УДК 533.9

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДЕТЕКТОРА

В.М. Трухин, Д.В. Рыжаков, Е.А. Шестаков

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В статье показано, что классическая аналоговая схема регистрации спектров рентгеновского излучения из плазмы импульсной установки типа токамак с использованием твердотельного полупроводникового детектора имеет ряд недостатков. Для исправления этих недостатков предложены методика регистрации сигналов с помощью осциллографического аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и алгоритм обработки полученного сигнала. Проведено сравнение спектров калибровочных источников и спектров излучения из плазмы в нескольких режимах работы установки, полученных различными методами. Показано, что спектры, полученные с помощью как спектрометрического, так и осциллографического АЦП, практически совпадают. Рассмотрен метод обработки импульсов от зарегистрированных квантов, пришедших в момент, когда не закончена обработка импульса от предыдущего кванта. Этот метод позволит учесть возможные искажения и правильно рассчитать энергию пришедших квантов. Предложен способ улучшения быстродействия спектрометра за счёт использования двух каналов регистрации сигнала с различным временем дифференцирования. В результате дальнейшей работы предполагается повысить скорость регистрации рентгеновских квантов, а также разработать алгоритмы изучения быстропротекающих процессов в плазме, используя информацию о времени регистрации квантов.

Ключевые слова: рентген, полупроводниковый детектор, АЦП, токамак, цифровая обработка.

DIGITAL PROCESSING SIGNALS OF THE SEMICONDUCTOR ROENTGEN DETECTOR

V.M. Trukhin, D.V. Ryjakov, E.A. Shestakov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

It is shown in this paper that the classical X-ray radiation spectra analog recording technique from a "Tokamak" pulsed plasma installations, using a solid-state semiconductor detector has a number of drawbacks. To remedy these drawbacks, the technique of recording signals with a time-signal analog-digital converter and signal processing algorithm proposed. A comparison of the calibration sources spectra and plasma emission spectra in several operating modes, obtained by various methods, is done. It is shown that the spectra obtained using a spectrometer and time-signal ADC, are virtually identical. The method of pulse processing of the recorded photons coming at a time when not finished processing the momentum from the previous quantum. This method allows to take into account possible distortions and to calculate the energy of photons come. A way for improving the spectrometer performance the by using two channels of signal recording with different differentiation time is proposed. As a result, the work is intended to increase the speed of recording X-rays, and to develop algorithms for the study of fast processes in the plasma, using information about the quanta registration time.

Key words: X-ray, semiconductor detector, ADC, tokamak, digital processing.

ВВЕДЕНИЕ

Твердотельные детекторы рентгеновского излучения нашли широкое применение в изучении свойств плазмы в экспериментальных термоядерных установках [1]. Диагностические системы, созданные на основе таких детекторов, используются для измерения спектров рентгеновского излучения с целью последующего определения температуры плазмы, примесного состава, наличия искажений функции распределения электронного компонента плазмы [1]. Характерное время разряда плазмы в современных экспериментальных установках типа токамак варьируется от ~1 с до нескольких десятков секунд. В течение разряда происходят быстро меняющиеся во времени процессы, такие, например, как пилообразные колебания. Изучение подобных процессов требует регистрации спектров за короткое время (несколько миллисекунд).

Рентгеновское излучение из плазмы токамака неоднородно по энергиям. Это излучение состоит из непрерывного тормозного и рекомбинационного излучения (континуум), а также линейчатого спектра. В большинстве случаев зависимость интенсивности континуума от энергии кванта соответствует максвелловскому распределению [1]

$$dI/dE \approx A \exp(-E/T_e), \quad (1)$$

где dI/dE — плотность излучаемой мощности рентгена; E — энергия; T_e — электронная температура плазмы. Линейчатый спектр приводит к увеличению интенсивности излучения вблизи характерной энергии. Например, в установке токамак Т-10, камера которой изготовлена из нержавеющей стали, наиболее типичными линиями в спектре в области энергии выше 3 кэВ являются К-линии Cr (~5,6 кэВ), Fe (~6,6 кэВ) и Ni (~7,5 кэВ). Для уверенного определения этих примесей в плазме энергетическое разрешение спектрометра должно быть не хуже 270 эВ. Также опытным путём установлено, что минимальная измеряемая электронная температура примерно равна энергетическому разрешению спектрометра. Форма континуума, как видно из (1), несёт информацию о температуре электронов плазмы. Линейчатый спектр позволяет определить качественный и количественный состав примесей.

