируется с сигналом, получаемым с зонда. Это позволяет разбить весь wav-файл с информацией на одинаковые по длительности отрезки, что дает возможность достаточно точно определить начало и окончание области данных, рассчитывать при необходимости частоту вращения зонда, а также строить трехмерные фазовые объемы пучков.

Эпюры сигналов в оцифрованном виде, а также фрагмент wav-файла представлены на рис. 4. Для построения трехмерных поверхностей в реальных масштабах (м, рад, a/m^2) с использованием полученного wav-файла разработано программное обеспечение, включающее компонент визуализации поверхностей, интегрированный в программную оболочку. Программная оболочка реализует графический интерфейс пользователя и генерирует облако нерегулярных точек из wav-файла, которое представляет собой входные данные для компонента визуализации.

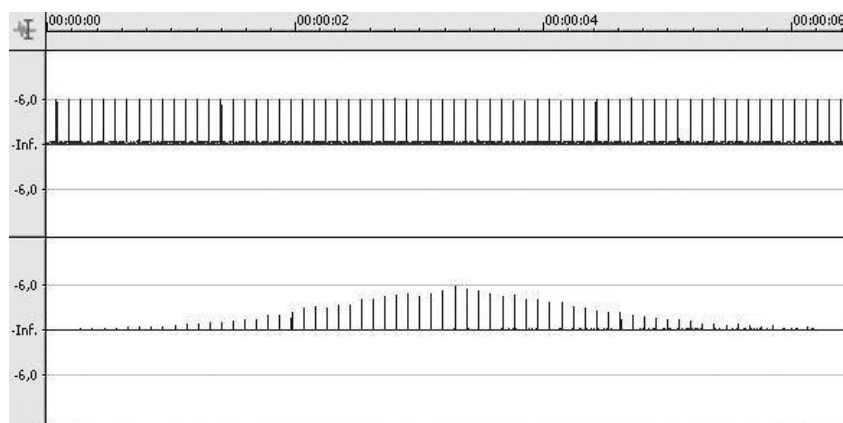


Рис. 4. Эпюры оцифрованных сигналов $U=16$ кВ ток пучка — 50 мА; диаметр пучка — 18 мм.
Вверху опорный сигнал, получаемый от оптопары; внизу — групповой сигнал

Компонент визуализации отображает поверхности, заданные нерегулярным облаком точек с возможностью произвольного перемещения точки наблюдения. Трехмерные фазовые портреты строятся в произвольном масштабе, которые при просмотре результатов можно задать вручную, при сохранении реальных значений x (мм) и x' (мрад). При этом вид распределения по сечению в плоскости (x, j) позволяет визуально, но с высокой степенью достоверности, оценить однородность распределения плотности тока пучка по его сечению и сделать соответствующие выводы о влиянии изменяемых параметров на распределение плотности тока в пучке.

На рис. 5 приведены некоторые скриншоты, соответствующие несфокусированным электронным пучкам, полученным в различных условиях. При этом видно, что при изменении,

например, тока разряда, формирующей эмитирующую плазму (рис. 5,а,б), изменяется не только ток эмиссии, но и другие параметры электронного пучка (расходимость и яркость), что свидетельствует о необходимости оптимизации конструкции ПИЭЛ в различных технологических условиях. На рис. 5,в показаны, для сравнения, фазовые объем и портрет электронного пучка, полученные с помощью плазменной пушки другого типа. Как видно из рис. 5, сравнения представленных фазовых объемов позволят подобрать ПИЭЛ, формирующий электронный пучок с требуемыми параметрами.

