

УДК 004.942:519.6

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА УЛЬТРАФИОЛЕТА

А.В. Починок, В.Т. Лазурик, А.Ф. Целуйко, Е.В. Боргун

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

г. Харьков, пл. Свободы, 4, Украина, 61077

E-mail: rud@pht.univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 9 июля 2009 г.

Применена методика анализа первичных научных данных к результатам измерений характеристик плазменного источника ультрафиолета с целью выявления скрытых физических закономерностей. Определен набор информационных параметров для эмпирических зависимостей, полученных в процессе измерений. Расчет значений информационных параметров проведен с использованием программного обеспечения «PSData2». Представлены результаты проведенного корреляционного анализа информационных параметров эмпирических зависимостей, полученных при экспериментальном исследовании характеристик излучения из сильнотоочного импульсного плазменного диода. Выявлены физические закономерности, наблюдаемые в серии экспериментов, что свидетельствует о корректности используемых численных методов обработки результатов измерений, реализованных в программном обеспечении «PSData2».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: плазменный разряд, источник ультрафиолета, обработка результатов измерений, эмпирические зависимости, программное обеспечение.

THE COMPUTER PROCESSING OF THE PLASMA ULTRAVIOLET SOURCE CHARACTERISTICS OF THE MEASUREMENTS RESULTS

A.V. Pochynok, V.T. Lazurik, A.F. Tseluyko, E.V. Borgun

V. N. Karazin Kharkiv National University

Svobody sq., 4, 61077, Kharkiv, Ukraine

The technique of the analysis of the primary scientific data to the results of measurements of plasma ultraviolet sources characteristics is applied to reveal the latent physical laws. The set of information parameters for empirical dependences obtained in the process of measurements is determined. Calculation of values of information parameters is carried out using the software "PSData2". Results of the carried out correlation analysis of the information parameters of the empirical dependences obtained in the experimental of investigation of high-current plasma diode radiation characteristics are presented. Physical laws observable in a series of experiments are revealed that to show a correctness of used numerical methods of the results measurement processing realized in the software "PSData2".

KEY WORDS: plasma discharge, ultraviolet source, results measurement processing, empirical dependences, software

КОМП'ЮТЕРНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОВОГО ДЖЕРЕЛА УЛЬТРАФІОЛЕТУ

А.В. Починок, В.Т. Лазурик, О.Ф. Целуйко, Є.В. Боргун

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

61077, Харків, пл. Свободи, 4

Застосована методика аналізу первинних наукових даних до результатів вимірювань характеристик плазмового джерела ультрафіолету з метою виявлення скритих фізичних закономірностей. Визначений набір інформаційних параметрів для емпіричних залежностей, одержаних в процесі вимірювань. Розрахунок значень інформаційних параметрів проведений з використанням програмного забезпечення «PSData2». Наведені результати проведеного кореляційного аналізу інформаційних параметрів емпіричних залежностей, одержаних у експериментальному дослідженні характеристик випромінювання із сильнострумового імпульсного плазмового діоду. Виявлені фізичні закономірності, які спостерігаються в серії експериментів, що свідчить про коректність використаних числених методів обробки результатів вимірювань, реалізованих у програмному забезпеченні «PSData2».

КЛЮЧОВІ СЛОВА: плазмовий розряд, джерело ультрафіолету, обробка результатів вимірювань, емпіричні залежності, програмне забезпечення.

Одним из направлений создания интенсивных источников излучения в области экстремального ультрафиолета для целей нанолитографии является использование плазмы многократно ионизованных атомов в сильнотоочном импульсном плазменном диоде [1-4]. Научные исследования в этом направлении выполнялись в соответствии с международной научной программой и финансировалась через УНТЦ (проект № 3368).

Специфичным для проводимых экспериментальных исследований является процесс обработки большого объема цифровых данных. При исследовании излучения из плазменного диода с помощью специализированных полупроводниковых датчиков типа AXUV-20 фирмы International Radiation Detectors Inc. в эмпирических зависимостях амплитуды излучения от времени наблюдается несколько случайно появляющихся пиков. Поэтому для обеспечения статистической достоверности результатов проводились многократные повторения измерений.