Несовершенство системы сбора данных (не самого детектора, а системы регистрации сигнала) может приводить к искажениям спектра, не связанным с параметрами измеряемого объекта. Например, увеличение скорости поступающих из плазмы фотонов выше некоего порогового уровня приводит к перегрузке аналогового тракта системы регистрации. В этом случае возможно нарушение линейности зависимости выходного сигнала от энергии входного импульса. В случае очень большой загрузки даже возможно насыщение тракта, когда система перестаёт реагировать на входной сигнал.

Но когда входная загрузка ещё далека от предельной, значительную часть сигналов детектора приходится исключать из обработки. Это необходимо делать, если сигнал от кванта регистрируется в момент, когда не закончена обработка предыдущего сигнала. Однако система обнаружения одновременной регистрации нескольких квантов не идеальна, поэтому на выходе системы возникают импульсы, амплитуда которых равна сумме амплитуд пришедших одновременно квантов (наложенные импульсы). Именно появление наложенных импульсов ограничивает входную загрузку классического спектрометра. Снижение входного потока для уменьшения искажений спектров нежелательно, поскольку низкая загрузка системы регистрации не позволяет собрать достаточное количество квантов для определения параметров плазмы (электронной температуры) с необходимой точностью за время, определяемое условиями эксперимента. В связи с этим возник вопрос о модернизации системы регистрации, для решения которого было предложено заменить аналоговые части системы на цифровую.

В данной статье описывается возможность улучшения временных характеристик спектрометра за счёт регистрации сигнала рентгеновского детектора осциллографическим (время—сигнал) аналого-цифровым преобразователем с последующей программной обработкой сигнала. Вначале рассматриваются недостатки аналоговой системы сбора данных, потом рассматривается использование цифровой регистрации и обработки, затем представлены полученные результаты. В Заключение рассмотрен алгоритм коррекции импульсов, искажённых наложениями, а также предложены возможные пути развития данного метода.

НЕДОСТАТКИ АНАЛОГОВОГО ТРАКТА

Использование спектрометрических усилителя и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для регистрации информации от твердотельных рентгеновских спектрометров на основе полупроводниковых детекторов в условиях проведения измерения излучения из плазмы импульсных установок имеет ряд недостатков.

На рис. 1 показана блок-схема аналогового канала регистрации спектрометра. Рентгеновский квант, поглощаясь в материале детектора, создаёт в нём заряд. Этот заряд преобразуется в электрический сиг-

Рис. 1. Блок-схема аналогового канала регистрации

нал с помощью зарядочувствительного предусилителя. Далее сигнал обрабатывается (формируется) спектрометрическим усилителем. Там же вырабатывается сигнал, управляющий режектором. Режектор — электронно-логическое устройство, отвечающее за исключение наложенных импульсов. Он имеет своё «мёртвое» время. Все пришедшие в это «мёртвое» время кванты воспринимаются системой как единый квант с энергией, равной сумме энергии пришедших квантов. Временное разрешение режектора «наложенных» импульсов в используемом спектрометрическом тракте составляет примерно 500 нс. Как видно из (1), рентгеновское излучение (РИ) в большинстве случаев имеет обратную экспоненциальную зависимость от энергии ($\sim \exp(-E/T_e)$), поэтому даже относительно небольшое количество полученных искажённых («наложенных») импульсов приводит к деформации спектров и увеличению ошибок. В результате входную загрузку не удаётся увеличить более 50—70 имп./мс. Необходимая статистическая точность ($\sim 5\%$) для определения основного параметра — наклона непрерывной части спектра, представленного в полулогарифмическом масштабе, т.е. T_e , достигается при наборе не менее 1500 импульсов, что и определяет минимальную длительность набора. Затем сформированный сигнал оцифровывается спектрометрическим АЦП. В память АЦП записывается информация об амплитуде полученного сигнала. Информация о времени прихода кванта не записывается. Минимальное время набора каждого спектра для получения достаточной статистической точности составляет 20 мс. Временные зависимости параметров плазмы определяются при анализе набранных последовательно во времени спектров. В результате эти временные зависимости можно определить только с указанной точностью.