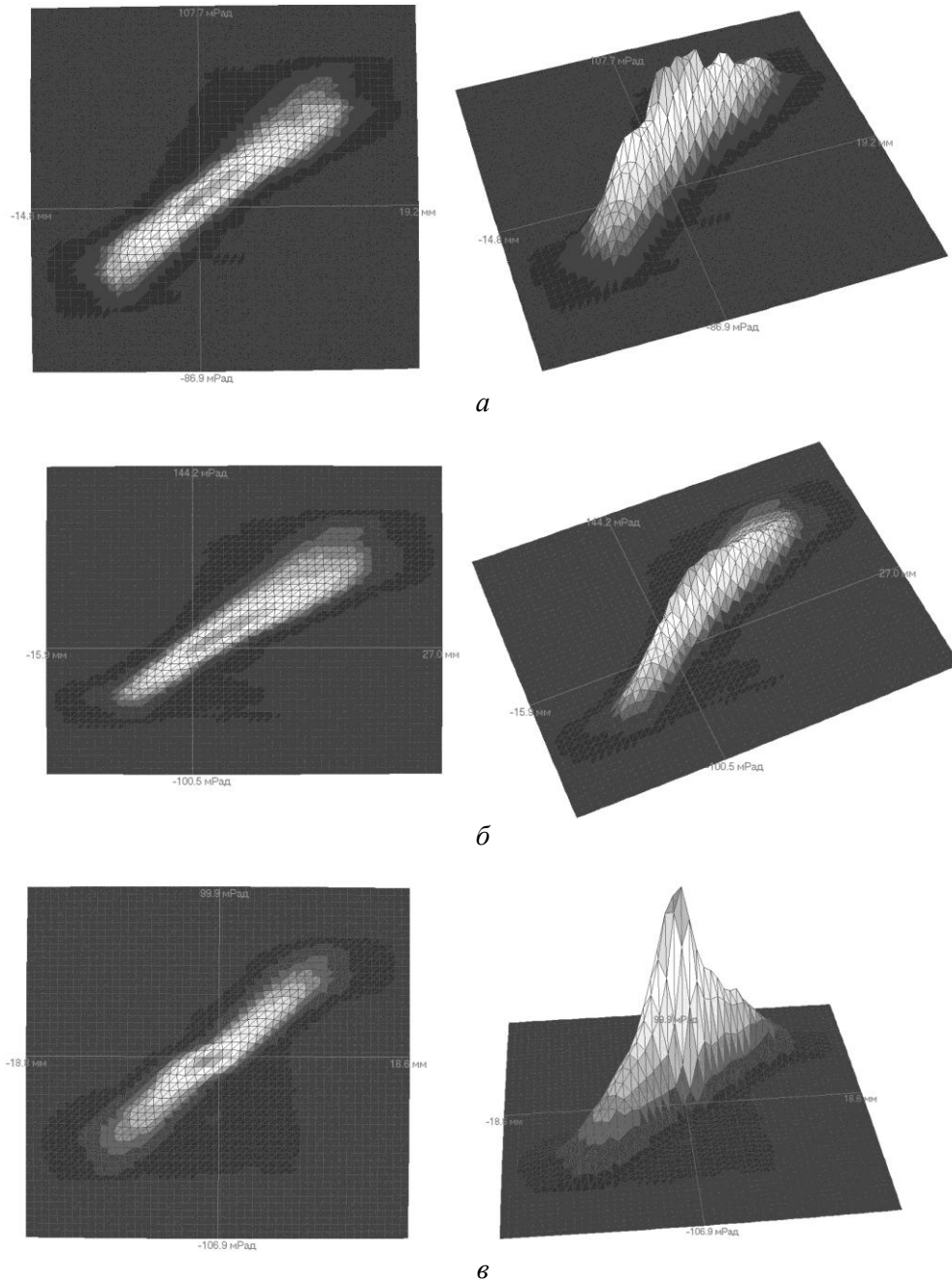


Рис. 5. Фазовые объемы и фазовые портреты электронных пучков: *а* — электронная пушка на основе разряда в скрещенных полях ($U_{\text{уск}} — 16$ кВ, ток разряда — 150 мА, ток пучка — 40 мА, диаметр — 28,7 мм, эмиттанс — 195 мм·мрад, яркость — $1,1 \cdot 10^{-5}$ А·мм⁻²·мрад⁻²), *б* — электронная пушка на основе разряда в скрещенных полях ($U_{\text{уск}} — 16$ кВ, ток разряда — 250 мА, ток пучка — 85 мА, диаметр — 26,2 мм, эмиттанс — 178 мм·мрад, яркость — $1,6 \cdot 10^{-5}$ А·мм⁻²·мрад⁻²), *в* — электронная пушка на основе разряда с полым катодом ($U_{\text{уск}} — 16$ кВ, ток разряда — 150 мА, ток пучка — 30 мА, диаметр — 22,7 мм, эмиттанс — 156 мм·мрад, яркость — $2,1 \cdot 10^{-5}$ А·мм⁻²·мрад⁻²)

Необходимо отметить, что представленный программно-аппаратный комплекс может быть использован также для получения точного распределения плотности тока по диаметру электронного пучка, но без возможности построения фазового портрета (эммитанса). Для этого следует изменить направление движения зонда таким образом, чтобы зонд и щель перемещались во взаимно перпендикулярных направлениях. При этом описанный выше алгоритм построения трехмерных распределений плотности тока в условиях радиальной симметрии или при необходимости в плоскостях xz и yz в целом сохраняется, а для расчета распределения плотности тока в абсолютных единицах можно применить известный способ, изложенный, например, в [9].

Заключение

Разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет оценивать, и проводить эффективный сравнительный анализ основных характеристик электронных пучков в зависимости от условий их формирования и, в частности, может быть использован для оптимизации электронно-оптических систем плазменных источников электронов без привлечения дополнительного сложного оборудования. Кроме этого, фазовые объемы, измеренные с помощью предложенного комплекса, могут быть использованы при исследовании свойств различных эмитирующих структур.

WAY AND DEVICE FOR DIAGNOSTICS OF ELECTRON-OPTICAL SYSTEMS OF PLASMA ELECTRON SOURCES

V.A. GRUZDEV, V.G. ZALESSKI, D.G. RUGOL, I.S. RUSSETSKI

Abstract

The device, allowing to determine the emittance and distribution of current density over an electronic beam section and also on their basis a number of additional characteristics: diameter of a beam, its brightness, divergence, chaotic speed of electrons in a beam, is presented. The way of diagnostics of electron-optical systems of plasma electron sources is offered, based on comparison of phase volumes of formed beams and allowing to reduce considerably the volume of experimental work on optimization of geometry of such systems, and also the systems of focusing and deviation.

Литература

1. Власов А.Г., Шапиро Ю.А. Методы расчета эмиссионных электронно-оптических систем. Л., 1974.
2. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндел, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. М., 1989.
3. Бельюк С.И., Осипов И.В., Ремпе Н.Г. // Изв. вузов. Физика. 2001. Т. 44, № 9. С. 77–84.
4. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом. Томск, 2005.
5. Stanley Humphries, Jr. Charged Particle Beams. — John Wiley and Sons, New York, 2002.
6. Yang B.X., Lumpkin A.H. // Proc. of the 1999 Particle Accelerator Conf., New York, 1999. P. 2161–2163.
7. Togawa K., Tanaka T., Onoe K. et al. // Proc. 3rd Asian Particle Accelerator Conf. (APAC2004), Gyeongju, Korea, 2004. P. 351–354.
8. Физика и технология источников ионов / Я. Браун, Р. Кемер, А. Холис и др. М., 1998.
9. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М., 1978.