В этих экспериментальных исследованиях регистрация сигналов осуществлялась двумя 4-х канальными

осциллографами Tectronics 2014. Временные зависимости тока и напряжения разряда, а также интенсивности излучения каждого импульса записывались в отдельные директории памяти осциллографов. В аппаратном решении проводимых экспериментов отсутствовал специализированный канал для передачи и накопления результатов измерений, так как в силу специфики измерений исключалась непосредственная связь осциллографов с персональным компьютером. Поэтому с помощью Flash-памяти «порции» экспериментальных данных механически переносили на персональный компьютер. В этой связи, в научно-исследовательской лаборатории образовалось хранилище большого объема неструктурированных научных данных, которое содержало необходимые для исследователей скрытые закономерности в результатах измерений. Естественным подходом для выявления этих закономерностей является применение современной технологии Data Mining [5-9].

Однако применять базовые методы Data Mining, хорошо зарекомендовавшие себя при решении задач в областях бизнес-аналитики, к научным данным не всегда возможно. В ряде случаев возникает проблема первичной обработки и анализа результатов измерений. Для решения этой проблемы, в работах [10,11] были предложены концептуальная модель анализа научных данных, методы обработки и определения значений информационных параметров, которые применяются к эмпирическим зависимостям в настоящей работе.

Сложность физических явлений, сопровождающих работу плазменного диода, и как следствие, необходимый для исследований большой объем результатов измерений, требует автоматизированных систем определения причинно-следственных связей в получаемой информации. Целью настоящей работы была адаптация развитой методики [11] для выявления физических закономерностей в изучаемом явлении.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ АНОМАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ В ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЯХ

Результаты измерений представляют собой несколько массивов значений регистрируемых физических величин, которые определяют эмпирические зависимости изучаемого явления. Для анализа этих наборов данных выбраны аномальные области в зависимостях напряжения от времени и пики излучения из плазменного разряда.

Информационными параметрами в проведенных экспериментах являются значения и положения максимумов пиков в аномальных областях. Так как результаты измерений представляют собой эмпирические зависимости, выраженные в виде набора дискретных данных, было использовано программное обеспечение «PSData2» для расчета значений информационных параметров. В «PSData2» при определении значений выбранных информационных параметров используется следующий набор методов: сглаживание данных методами простого скользящего среднего (МПС) и Савитского-Голая (МСТ), определение первой производной, определение второй производной, определение положений локальных экстремумов в сглаженных эмпирических зависимостях, определение уровня шума и количества пиков, определение значений сглаженных эмпирических зависимостей в локальных экстремумах, определение границ пика, определение интегрального вклада (мощности) максимумов и минимумов на основе массивов первичных данных [10-17]. Для выделения аномальных областей (всплесков), показанных на рисунках 1 и 2 как области (I) - (IV) в эмпирических зависимостях, и расчета значений мощности, амплитуды, их положения, в «PSData2» используются методы:

1. Метод линейной интерполяции «базовой» кривой в области всплеска (ЛИБ). В качестве уравнения интерполяционного полинома используется уравнение прямой.
2. Метод кубической аппроксимации «базовой» кривой (АКБ). Подгонка параметров полинома третьей степени по данным вне области всплеска.
3. Метод кубической аппроксимации «базовой» кривой (АКБЛ). Подгонка параметров полинома третьей степени по значениям на границе области всплеска.

Результаты применения методов ЛИБ, АКБ и АКБЛ для выделения областей всплесков отмечены на приведенных рисунках номерами 3, 4 и 5 соответственно.

В качестве иллюстрации результатов обработки научных данных программным обеспечением «PSData2», на рис. 1а приведена зависимость напряжения от времени в типичном эксперименте. На рис. 1б показана зависимость отклика детектора излучения от времени в этом же эксперименте.

Развитые, в предположении о слабом изменении значений базовой кривой в аномальных областях, и реализованные методы в программном обеспечении «PSData2» позволяют выделять такого рода всплески в эмпирических зависимостях, рассчитать их значения мощности, амплитуды и положение. Существует возможность выбора экспертом метода выделения всплесков на базовой кривой эмпирической зависимости (см. рис. 1). Как видно из рис. 1б, выбор метода выделения аномальных областей III и IV в эмпирических зависимостях при малой зашумленности несущественен для обработки данных и поиска корректных значений информационных параметров.

