

УДК 519.6: 537.53

Аппаратно-программный комплекс для измерения экстремального ультрафиолета

Е. В. Боргун, Д. В. Зиновьев, Д. Л. Рябчиков, А. Ф. Целуйко
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина

Показаны принципы создания и пример реализации аппаратно-программного комплекса для измерения ЭУФ-излучения плазмы сильноточных разрядов. Комплекс в составе тракта регистрации с датчиком типа AXUV, системы питания и программного обеспечения позволяет измерять в выделенном диапазоне частот интенсивность однократных или серии однократных импульсов излучения длительностью 1–10 мкс и больше.

Ключевые слова: измерение излучения экстремального ультрафиолета, сильноточные импульсные разряды.

Показані принципи створення і приклад реалізації апаратно-програмного комплексу для вимірювання ЕУФ-випромінювання плазми сильноточних розрядів. Комплекс у складі тракту реєстрації з датчиком типу AXUV, системи живлення і програмного забезпечення дозволяє міряти у виділеному діапазоні частот інтенсивність однократних або серії однократних імпульсів випромінювання тривалістю 1–10 мкс і більше.

Ключові слова: вимірювання випромінювання екстремального ультрафіолету сильноточним імпульсним розрядом.

It has been shown the principles of creation and realization example of the hardware and software complex for EUV radiation measurement of high-current discharge plasma. The complex composed of registration path with the sensor of AXUV type, the supply system and software allows measuring in allocated band the intensity of a single or series of single radiation pulses of 1–10 μ s width or higher.

Key words: measurement extreme ultra violet radiation, high-current pulse discharge.

1. Введение

Регистрация электромагнитного излучения в диапазоне экстремального ультрафиолета (ЭУФ-излучения) является важным элементом диагностики плазмы. Актуальность данного направления в настоящее время обусловлена еще и попытками создания компактного наноитографа с длиной волны $13,4 \pm 2$ нм [1]. (Выбранный диапазон длин волн определяется существующей на сегодня возможностью создания отражательных оптических элементов на основе многослойных покрытий.) Сейчас крупнейшие производители микросхем используют синхротронное излучение, которое генерируется с помощью мощных электронных ускорителей. Высокая стоимость синхротронных накопительных колец препятствует широкому промышленному применению, что в свою очередь ведет к монополизации производства.

Активной средой в разрабатываемых компактных наноитографах служит горячая неравновесная плазма, формируемая посредством быстрого подвода энергии, например, при взаимодействии лазерного излучения с мишенями или в сильноточных импульсных разрядах [2]. Горячая неравновесная плазма также широко используется в исследованиях по созданию рентгеновских лазеров и лазеров в диапазоне экстремального ультрафиолета [3].

В настоящее время для измерения ЭУФ-излучения применяются полупроводниковые датчики на основе фотодиодов с входными оптическими фильтрами, пропускающими определенный диапазон излучения. Использование таких датчиков при измерении излучения плазмы сильноточных импульсных разрядов требует учета определенных факторов, а также применения специфического программного обеспечения.

В данной работе описан аппаратно-программный комплекс измерения ЭУФ-излучения на основе датчиков типа AXUV-20 фирмы *International Radiation Detectors Inc.* (США, Калифорния) с полосой пропускания двухслойного Mo-Si оптического фильтра в диапазоне длин волн 12,2-15,8 нм и площадью собирающей поверхности 20 мм². Для полуавтоматического расчета интенсивности излучения была разработана оригинальная компьютерная программа *PSData*. Комплекс использовался для измерения интенсивности излучения плазмы вакуумного ($p \sim 10^{-6}$ Тор) сильноточного ($I_p \sim 40$ кА) импульсного ($T_u \sim 1 \dots 3$ мкс) плазменного диода в парах олова [4,5].

2. Тракт регистрации и схема питания

Ввиду сильного поглощения ЭУФ-излучения веществом (даже разреженным газом при давлении $p \sim 10^{-2}$ Тор) датчик излучения должен находиться в том же вакуумном объеме, что и плазменный источник излучения. При этом датчик оказывается под воздействием интенсивных высокоэнергетичных пучков заряженных частиц и потоков плазмы. Кроме того, наблюдается сравнимый с током датчика ток фотоэлектронов. Следует также отметить наличие больших широкополосных радиочастотных помех, создаваемых разрядом.

