

1. Горбань И. И. Гиперслучайные явления и их описание // Акустичний вісник. — 2005. — т.8, № 1–2. — С. 16–27.
2. Горбань И. И. Гиперслучайные функции и их описание // Радиоэлектроника. — 2006. — № 1. — С. 3–15. (Изв. вузов)
3. Горбань И. И. Теория гиперслучайных явлений. — К.: ИПММС НАН Украины, 2007. — 184 с.
4. Теория гиперслучайных явлений. — К.: ИПММС НАН Украины, 2007. — 184 с.
5. Горбань И. И. Точечный и интервальный методы оценки параметров гиперслучайных величин // Математические машины и системы. — 2006. — № 2. — С. 3–14.
5. Вошинин, Бочков А. Ф., Сотиров Г. Р. Метод анализа данных при интервальной нестатистической ошибке // Заводская лаборатория. — 1990. — Т. 56, №7. — С. 76–81.
6. Алевельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. — М.: Мир, 1987. — 356 с.
7. Левин В. И. Интервальная математика и изучение неопределенных систем // Информационные технологии. — 1998. №6. (Федеральный портал «Инженерное образование». Интеллектуальные системы. 5 мая 2005. www.techno.edu.ru).
8. Горбань И. И. Представление физических явлений гиперслучайными моделями // Математические машины и системы. — 2007. — № 1.
9. Горбань І. І. Математичний опис фізичних явищ у статистично нестабільних умовах. Стандартизація, сертифікація, якість. 2006. — № 6. — С. 26–33.
10. Корольок В. С. и др. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. — М.: Наука, 1985. — 637 с.
11. Горбань І. І. Теорія ймовірностей і математична статистика для наукових працівників та інженерів. К.: Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, 2003. — 245 с.
12. Горбань И. И. Оценки характеристик гиперслучайных величин // Математические машины и системы. — 2006. — № 1. — С. 41–48.
13. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М.: Радио и связь, 1989. — 654 с.
14. Ван Трис. Теория обнаружения, оценок и модуляции. — М.: Сов. Радио, — 1972. — Т. 1. — 744 с.
15. Орлов А. И. Эконометрика. Учебник. М. — : «Экзамен», 2002. — 576 с.

ГП «Укр НИУЦ», Киев

Поступила в редакцию 05.03.07

УДК 621.385.6120

ВОРОБЬЕВ Г. С., ДРОЗДЕНКО А. А., НАГОРНЫЙ Д. А., РЫБАЛКО А. А.

### СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В СВЧ ПРИБОРАХ

Описана система регистрации переходного излучения электронов на металлической мишени, которая включает в себя охлаждаемую ПЗС видеокамеру и блок сопряжения с персональным компьютером. Такая система, по сравнению с используемым ранее фотометодом регистрации, позволяет значительно повысить оперативность сбора и обработки экспери-

ментальных данных по определению статических параметров электронных пучков. Проведено сравнение численных расчетов распределений плотности тока по сечению пучка с экспериментальными результатами, подтверждающими работоспособность предложенной системы.

Известно, что протяженный электронный пучок (ЭП) является главным рабочим элементом многочисленных и разнообразных по типам приборов СВЧ (клистронов, ламп бегущей волны и др.), в которых он выполняет задачу преобразования энергии внешних источников питания в энергию СВЧ-колебаний. Основные требования к таким приборам связаны с обеспечением наибольшей эффективности процесса преобразования энергии электронов в энергию высокочастотного электромагнитного поля, т. е. получения максимальной колебательной мощности, высокого КПД, большого коэффициента усиления и т. д. В связи с этим требуется объективная информация о пространственной конфигурации электронного пучка при конструировании усилителей и генераторов СВЧ. Проведенный в [1] анализ показывает, что, наряду с традиционными методами диагностики ЭП [2], перспективным также является использование переходного излучения [3], возникающего при падении электронов на металлическую мишень. Предложенный в работах [4–6] фотометод регистрации и обработки переходного излучения ЭП, обладая высокой разрешающей способностью, имеет существенный недостаток — низкую оперативность обработки данных. Поэтому актуальной является задача автоматизации измерений, которая в данной работе решается путем разработки специальной охлаждаемой видеокамеры с чувствительным элементом на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС). Для сопряжения видеокамеры с персональным компьютером разработан специальный интерфейс, позволяющий оцифровывать видеосигнал для его дальнейшей обработки.