В плазме присутствуют процессы, изучение которых требует лучшего временного разрешения. На рис. 2 представлены примеры сигналов излучения СВЧ на частоте второй гармоники электронного циклотронного резонанса и интегрального рентгеновского излучения в диапазоне 1—5 кэВ из плазмы. Сигналы получены в разряде токамака Т-10 № 61 629 с током плазмы $I_p = 300$ кА, плотностью электронов $n_e = 1,78 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и мощностью дополнительного нагрева 800 кВт в интервале с 650-й по 750-ю мс разряда. Видно, что характерное время развития процесса пилообразных колебаний составляет единицы миллисекунд.

Рис. 2. Сигналы излучения на второй гармонике ЭЦР (красный цвет) в разряде № 61 629 и сигнал многоконтурного пропорционального счётчика в потоковом режиме из центра плазмы (синий цвет)

Улучшить временное разрешение можно уменьшением времени набора каждого спектра, что при заданной длительности разряда установки требует увеличения количества набранных спектров. Такое решение ведёт к необходимости увеличения объёма памяти для хранения этих спектров. Эта память, как правило, установлена в АЦП, и размер её фиксирован. Поэтому имеется принципиальное ограничение на точность определения времени прихода фотона.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ

Для устранения описанных недостатков в работе спектрометра предлагается оцифровывать и записывать исходный сигнал с предусилителя вместе с информацией о времени регистрации. Получение из этого сигнала спектрометрической информации будет возложено на программное обеспечение.

Время нарастания сигнала предусилителя имеющегося в наличии кремний-литиевого (SiLi) детектора составляет ~ 100 нс. Для существенного улучшения временных характеристик спектрометра при сохранении исходного требуемого энергетического разрешения предпринята попытка использовать современные осциллографические АЦП с частотой оцифровки 30—60 МГц. Такая частота оцифровки позволит иметь на фронт сигнала достаточное количество отсчётов для определения момента прихода импульса.

Использованный в работе АЦП NI PXI-5105¹ имеет 12 разрядов квантования, частота оцифровки 30—60 МГц. Диапазон изменения сигнала на выходе предусилителя полупроводникового детектора (ППД) составляет 5 В. Если записывать весь размах сигнала полностью, как показано на рис. 3, то шаг квантования при оцифровке будет равен ~ 1 мВ. Коэффициент преобразования зарядочувствительного предусилителя находится в диапазоне 15—50 мкВ/кэВ. При энергетическом разрешении полупроводникового детектора порядка 200 эВ приведённый к входу уровень шумов будет менее 10 мкВ. Практически полезную информацию несёт в себе только величина скачка сигнала, а не его абсолютная величина. Поэтому для того чтобы шаг квантования АЦП сделать меньше уровня шумов детектора, сигнал с выхода предусилителя подавался на вход АЦП через дифференцирующий усилитель с коэффициентом усиления 25 и временем дифференцирования 0,7 мкс по схеме, показанной на рис. 4.

Рис. 3. Сигнал с предусилителя. Выделен момент прихода рентгеновского кванта

Рис. 4. Блок-схема регистрации сигналов осциллографическим АЦП

Сигнал с предусилителя дифференцируется и усиливается. После этого сигнал анализируется АЦП и запоминается в памяти АЦП. После этого информация записывается в компьютер. Входной диапазон АЦП выбран исходя из диапазона изменения усиленного дифференцирующим усилителем сигнала с де-

¹ Ссылка на страницу производителя с описанием данного АЦП: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/203023>.