На рис. 2 представлены сильно зашумленные данные измерений.

Отметим, что при обработке результатов измерений программным обеспечением «PSData2», положения пиков выявляются достаточно точно (см. рис. 2) даже при наличии сильной зашумленности данных. Из этого следует, что процедуры обработки локальных максимумов на наборах результатов измерений работают корректно.

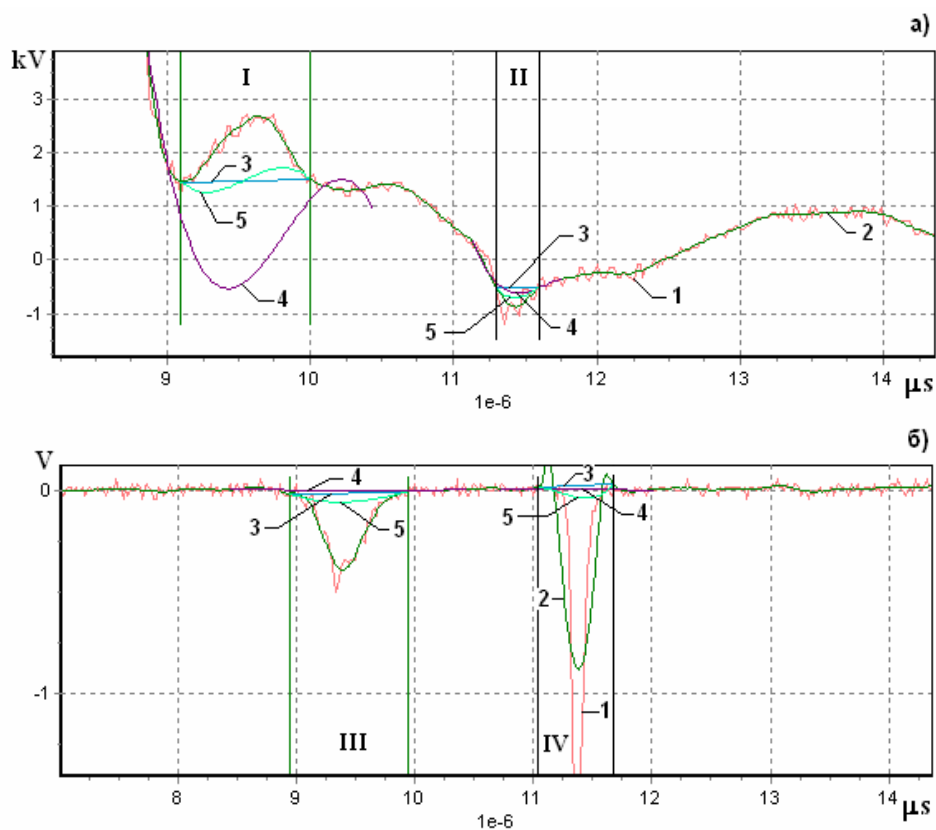


Рис. 1. Результаты обработки научных данных программным обеспечением «PSData2».

а) – Напряжение от времени; б) – Отклик детектора излучения от времени:

1- экспериментальные данные; 2- сглаженные МСГ; 3- результат обработки ЛИБ; 4- результат обработки АКБ; 5- результат обработки АКБЛ; Область I – область первого всплеска; II – второго всплеска; III – первого пика; IV – второго пика.