Схема регистрации переходного излучения и описание основных функциональных ее узлов. На рис. 1 представлена упрощенная структурная схема диагностики ЭП по переходному излучению, которая состоит из анализатора ЭП, подробно описанного в [5, 6], и системы регистрации переходного излучения.

Электронный пучок 1, формируемый пушкой 2, надает на поверхность подвижной 3 и неподвижной 4 металлических мишеней. Геометрическая ось пучка фиксируется при равенстве токов на мишенях и является началом отсчета измерений. При падении электронов на полированную медную поверхность мишени 3 возникает переходное излучение, которое поступает на объектив ви-

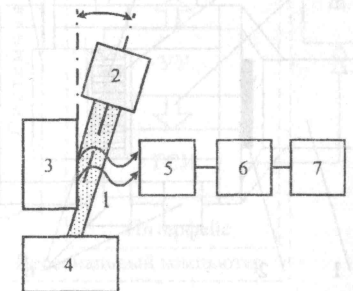


Рис. 1

деокамеры 5, сопряженной через специальный интерфейс 6 с персональным компьютером 7.

Среди широкой гаммы электронных приборов для регистрации излучения оптического диапазона наибольшее применение нашли детекторы, использующие в качестве чувствительного элемента ПЗС. По сравнению с электровакуумными приборами, например видиконами, они обладают рядом несомненных преимуществ, линейностью свет/сигнальной характеристики и жесткостью телевизионного раstra, что позволяет применять данные приборы с длительными временами экспонирования. Однако применение длительного экспонирования в ПЗС, необходимого для регистрации свечения низкой яркости, сопряжено с рядом трудностей. Термогенерация носителей в области пространственного заряда и на поверхности кремния создает темновой заряд в потенциальных ямах, характеризуемый темновым током и соответствующими флуктуационными шумами. Необходимо заметить, что если значения темнового тока можно вычестить в цифровой форме из сигнала изображения, то с флуктуационным шумом темнового тока данной операции проделать нельзя.

Единственно эффективным методом уменьшения влияния темнового тока и флуктуационных шумов, является охлаждение ПЗС. Для обеспечения малого уровня флуктуационных шумов температурная стабильность ПЗС

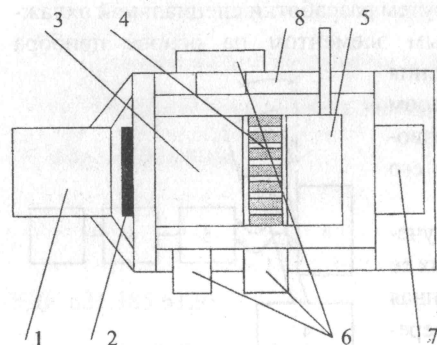


Рис. 2

должна составлять  $\pm 0,05^\circ \text{C}$ . Низкая температура охлаждения прибора может быть также обусловлена наличием в нем центров (один либо группа пикселей) с повышенным уровнем темнового тока (точечные неоднородности). При выборе ПЗС матрицы предпочтение отдается той, у которой отклонение темнового тока точечных неоднородностей имеет минимальный разброс. В матрице, где наличие точечных неоднородностей по количеству невелико, но имеет большой разброс по значению темнового тока, полное их устранение посредством охлаждения может оказаться проблематичным.

С учетом перечисленных выше требований была разработана измерительная ПЗС видеокамера, предназначенная для регистрации и фотометрирования по переходному излучению изображения профиля высокоинтенсивного

ЭП, возникающего при его падении на металлическую мишень. Схематически детекторная головка видеокамеры изображена на рис. 2.

Изображение ЭП, посредством объектива 1, проецируется на фоточувствительную секцию ПЗС матрицы 2, установленной в охлаждаемой колодке 3. Охлаждение колодки 3 производится при помощи термоэлектрического микроохладителя 4, горячий спай которого охлаждается проточной водой при помощи радиатора 5. Применение водяного охлаждения позволяет получить более низкие температуры охлаждения матрицы по сравнению с воздушным охлаждением. Сигналы управления ПЗС матрицей, питание микроохладителя, снятие сигналов ПЗС матрицы производится при помощи разъемов 6. Для предотвращения конденсации росы на охлаждаемых элементах детекторной головки, ее внутренний объем заполняется сухим азотом. Дополнительная влагозащита системы регистрации обеспечивается влагопоглотителем 7.

