

Цифровой интегратор тока пучка ионов ускорителя ИЛУ-3

В.И. Нуждин, Д.А. Коновалов, В.Ф. Валеев, А.Л. Степанов

Лаборатория радиационной физики, Лаборатория физического приборостроения, Лаборатория нанооптики и наноплазмоники

Сконструирована и внедрена новая версия измерительного комплекса для контроля параметров имплантации ионного ускорителя ИЛУ-3, отличающаяся повышенной точностью, расширенным динамическим диапазоном и высокой чувствительностью.

Введение

Ионный ускоритель ИЛУ-3, входящий в состав научного оборудования Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН (КФТИ), является уникальной экспериментальной установкой, позволяющий легировать и модифицировать структуру различных материалов. Данная установка была введена в эксплуатацию в КФТИ в 1972 году. Она позволяет облучать материалы ионами различных элементов с энергией до 100 кэВ при плотности тока в ионном пучке (J) несколько миллиампер и имплантировать их на глубину образца до 1 мкм. С целью повышения функциональности и удобства использования установки, в предыдущие годы были модернизированы различные конструкционные блоки и системы ИЛУ-3 [1-7]. В предлагаемой статье приведено описание новой модернизации системы контроля основных параметров имплантации (СКПИ) ИЛУ-3, таких как изотопный состав пучка ионов, доза облучения (D) и J . От точности измерения и поддержания этих основных параметров во время имплантации зависит технологическая воспроизводимость процессов обработки материалов потоком заряженных частиц.

Важной частью СКПИ является счетно-измерительный прибор - интегратор. В его функцию входит измерение J и, на основе полученных данных, подсчёт D - количества ионов имплантируемого вещества, попавших на единицу площади мишени. Кроме интегратора в состав СКПИ входит подсистема визуализации ионного спектра на экранах осциллографа и монитора компьютера. Для расширения динамического диапазона интегратора и подсистемы визуализации используется масштабный усилитель постоянного тока (МУПТ).

Прежний интегратор версии 2014 года СКПИ [3, 4] был спроектирован на базе аналогового преобразователя напряжение-частота. Его паспортная погрешность преобразования на краях диапазона рабочих частот достигает 10 %. При этом, для точного подсчета D требовалось вынужденно работать только в узких диапазонах значений J . МУПТ был сконструирован с использованием ультрапрецизионных операционных усилителей OP177. Данный интегратор хорошо себя зарекомендовал в постоянной практике проведения ионной имплантации. Однако, он характеризуется определенными недостатками. В частности, при больших коэффициентах усиления МУПТ на его выходе присутствует постоянное напряжение смещения, которое вносит дополнительную погрешность в измерения J . Для передачи ряда параметров ионной имплантации в процессе облучения на компьютер, а также для дополнительной обработки и параллельной цифровой визуализации, был использован внешний промышленный модуль ввода/вывода.

С целью существенного улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик СКПИ было разработано и создано новое устройство – цифровой интегратор, описываемый в настоящей статье.

Система контроля основных параметров имплантации ИЛУ-3

На рис. 1 и 2 приведены структурная схема и фотография СКПИ ИЛУ-3, соответственно. В состав СКПИ входят цифровой интегратор (рис.2, 1), устройства визуализации – аналоговый осциллограф (рис.2, 2) и персональный компьютер. На дисплее цифрового интеграторы высвечиваются числовые значения J (мкА) и D (мкКл). Цифровой интегратор оснащен несколькими аналоговыми входами, на которые подаются постоянные и переменные сигналы от различных устройств и контрольных точек ионного ускорителя, несущие информацию об основных параметрах имплантации. После необходимых аналоговых преобразований, таких как инверсия, сдвиг уровня и масштабирование, измеряемые сигналы подвергаются аналого-цифровому преобразованию. Вся дальнейшая обработка данных и передача их на компьютер осуществляется в цифровом формате.

На мониторе персонального компьютера средствами прикладного программного обеспечения (ППО) реализованы виртуальная лицевая панель цифрового интегратора и окно виртуального осциллографа (рис. 2, 3). На виртуальной панели ППО отображаются значения J и счетчика D из внутренних регистров цифрового интегратора. Там же дублируются положения органов управления интегратора. В окне виртуального осциллографа в режиме XY в реальном времени отображаются массивы значений J и пилообразного напряжения развертки пучка ионов.

Средствами ППО осциллограмму можно масштабировать по осям X и Y, а также сглаживать с помощью настраиваемого цифрового фильтра. В настоящее время ведется работа по интеграции данного ППО с программой расчет ионного спектра и тока магнитного сепаратора ИЛУ-3. Рабочее окно этой программы показано на рис. 2 и обозначено цифрой 4. Как пример, на нем смоделирован ионный спектр для имплантируемого элемента Ag. Реальный спектр этого элемента можно видеть на экране осциллографа (рис. 2, 2).