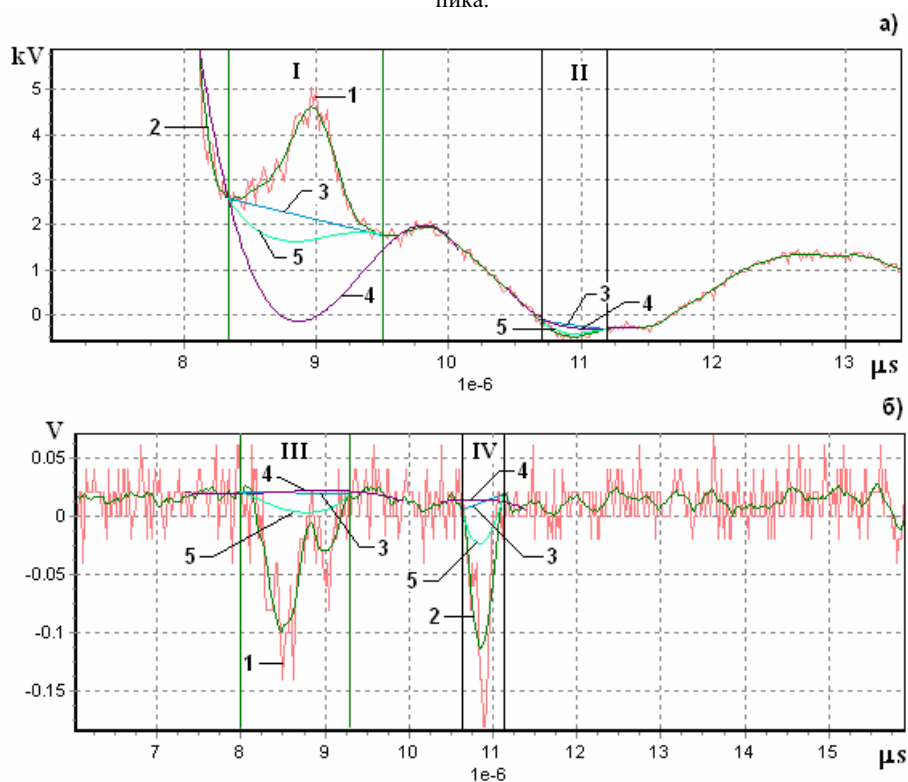


Рис. 2. Результаты обработки научных данных программным обеспечением «PSData2»

а) – Напряжение от времени; б) – Отклик детектора излучения от времени:

1- экспериментальные данные; 2- сглаженные МСГ; 3- результат обработки ЛИБ; 4- результат обработки АКБ; 5- результат обработки АКБЛ; Область I – область первого всплеска; II – второго всплеска; III – первого пика; IV – второго пика.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Серии обрабатываемых экспериментов включают в себя данные, характеризующие зависимость интенсивности излучения от двух параметров – первоначального запаса энергии и плотности предварительной плазмы. Первоначальный энергозапас характеризует зарядное напряжение, а плотность предварительной плазмы – напряжение поджига. В каждой серии был выполнен набор экспериментов с неизменными характеристиками разряда для оценки воспроизводимости результатов измерений.

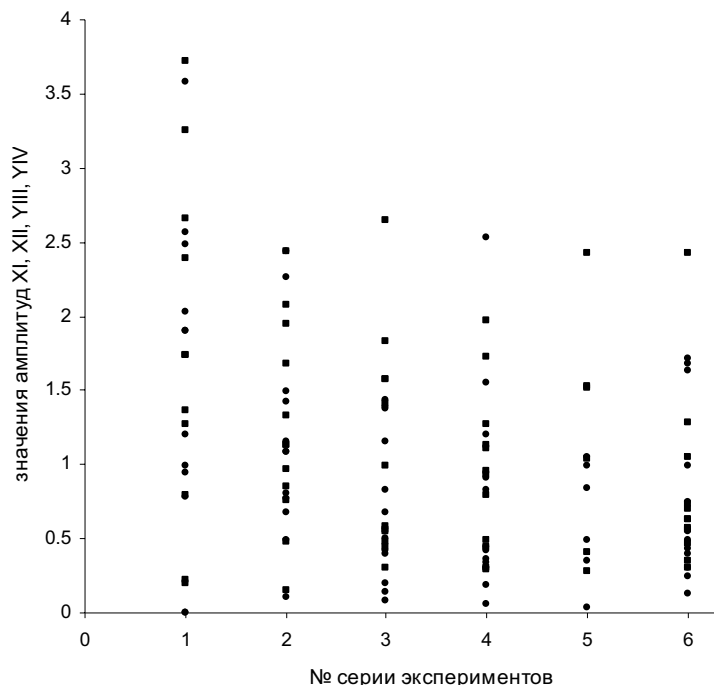


Рис. 3. Стохастичность результатов экспериментов

ультрафиолета, были применены методы корреляционного анализа.