Для сопряжения описанного выше детектора видеокамеры с персональным компьютером разработан специальный интерфейс, позволяющий оцифровывать видеосигнал для его дальнейшей обработки, выполненный в виде платы расширения системной магистрали ISA. Структурная схема системы сопряжения представлена на рис. 3.

Блок преобразования (БП) осуществляет оцифровку видеосигнала, поступающего от описанной выше видеокамеры. Накопление оцифрованного кадра происходит в буферном запоминающем устройстве (БЗУ). Необходимая световая чувствительность видеокамеры достигается за счет регулировки кадровой частоты, при подаче на нее синхроимпульсов, вырабатываемых генератором синхронизирующих импульсов (ГСИ). Устройство управления (УУ), реализует управление функциональными узлами, входящими в состав интерфейса, на основе анализа сигналов системной магистрали ISA.

Описанный выше блок сопряжения подключен к современному высокопроизводительному компьютеру, управляющая программа которого позволя-

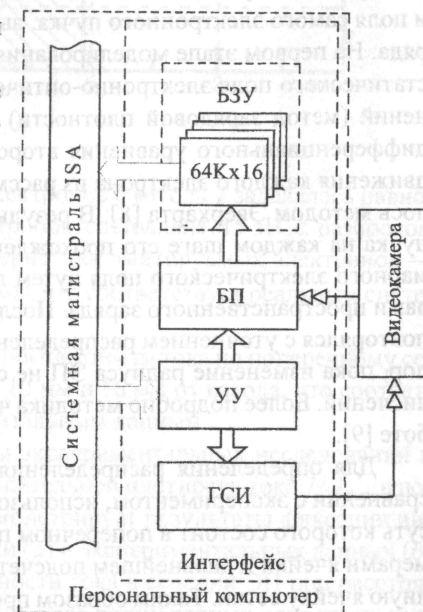


Рис. 3

ет проводить анализ изображения переходного излучения в автоматическом режиме и накапливать результаты измерений.

Результаты экспериментальных исследований и численного расчета. Апробация предложенной системы регистрации переходного излучения проводилась путем сравнения конкретных результатов экспериментальных исследований и обобщенного численного анализа статических параметров аксиально-симметричного ЭП, формируемого трехэлектродной пушкой, используемой в приборах СВЧ.

При численном анализе параметров электронного пучка известными считаются геометрия электродов, величины их потенциалов, значение тока пучка, распределение плотности эмиссии, максимальный разброс электронов по энергии, средняя энергия вылета электронов и их предельные угловые характеристики. Суммарное электрическое поле, обуславливающее формирование электронного пучка, состоит из компонент поля электронно-оптических линз и поля самого электронного пучка, вызванного силами пространственного заряда. На первом этапе моделирования проводился расчет компонент электростатического поля электронно-оптических линз методом интегральных уравнений (метод зарядовой плотности) [7]. Дальнейшее решение нелинейного дифференциального уравнения второго порядка, описывающего траектории движения каждого электрона из рассматриваемого ансамбля частиц проводилось методом Эверхарта [8]. В результате полученная информация о радиусе пучка на каждом шаге его прохождения использовалась для уточнения суммарного электрического поля путем пересчета компоненты, добавляемой силами пространственного заряда. После этого траекторный анализ циклически повторялся с уточнением распределения плотности тока в сечениях ЭП до тех пор, пока изменение радиуса ЭП не станет менее заданной погрешности вычислений. Более подробно методика численного моделирования описана в работе [9].

Для определения распределения плотности тока по диаметру ЭП, при сравнении с экспериментом, использовался метод сеточного подсчета частиц, суть которого состоит в поперечном пересечении ЭП сеткой с заданными размерами ячейки и дальнейшем подсчете количества частиц, попавших в ту или иную ячейку сетки. Таким образом происходит накопительный сбор информации о плотности распределения частиц в пучке.