тектора. Шаг квантования при этом составил 50 мкВ, что в ~ 5 раз меньше уровня шумов детектора. Время нарастания зарегистрированных в АЦП импульсов входного сигнала получилось примерно 120 нс. Это время практически не зависит от амплитуды сигнала.

Недостатком метода является необходимость использования большого объёма памяти для запоминания сигналов. При частоте дискретизации 50 МГц при 12-битном АЦП для запоминания спектра в течение 1 с требуется 100 Мбайт памяти. Обработка такого массива данных требует применения быстродействующей вычислительной техники.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Пример зарегистрированного сигнала представлен на рис. 5. При измерении этого сигнала АЦП работал с частотой дискретизации 60 МГц. Моменты прихода импульсов определяли по величине производной сигнала, рассчитываемой по методу Ньютона. Определение амплитуды сигнала проводили путём интегрирования отсчётов методом прямоугольников, начиная от момента прихода кванта. За ноль сигнала принималось среднее по нескольким отсчётам перед импульсом.

Рис. 5. Сигнал с детектора после дифференцирующего усилителя

Для данной обработки ноль определялся по 50 отсчётам перед импульсом, интегрирование сигнала велось по 40 отсчётам. Такой выбор давал наилучшее значение энергетического разрешения детектора при данных частоте дискретизации и времени дифференцирования усилителя. Импульсы, искажённые за счёт наложений, исключались из обработки. Наложённые импульсы возможно было уверенно различить, если моменты прихода квантов различались на время, большее длительности времени нарастания сигнала, т.е. более 120 нс. Поэтому максимальная входная нагрузка при использовании данного метода может быть в

4 раза выше, чем в канале с аналоговой обработкой сигнала.

Для сравнения спектрометрических характеристик проведены измерения спектров калибровочных источников ^{55}Fe (рис. 6) и ^{241}Am (рис. 7). На рис. 6, а и 7, а показаны спектры, измеренные с помощью NI PXI-5105, на рис. 6, б и 7, б — с помощью спектрометрических АЦП и усилителя, используемого в составе многоканального спектрометра мягкого рентгена на установке токамак Т-10. Форма выходного сигнала спектрометрического усилителя квазигауссовая с характерным временем формирования 1 мкс. Энергетическое разрешение (ширина пика на половине высоты) для спектров на рис. 6, б и 7, б составляет 280 эВ.

Рис. 6. Спектр ^{55}Fe : а — измерение осциллографическим АЦП; б — измерение спектрометрическим АЦП

Рис. 7. Спектр ^{241}Am : *a* — измерение осциллографическим АЦП; *б* — измерение спектрометрическим АЦП

Можно утверждать, что спектры измерены примерно с одинаковым энергетическим разрешением. Несколько худшая статистическая точность спектров на рис. 6, *a* и 7, *a* по сравнению со спектрами на рис. 7, *б* и 8, *б* объясняется тем, что NI PXI-5105 имеет объём памяти, достаточный для набора спектра в течение только 250 мс, для спектрометрического АЦП это время не ограничено.

Рис. 8. Спектр РИ, разряд № 61 625, ОН-нагрев, $n_e = 1,78 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $I_p = 300 \text{ кА}$, $T_e = 1300 \text{ эВ}$: *a* — измерение осциллографическим АЦП; *б* — измерение спектрометрическим АЦП

На рис. 8 и 9 показаны спектры плазмы токамака Т-10 для разряда с омическим нагревом и дополнительным (к омическому) нагревом с помощью вводимой в плазму СВЧ-волны на второй гармонике электронного циклотронного резонанса. Спектры на рис. 8, *a*, 9, *a* и рис. 8, *б*, 9, *б* измерялись разными детекторами. Оба были направлены на центр плазмы.

Рис. 9. Спектр РИ, разряд № 61 629 ЭЦР ($P_{\text{СВЧ}} = 800 \text{ кВт}$) + ОН-нагрев, $n_e = 1,78 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $I_p = 300 \text{ кА}$, $T_e = 2400 \text{ эВ}$: *a* — измерение осциллографическим АЦП; *б* — измерение спектрометрическим АЦП

Наклон спектров, показанных на рис. 8, соответствует электронной температуре $T_e = 1300$ эВ. Аналогичный параметр для спектров на рис. 9 — $T_e = 2400$ эВ.