Прежде всего, были вычислены положения локальных максимумов в аномальных областях зависимостей напряжения от времени протекания процесса и положения локальных максимумов в зависимости отклика детектора излучения от времени. Результаты этих вычислений представлены на рис. 4. Как видно из рисунка наблюдается сильная линейная корреляция между положениями исследуемых локальных максимумов в аномальных областях, о чем свидетельствует высокий коэффициент корреляции.

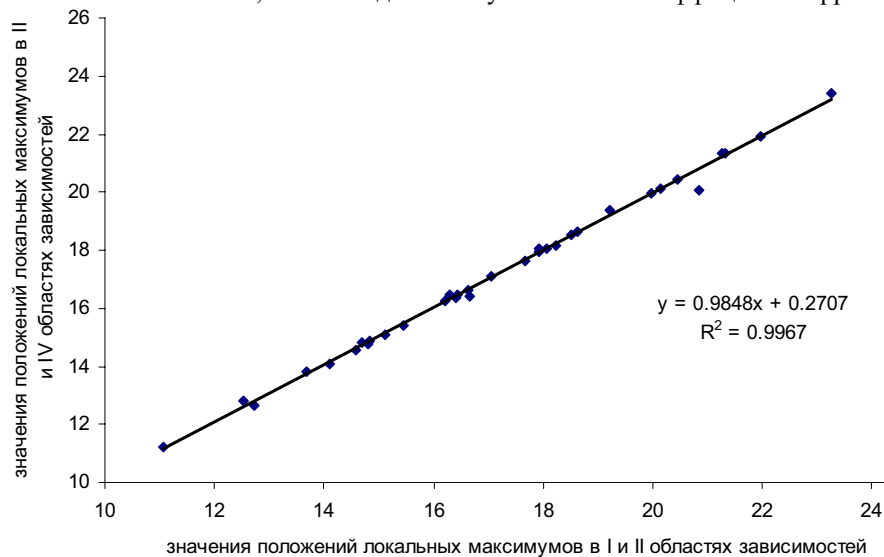


Рис. 4. Корреляция временных точек

регистрируемого детектором пика излучения из плазменного разряда X_{III} и амплитуд первого аномального всплеска в зависимости напряжения от времени X_I представлены на рис. 5. Как видно из рисунка наблюдается слабая корреляция данных.

Статистический анализ значений амплитуд локальных минимумов в зависимости напряжения от времени X_{II} и амплитуд второго пика излучения X_{IV} приведен на рис. 6. Из рисунка видно, что наблюдается сильная

Типичный блок серий экспериментов был обработан программным обеспечением «PSData2». Полученные значения информационных параметров (X_I , X_{II} – значения амплитуд аномальных всплесков в зависимости напряжения от времени, X_{III} , X_{IV} – значения амплитуд пиков излучения из плазменного разряда, и др.) сведены в единую таблицу и представлены в безразмерных единицах.

Как следует из данных таблицы, при неизменных характеристиках плазменного разряда, наблюдаются разные значения амплитуд пиков излучения из плазменного разряда и аномальных всплесков в зависимости напряжения от времени (см. рис. 3), что свидетельствует о стохастичности процесса излучения.

В силу стохастичности результатов измерений, к набору значений информационных параметров эмпирических зависимостей, полученных в экспериментальных исследованиях характеристик плазменного источника

Так как была обнаружена линейная корреляция между информационными параметрами во времени, то возможно существует причинно-следственная связь между физическими характеристиками плазменного разряда и результатами измерения интенсивности излучения. В этой связи, был проведен статистический анализ зависимостей между значениями амплитуд пиков излучения из плазменного разряда и значениями амплитуд аномальных всплесков. Результаты статистического анализа амплитуд первого

квадратичная корреляция исследуемых информационных параметров.