В качестве примера на рис. 4 представлена типичная конфигурация электродов исследуемой аксиально-симметричной системы (где  $r$  и  $z$  — радиальная и продольная оси цилиндрической системы координат) и качественное поведение контура ЭП 1, для значений напряжений на фокусирующем электроде 2 —  $U_{\Phi} = 0$  В, первом аноде 3 —  $U_{A1} = 180$  В, втором (ускоряющем) аноде 4 —  $U_{A2} = 3200$  В, заштрихованная область — пространство движения ЭП при токе 5 мА, штриховая линия — при увеличении тока до 15 мА. После дальней-

шего увеличения тока происходило значительное токооседание на втором аноде (свыше 25%).

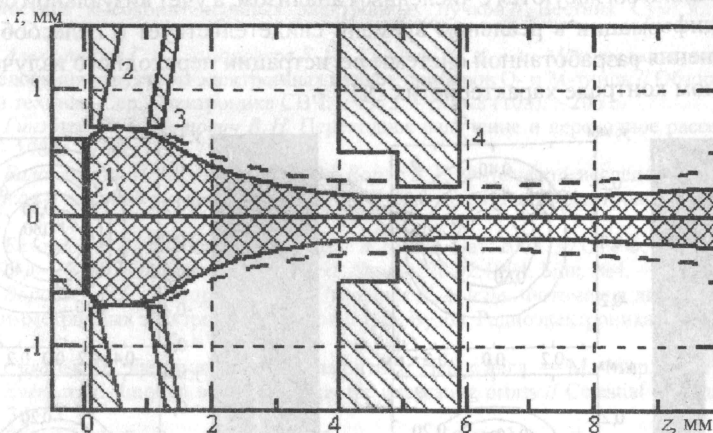


Рис. 4

При численном анализе эмиссия электронов с катода 1 задавалась равномерной, средняя энергия вылета электронов составляла 15 эВ с разбросом  $\pm 7$  эВ, а максимальные угловые характеристики эмитируемых электронов — в пределах  $\pm 10^\circ$  от продольной оси системы, что соответствует реальным системам такого типа.

Сетка для определения распределения плотности тока по поперечному сечению устанавливалась на расстояниях 10 мм и 16 мм от катода, что соответствовало полученным ранее экспериментальным данным.

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных исследований и численного анализа распределения относительной плотности тока  $J/J_{\max}$  в поперечном сечении ЭП. Рис. 5, а, б, в демонстрирует результаты фиксации видеоизображения свечения ЭП на мишени (а) и экспериментальных данных (б) по распределению относительной плотности тока в сечении ЭП при расстоянии от катода — 10 мм, представленных в виде линий равных относительных плотностей. Для данного режима на рис. 5в также приведены результаты численного моделирования ЭП и анализа распределения относительной плотности тока в поперечном сечении, которые свидетельствуют о качественном и количественном согласовании с экспериментом. Аналогичные результаты распределения относительной плотности тока в сечении ЭП получены для расстояния от катода 16 мм — режим расфокусирования пучка, и представлены соответственно на рис. 5г, д, е.



Как видно из рис. 5, результаты экспериментальных исследований статических характеристик аксиально-симметричного электронного пучка удовлетворительно согласуются с численным анализом, а учет визуальной обработки видеoinформации в реальном времени свидетельствует о целесообразности применения разработанной системы регистрации переходного излучения при поточном контроле характеристик ЭП.