Бомбардирующие датчик пучки электронов и ионов создают на поверхности его оптического фильтра заряд, изменение которого проявляется как дополнительный емкостной ток в измерительной цепи. В случае пучков большой интенсивности значительный поверхностный заряд может привести к электрическому пробое датчика. Проникающая к датчику плазма создает дополнительный ток между его выводами. Фотоэлектроны, выбиваемые излучением с поверхности оптического фильтра или приходящие на нее с близко расположенных конструктивных элементов, изменяют поверхностный заряд, что индуцирует дополнительный емкостной ток в измерительной цепи датчика. Дополнительным фактором, который отрицательно влияет на амплитудно-частотные характеристики датчика AXUV-20, является большая собственная емкость его p - n перехода $C_d \sim 10$ нФ.

Для корректного измерения ЭУФ-излучения плазмы сильноточных разрядов, излучение к датчику должно подводиться специальным каналом, устраняющим воздействие на датчик пучков заряженных частиц и плазмы, а также фототока с конструктивных элементов канала. Электрическая схема должна учитывать большую емкость датчика C_d , исключать фототок с поверхности входного оптического фильтра и быть работоспособной в условиях высокого уровня радиочастотных помех.

Исходя из перечисленных требований, канал был выполнен из медной трубки длиной 30 см и внутренним диаметром 6 мм, помещенной в поперечное магнитное поле H_{\perp} . Напряженность поля $H_{\perp} \sim 2$ кЭ и его протяженность

$l_H = 27$ см были достаточными для отклонения шестикратно ионизованных ионов олова. В области расположения датчика канал расширялся до диаметра 16 мм и магнитное поле отсутствовало. Для исключения попадания фотоэлектронов со стенок, перед датчиком располагались две диафрагмы с отверстиями 5 и 6 мм, так, что ближайшая к датчику диафрагма с большим отверстием была полностью затенена от источника излучения предыдущей диафрагмой.

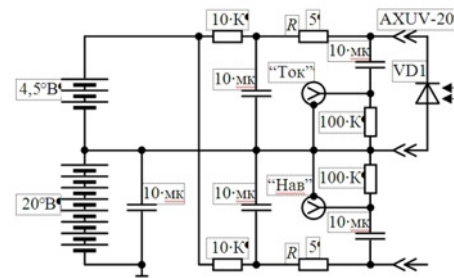
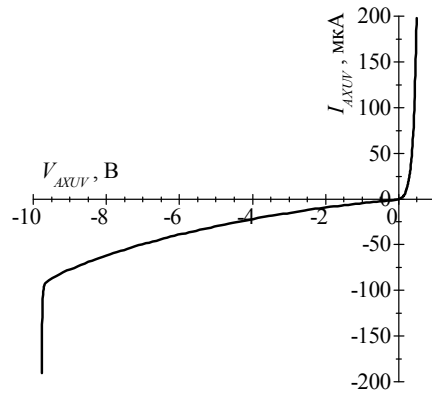


Рис.1. Вольтамперная характеристика датчика AXUV-20 в отсутствие излучения. Рис.2. Схема питания датчика.

Фототок с поверхности оптического фильтра исключался запирающим фотоэлектронов электрическим полем за счет подачи на корпус датчика (анод) положительного относительно канала потенциала смещения +14 В.

Подключение датчика AXUV-20 определялось его вольтамперной характеристикой, которая подобна характеристике стабилитрона (рис.1.). Рабочая точка выбиралась на обратной ветке путем подачи обратного напряжения $-4,5$ В. Для исключения шунтирующего действия паразитной емкости источника обратного напряжения измерительное сопротивление R располагалось в цепи катода.

С целью исключения передачи помехи по сети использовались автономные батарейные источники питания смещения и обратного напряжения, а измерительная схема содержала 2 идентичных канала питания и регистрации. Один подключался к датчику AXUV-20, а другой – балластный – служил для выделения сигнала наводки. Сигналы с каналов подавались на дифференциальный усилитель осциллографа. Схема питания датчика приведена на рис.2.