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ИМПУЛЬСОВ, ИСКАЖЁННЫХ НАЛОЖЕНИЯМИ

Рис. 10. Восстановление искажения наложения: $\times$ — исходный сигнал; — — — — аппроксимация первого импульса; $\diamond$ — скорректированный второй импульс; - - - - - аппроксимация скорректированного второго импульса

Предлагаемый алгоритм расчёта амплитуд импульсов позволяет реализовать восстановление наложенных импульсов, как показано на рис. 10. Для этого сначала определяется амплитуда первого импульса по отсчётам, не искажённым наложениями. После рассчитывается форма этого импульса. Теперь можно выделить влияние первого импульса на последующий, рассчитать неискажённую форму второго импульса и получить неискажённую наложением амплитуду второго сигнала.

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ

Возможно использование двух каналов регистрации сигнала одного детектора с разным временем дифференцирования с целью улучшения показателей спектрометра. Блок-схема показана на рис. 11. Энергетическое разрешение спектров, полученных из сигнала с большим временем дифференцирования («медленный» канал), лучше, чем аналогичный параметр, полученный из сигнала с меньшим временем дифференцирования («быстрый» канал). При возникновении наложений в «медленном» канале обработка будет продолжена с использованием сигнала из «быстрого» канала.

Рис. 11. Использование двух каналов с различным временем дифференцирования

Совершенствование фильтрации шумов при обработке сигнала может улучшить спектрометрические характеристики прибора. При использовании «треугольного» формирования теоретически возможно улучшение энергетического разрешения на 7% по сравнению с Гауссовым формированием, использование «идеального» формирования, которое трудно реализовать на практике, позволит улучшить этот показатель на 12% [3].

Возможна разработка алгоритмов получения спектров в моменты разряда, синхронизированные с данными других диагностик. Для этого потребуется реализовать алгоритмы выделения интересующих нас событий из сигналов, пример которых представлен на рис. 2.

Слабая зависимость фронта импульса от амплитуды позволит исключить из обработки сигналы, время прихода которых отличается на величину, сравнимую с длительностью фронта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод регистрации сигналов полупроводникового детектора рентгеновского излучения осциллографическим аналого-цифровым преобразователем.

Предложен алгоритм получения спектров из зарегистрированных сигналов. Показано, что энергетическое разрешение полученных спектров не хуже, чем в случае использования аналогового канала регистрации.

Показано, что при использовании предлагаемого метода максимальная входная нагрузка детектора может быть в 4 раза выше, чем при использовании канала с аналоговой обработкой сигнала.

Запись информации о моменте прихода каждого рентгеновского кванта позволит получать спектрометрическую информацию о быстропротекающих процессах в плазме, таких, как пилообразные колебания.

Предложен метод восстановления импульсов, искажённых наложениями.

Предложена методика улучшения энергетического разрешения спектрометра за счёт использования нескольких каналов регистрации (с различным временем дифференцирования) сигналов одного детектора.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (контракт № 16.518.11.7004) и Госкорпорации «Росатом» (контракт № Н.4х.45.90.12.1023).

REFERENCES

1. **Luk'yanov S.Yu., Koval'skiy N.G.** Hot plasma and controlled nuclear fusion. — M.: MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 1999. 212 p. (in Russian).
2. **Vol'dset R.** Applied spectrometry of X-ray radiation. Ed. add. (USA, 1977). Transl. from Engl. — M.: Atomizdat, 1977. 192 p. (in Russian).
3. **Baldin S.A., Ioannesyants L.M.** — Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique), 1972, № 1, p. 22 (in Russian).

AUTHORS

Trukhin V.M. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; trukhiv@gmail.com

Ryjakov D.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Shestakov E.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 10 October 2012
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Termoyadernyi sintez, 2013, vol. 36, issue 1, pp. 78—85.