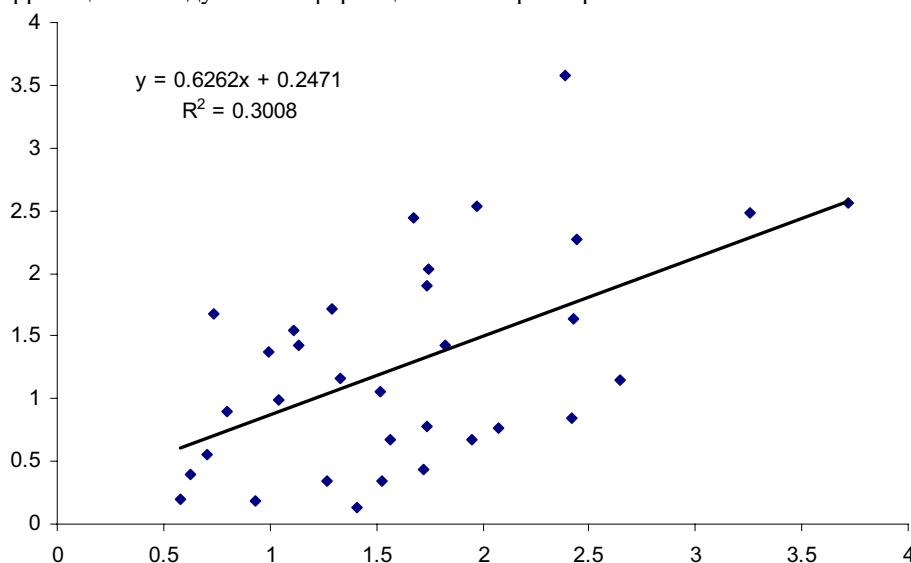


Рис. 5. Результаты статистического анализа амплитуд первого регистрируемого детектором пика излучения из плазменного разряда (X_{III}) и амплитуд локального максимума в зависимости напряжения от времени (X_I)

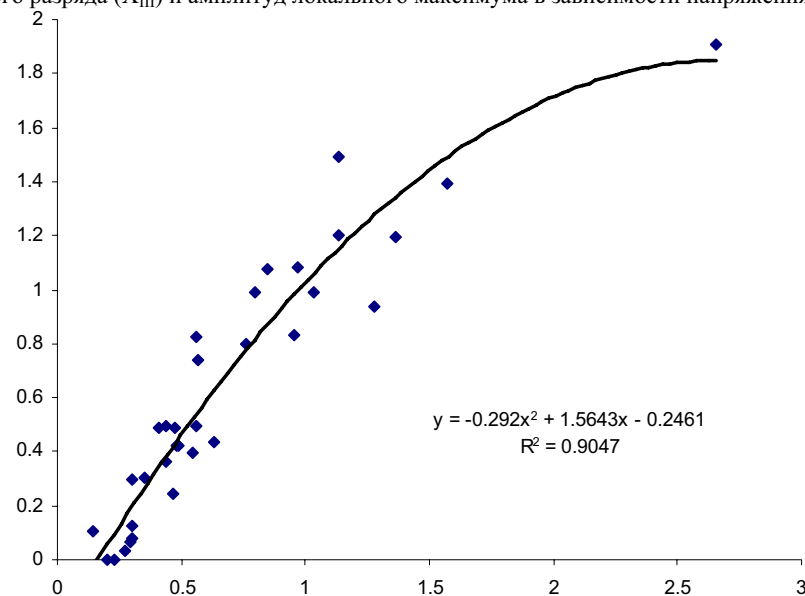


Рис. 6. Результаты статистического анализа амплитуд второго регистрируемого детектором пика излучения из плазменного разряда (X_{IV}) и локального минимума в зависимости напряжения от времени (X_{II})

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью программного обеспечения «PSData2» проведен анализ результатов измерений, полученных при исследовании излучения из сильноточного импульсного плазменного диода. В результате анализа информационных параметров было установлено:

- 1) стохастичность механизма формирования импульсов излучения в плазменном разряде, следовательно, лишь статистическая устойчивость и вероятностная воспроизводимость результатов экспериментов;
- 2) линейная корреляция между положениями на временной оси локальных экстремумов в зависимостях напряжения и интенсивности излучения от времени;
- 3) корреляция положения и амплитуды локального минимума в зависимости напряжения от времени с положением во времени и амплитудой второго пика излучения из плазменного разряда.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о корректности используемых численных методов обработки экспериментальных данных, реализованных в «PSData2». Выявленные на основе развитой информационной технологии [10] физические закономерности свидетельствуют о целесообразности использования этой методики компьютерного анализа результатов измерений в научных исследованиях сложных стохастических явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A.F. Tseluyko, V.T. Lazurik, D.L. Ryabchikov, V.I. Maslov, I.N. Sereda Experimental Study of Radiation in the Wavelength Range 12.2–15.8 nm from a Pulsed High-Current Plasma Diode // *Plasma Physics Reports*. – 2008. – Vol. 34, № 11. – P. 963–968.
2. А.Ф. Целуйко, В.Т. Лазурик, Д.Л. Рябчиков, В.И. Маслов, И.Н. Серeda Исследование излучения в диапазоне длин волн 12.1 – 15.8 нм из плазмы сильноточного импульсного плазменного диода // *Физика Плазмы*. – 2008. – Том 34, № 11. – С. 1041-1046.
3. A.F. Tseluyko, V.T. Lazurik, D.L. Ryabchikov, V.I. Maslov, N.A. Azarenkov, I.N. Sereda, D.V. Zinov'ev, N.N. Yunakov, A.A. Makienko The Dynamics and Directions of Extreme Ultraviolet Radiation from Plasma of the High-Current Pulse Diode // *Abstract Book. "Int. Conf.-School on Plasma Phys. And Controlled Fusion."* Alushta (Crimea), Ukraine. – 2008. – P. 175.
4. A.F. Tseluyko, V.T. Lazurik, D.L. Ryabchikov, V.I. Maslov, N.A. Azarenkov, I.N. Sereda, D.V. Zinov'ev, N.N. Yunakov, A.A. Makienko Efficiency of Energy Transformation of a High-Current Pulse Discharge into Extreme Ultraviolet Radiation // *Abstract Book. "Int. Conf.-School on Plasma Phys. And Controlled Fusion."* Alushta (Crimea), Ukraine. – 2008. – P. 182.
5. В. Дюк, А. Самойленко Data Mining: Учебный курс // СПб.: Питер. – 2001. – С. 368.
6. А. Буюль, П. Цефель SPSS: искусство обработки информации // СПб.: ДиаСофт. – 2001. – С. 312.
7. Mehmed Kantardzic Data Mining: Concepts, Models, Methods, and Algorithms // Wiley-IEEE Press. – 2002. – P. 344.
8. М. Киселев, Е. Соломатин Средства добычи знаний в бизнесе и финансах // *Открытые системы*. – 1997. – № 4. – С. 41–44.
9. Mehmed Kantardzic, Jozef Zurada Next Generation of Data-Mining Applications // Wiley-IEEE Press. – 2005. – P. 696.
10. В.Т. Лазурик, А.В. Починок Концептуальная модель и численные методы обработки первичных данных научных исследований // *Збірник наукових статей Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні засоби та технології розроблення інформаційних систем»*, Харків, Україна. – 2008. – С. 61-62.
11. В.Т. Лазурик, А.В. Починок Модель компьютерной обработки и анализа экспериментальных данных при исследовании плазменного источника ультрафиолета // *Вестник Харьковского Национального Университета, серия "Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления"*. – 2008. – № 833. – С. 149-162.
12. P.R. Bevington Data reduction and error analysis for the physical sciences // Case Western Reserve University. – 1989. – P. 272.
13. Tatsuo Tabata Smoothing and Interpolation by Moving-Window Least Squares Polynomial Fits: Application to Energy- and Charge-Deposition Distributions by Electrons // *Bulletin of Osaka Prefecture University*. – 1997. – Series A. - Vol. 46, № 2. – P.71 – 78.
14. С. Минами, Т. Утида, С. Кавата Обработка экспериментальных данных с использованием компьютера / Пер. с япон. - М.: Радио и связь, 1999. – С. 256.
15. A. Savitzky, M.J.E. Golay Smoothing and Differentiation of Data by simplified Least Squares Procedures // *Analytical Chemistry*. – 1964. – Vol. 36, № 8. – P. 1627-1639.
16. Bromba, Ziegler Efficient Computation of Polynomial Smoothing Digital Filters // *Analytical Chemistry*. – 1979. – Vol. 51, № 11. – P. 1760-1762.
17. А.П. Кондрашов, Е.В. Шестопалов Основы физического эксперимента и математическая обработка результатов измерений. - М.: Атомиздат, 1977. – 200с.