3. Методика измерения

При измерении импульсов излучения малой длительности с помощью датчиков типа AXUV-20 из-за большой собственной емкости $p-n$ перехода C_d происходит интегрирование сигнала тока датчика, что усложняет интерпретацию получаемых данных при $\tau_{имп} < RC_d$.

Так, в случае высокой интенсивности излучения, когда сопротивление датчика в открытом состоянии меньше измерительного сопротивления R ,

амплитуда наблюдаемого сигнала $V(t)$ не зависит от номинала R и определяется только продолжительностью и интенсивностью излучения. Скорость нарастания сигнала в этом случае зависит от интенсивности излучения и емкости C_d . При малой интенсивности излучения, когда сопротивление датчика в открытом состоянии больше измерительного сопротивления R , амплитуда сигнала $V(t)$ пропорциональна R , а скорость нарастания сигнала не зависит от интенсивности излучения и определяется величиной сопротивления R и емкостью C_d .

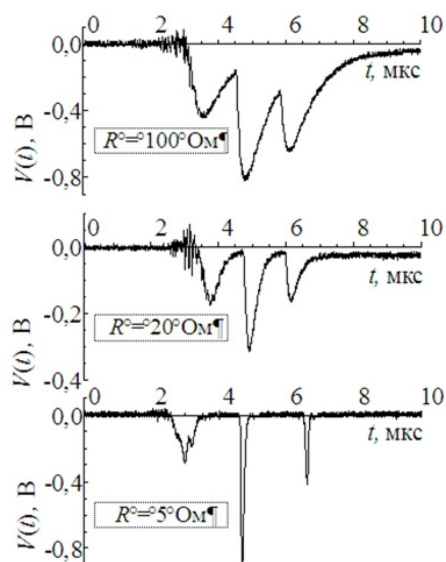


Рис.3. Влияние величины сопротивления R на форму сигнала.

Сложную зависимость наблюдаемого сигнала от параметров цепи и импульса излучения можно обойти, если измерять не мощность излучения, а дозу $J(\Delta t)$ за определенный интервал времени $\Delta t = t_2 - t_1$ больший, чем длительность наблюдаемого сигнала. В этом случае $J(\Delta t)$ будет пропорциональна заряду Q , который индуцирован в датчике под действием излучения и величину $J(\Delta t)$ можно вычислить из интеграла от наблюдаемого сигнала $V(t)$

$$J(\Delta t) = \alpha Q = \frac{\alpha}{R} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt .$$

Коэффициент пропорциональности α находится при

калибровке датчика.

Если в течение разрядного импульса наблюдается несколько импульсов излучения, то из-за того, что время спада сигнала пропорционально RC_d , сопротивление R следует снижать до тех пор, пока не будет четкого разделения отдельных импульсов излучения по времени. Влияние величины измерительного сопротивления R на форму наблюдаемого сигнала $V(t)$ демонстрируют характерные осциллограммы на рис.3.

4. Система полуавтоматического расчета интенсивности излучения

Сложная структура сигнала предполагает интегрирование отдельных участков осциллограмм, что сильно увеличивает трудоемкость обработки большого количества экспериментального материала. С целью автоматизации обработки данных была разработана оригинальная программа *PSData*, которая обеспечивает работу с базами данных, формируемых с помощью цифровых осциллографов [6].

В работе использовались 4-х каналные осциллографы *Tektronix-2014* с дополнительными модулями памяти. Каждый осциллограф регистрировал ток датчика излучения, сигнал наводки и разностный сигнал. Все три сигнала записывались непосредственно в осциллографе в отдельную папку в виде отдельных файлов, содержащих информацию о развертке и чувствительности канала, а также сам сигнал в цифровом виде ($2,5 \cdot 10^3$ точек). Содержимое файлов было доступно для работы с *Excel*. Кроме того, в эту же папку в виде файла с расширением *bmp* записывалось изображение экрана с основными установками. Папке автоматически присваивался последующий номер, а имена файлов содержали номер канала и номер папки. По мере необходимости папки с файлами переносились на персональный компьютер и вручную складывались в определенные директории, группируемые по датам и условиям эксперимента.