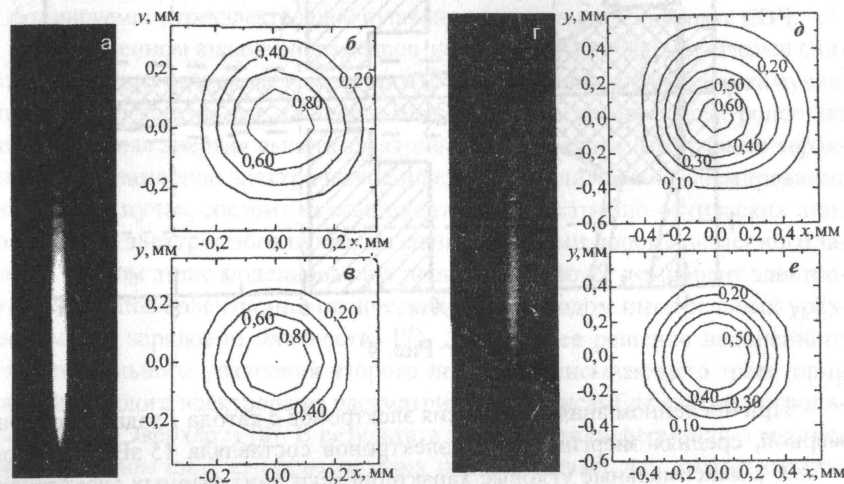


Рис. 5

**Заключение.** В работе описана общая схема регистрации переходного излучения для диагностики высокоинтенсивных ЭП, которая включает в себя ПЗС видеокамеру и интерфейс сопряжения с персональным компьютером. Путем экспериментальных исследований и численного моделирования получена информация о распределении относительной плотности тока по диаметру ЭП для аксиально-симметричной системы, используемой в приборах СВЧ. Сравнительный анализ численного счета и экспериментальных данных, полученных с использованием видеосистемы регистрации переходного излучения электронов на мишени, для конкретной геометрии электродов, указывает на достоверность полученных результатов и возможность использования предложенной системы для исследования и контроля статических параметров ЭП различного профиля.

1. Белоусов Е. В., Воробьев Г. С., Корж В. Г. и др. Применение переходного излучения в диагностике высокоинтенсивных электронных пучков // Вестник СумГУ. — 1997. — № 1(7). — С. 69–73.
2. Александров Г. И., Заморозков Б. М., Калинин Ю. А. и др. Методы экспериментального исследования структуры электронных пучков приборов О- и М-типов // Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ. — 1973. — Вып. 8 (108). — 206 с.
3. Гинзбург В. Л., Цитович В. Н. Переходное излучение и переходное рассеяние. — М.: Наука, — 1984. — 260с.
4. Балаклицкий И. М., Белоусов Е. В., Корж В. Г. Фотометод исследования электронных пучков с высокой удельной мощностью // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 1982, Т. 25, № 5. — С. 38–42.
5. Белоусов Е. В., Воробьев Г. С., Корж В. Г. и др. Пат. 2008737 С1 РФ, МКИ H01J-9/42, G01T1/29 / №5007898; Заявлено 09.07.91, Огубл. 28.02.1994, Бюл. №4. — 1 с.
6. Воробьев Г. С., Нагорный Д. А., Пушкарев К. А. и др. Фотометод диагностики аксиально-симметричных электронных пучков // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. — 1998. — № 6. — С. 59–64.
7. Силады М. Электронная и ионная оптика: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 639с.
8. Everhart E. Implicit single methods for integrating orbits // Celestial mechanics. 1974. V. 10. P. 35–55.
9. Воробьев Г. С., Дрозденко А. А., Пономарев А. Г. Численный анализ статических характеристик аксиально-симметричных электронных пучков в приборах СВЧ // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 2006. — № 6(49). — С. 11–16.

Сумской гос. ун-т

Поступила в редакцию 14.12.07

УДК 621.391:519.22

ПОПОВ А. А.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОЦЕНОК НЕИЗВЕСТНОГО НЕСЛУЧАЙНОГО ПАРАМЕТРА СИГНАЛА В ЛИНЕЙНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И К-ПРОСТРАНСТВЕ

Показано, что при обработке сигналов на фоне помех (шумов) в  $K$ -пространстве сигналов могут быть достигнуты более высокие характеристики оценки неизвестного неслучайного параметра сигнала, чем в линейном пространстве. Предложен показатель качества точного оценивания, основанный на метрических свойствах пространства оценок.

Одной из наиболее общих задач обработки сигналов на фоне помех (шумов) является оценивание сигналов и их параметров. К данной задаче могут быть сведены также и другие, например, задачи обнаружения, различения и разрешения сигналов [1–4]. В большей части известной литературы задачи обработки сигналов на фоне помех (шумов) формулируются в терминологии линейного пространства сигналов  $\mathcal{L}$ , в котором результат взаимодействия  $x$  сиг-