С помощью программы *PSData* можно было вызывать либо директорию, где хранились папки с файлами сигналов, либо какой-то определенный файл. При открытии файла сигнала определенного канала в интерфейсе программы отображалась осциллограмма сигнала, на которой вручную можно было задавать до 9 зон интегрирования (рис.4.). Для ускорения расчета интегральных значений пиков на отдельных участках осциллограммы требовалась автоматизация выделения зон пиков. Задача усложнялась наличием высокочастотного шума, а также тем, что пики имели разную амплитуду, форму и длительность.

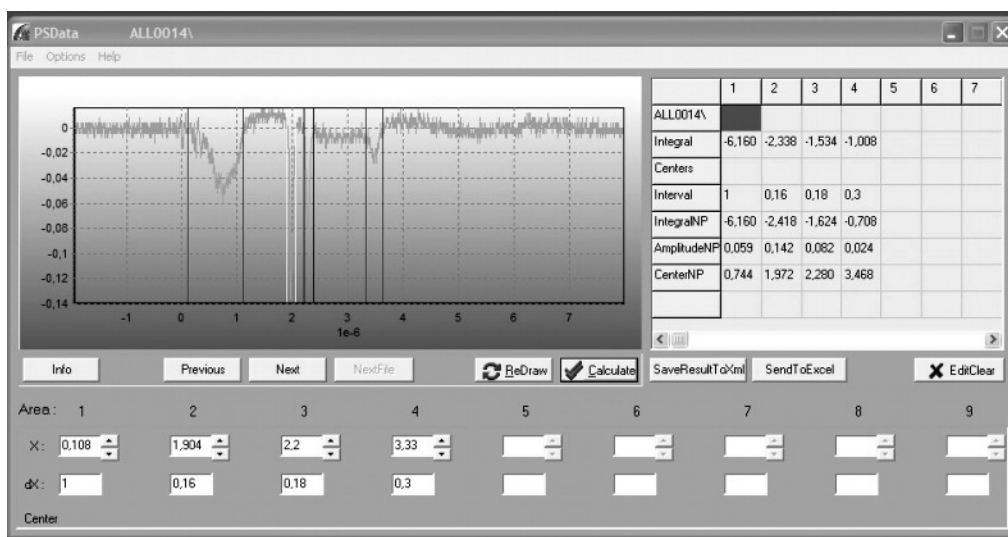


Рис.4. Интерфейс программы *PSData*.

Для автоматического выделения зоны пика программным образом производилась следующая процедура:

1. Проводилось предварительное сглаживание экспериментальной кривой методом скользящего окна с простым усреднением. В скользящем окне с заданным количеством точек срединной точке присваивалось среднее для этого отрезка значение. Количество точек в скользящем окне можно задавать в опциях в ячейке «Width of window for first smoothing» (рис.5.). Количество точек выбиралось из соображений устранения высокочастотных шумов при сохранении характерного вида осциллограммы. Вид сглаженной кривой можно накладывать на реальную осциллограмму, выбрав опцию «show smoothing curve».

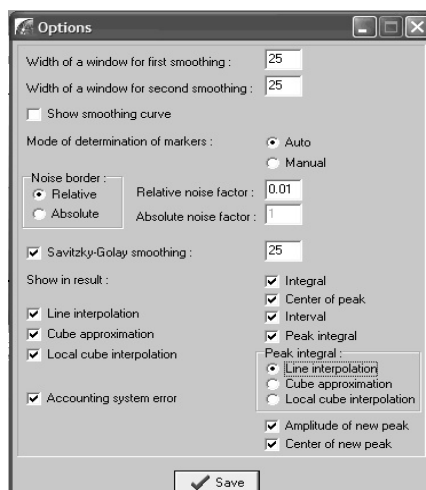


Рис.5. Окно опций программы PSData

2. Для сглаженной кривой численным методом рассчитывалась производная, и определялись экстремумы функции. В результате получался большой массив корней, из которого выбирались корни экстремумов соответствующие минимумам сигнала. (Последнее определялось тем, что исследуемые пики имели отрицательную полярность.)
3. Для определения амплитуд пиков проводилось повторное сглаживание кривой методом скользящего окна либо простым усреднением, либо методом Савитского-Голая полиномами 2-го порядка. Метод Савитского-Голая устанавливался при выборе опции «Savitzky-Golay smoothing», в противном случае программа автоматически производила сглаживание простым усреднением. Ширина окна выбранного способа сглаживания корректировалась в ячейках «Width of window for second smoothing» и «Savitzky-Golay smoothing». Величина амплитуд пиков вычислялась аналитически.
4. С целью более точного выделения области пика определялся уровень шумов гистограммным методом. Производилась сепарация всех найденных пиков по величине относительно шкалы, разбитой на 20

- диапазонов. Диапазон, в который попадало наибольшее количество пиков малой амплитуды, принимался в качестве уровня шума.
5. Зона пика определялась, используя один из режимов, в которых отслеживалось спадание функции либо до уровня шума, либо до некоторого значения, зависящего от максимального значения амплитуды пика.
 - В первом режиме программа при определении области пика ориентируется на амплитудное значение пика, устанавливая границы области пика там, где функция спадает в n раз. Коэффициент спадания выставляется в опциях в ячейке «relative noise factor». Существует ряд случаев, когда возникают трудности с применимостью этого метода. Например, в случае совмещенных пиков выбирается минимальное значение между пиками, куда и устанавливается маркер границы. Или в случае, когда выставленные параметры в опциях не корректны для конкретного сигнала, определение границ области пика выполняется оператором вручную.
 - Во втором режиме установление границ области пика определяется уровнем шума. Из общего сигнала вычитается сигнал шума, определенный гистограммным методом, и устанавливаются маркеры. Выбор этого режима осуществляется выбором опции «absolute noise factor». Этот метод позволяет определять пики малой амплитуды у основания пика большой амплитуды. При случае возникновения совмещенных пиков выполняется процедура, как и в предыдущем режиме.

После нажатия кнопки **Calculate** производилось интегрирование сигнала в выделенных зонах и в окне справа в виде таблицы появлялись результаты. Результаты содержали информацию о диапазонах зон интегрирования, значениях интегралов в зонах, амплитудах сигналов и их положении. При нажатии кнопки **Next** вызывался сигнал выделенного канала из следующей папки, а предыдущая информация автоматически сохранялась. Полученную информацию можно было сохранять в виде отдельного файла и/или импортировать в *Excel*.

5. Заключение

В работе показаны принципы создания и приведен пример реализации аппаратно-программного комплекса для измерения ЭУФ-излучения плазмы сильноточных разрядов. Экспериментальная проверка предложенного алгоритма автоматического выделения пиков различной амплитуды, формы и длительности в условиях высокочастотного шума доказала его применимость для автоматической обработки исследуемых осциллограмм. Разработанная программа *PSData* позволяла реализовывать быструю обработку большого количества экспериментальных данных.

Авторы статьи признательны разработчикам программы *PSData* А. В. Починок, В. Т. Лазурику за предоставленное программное обеспечение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сейсян Р. Нанолитография СБИС в экстремальном дальнем вакуумном ультрафиолете (Обзор) // ЖТФ.- 2005.- т.75, в.5.-С.1-13.
2. Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Иванов А.С. и др. Прогресс в создании мощных разрядных источников в экстремальном УФ-диапазоне// Известия РАН. Серия физическая.- 2005.- т. 69, №2.- С.182-190.
3. Gibson E.A., Paul A., Wagner N. et. al. High-order harmonic generation up to 250 eV from highly ionized argon// Phys.Rev.Lett..- 2004.- v.92, n.3.- P.(033001)1-4.
4. Целуйко А.Ф., Середа И.Н., Лазурик В.Т., Рябчиков Д.Л., Маслов В.И. Исследование излучения в диапазоне длин волн 12,2-15,8 нм из плазмы сильнотоочного импульсного пламенного диода // Физика плазмы.- 2008, т.34, №10,- С.1-6
5. Tseluyko A.F., Lazuryk V.T, Ryabchikov D.V et. al. The Dynamics and Directions of Extreme Ultraviolet Radiation from Plasma of the High-Current Pulse Diode. // Problems of Atomic Science and Technology, series: plasma physics (15), 2009, vol.1, P.165-167
6. Починок А.В., Лазурик В.Т, Целуйко А.Ф., Боргун Е.В. Компьютерная обработка результатов измерений характеристик плазменного источника ультрафиолета // Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля». 2009, Вип.2(42), №859, С.59-64.