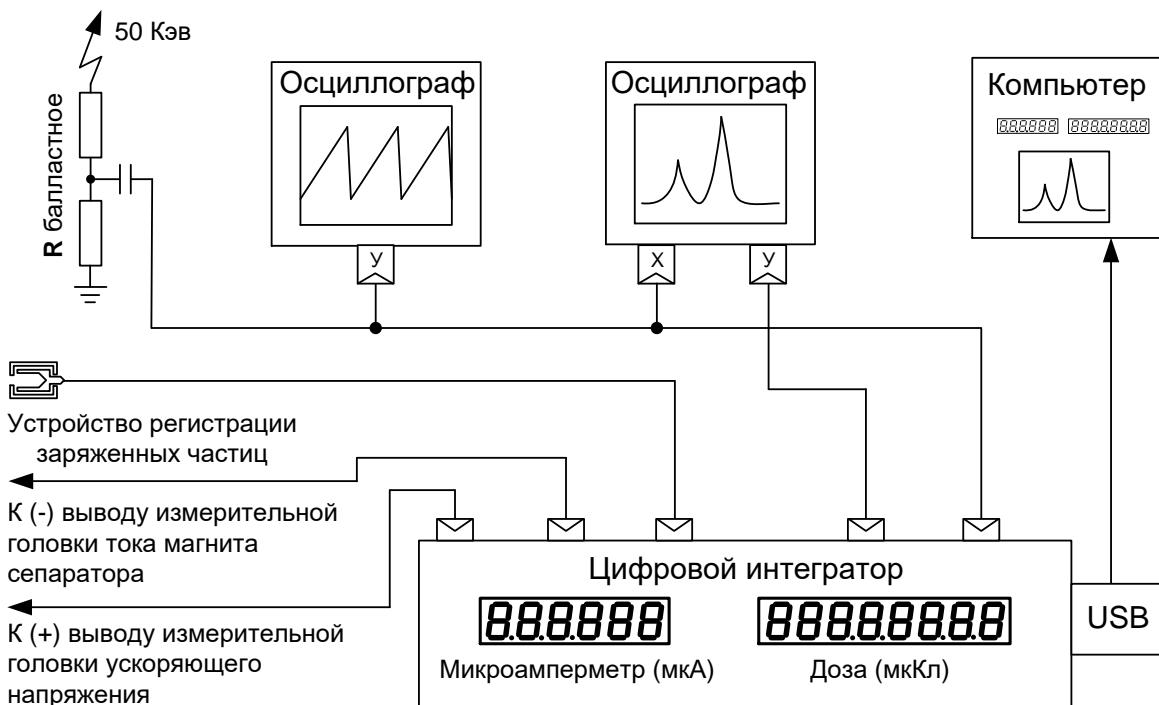


Рис. 1. Структурная схема СКПИ ИЛУ-3.



Рис. 2. Система контроля основных параметров имплантации ИЛУ-3: (1) цифровой интегратор, (2) осциллограф С1-83, (3) окно ППО СКПИ и (4) окно программы расчета ионного спектра.

Конструкция цифрового интегратора

На рис. 3 приведена структурная схема цифрового интегратора. Основой цифрового интегратора является микроконтроллерный модуль на базе процессора STM32F303. Он функционирует под управлением оригинального специального программного обеспечения (СПО), называемого прошивкой, разработанного на языке Си в среде программирования Keil на базе шаблона, созданного с помощью утилиты STM32CubeMX. СПО реализует несколько виртуальных измерительных каналов: интегрального и мгновенного значения J , мгновенного значения напряжения развертки, значений ускоряющего напряжения и тока магнитного сепаратора. Кроме этого опрашивается положение органов управления лицевой панели прибора.

Сигнал с устройства регистрации заряженных частиц подаётся на вход повторителя, имеющего большое входное сопротивление. К выходу повторителя подключаются входы двух масштабных усилителей постоянного тока (МУПТ), коэффициенты усиления которых переключаются синхронно. Один из МУПТ подключен непосредственно к выходу повторителя и используется для усиления в канале измерения мгновенного значения J . Другой МУПТ подключен к выходу повторителя через интегрирующую RC цепочку и используется для усиления в канале измерения интегрального значения J . Переключение коэффициентов усиления МУПТ производится электронными ключами, управляемыми с помощью галетного переключателя, расположенного на передней панели интегратора. Структурно МУПТ состоит из трех, последовательно соединенных, идентичных каскадов на операционных усилителях типа «Zero-Drift». Технология «Zero-Drift» обеспечивает автоподстройку нулевого смещения [8]. При замкнутом электронном ключе коэффициент усиления одного каскада равен 10. Если ключ разомкнут, то каскад превращается в повторитель. Такая архитектура построения МУПТ выработана в результате многочисленных макетных экспериментов и обеспечивает максимальную помехозащищенность канала управления усилением, а также пренебрежимо малое смещение нулевого уровня на выходе даже при 1000 кратном усилении.

Напряжение, пропорциональное интегральному значению J , измеряется микросхемой АЦП ADS1220 с разрядностью 24 бит. Средствами СПО реализовано программное преобразование напряжение – частота. На выходах таймеров TIM8 и TIM2 формируются сигналы в форме меандра с частотами, пропорциональными J . При разработке цифрового интегратора была достигнута линейность преобразования напряжение – частота в диапазоне пять десятичных разрядов. А именно, при изменении напряжения на входе преобразователя от 0 до 1 В, частота на выходе преобразователя линейно изменяется от 0 до 100 кГц с шагом не более 1 Гц.

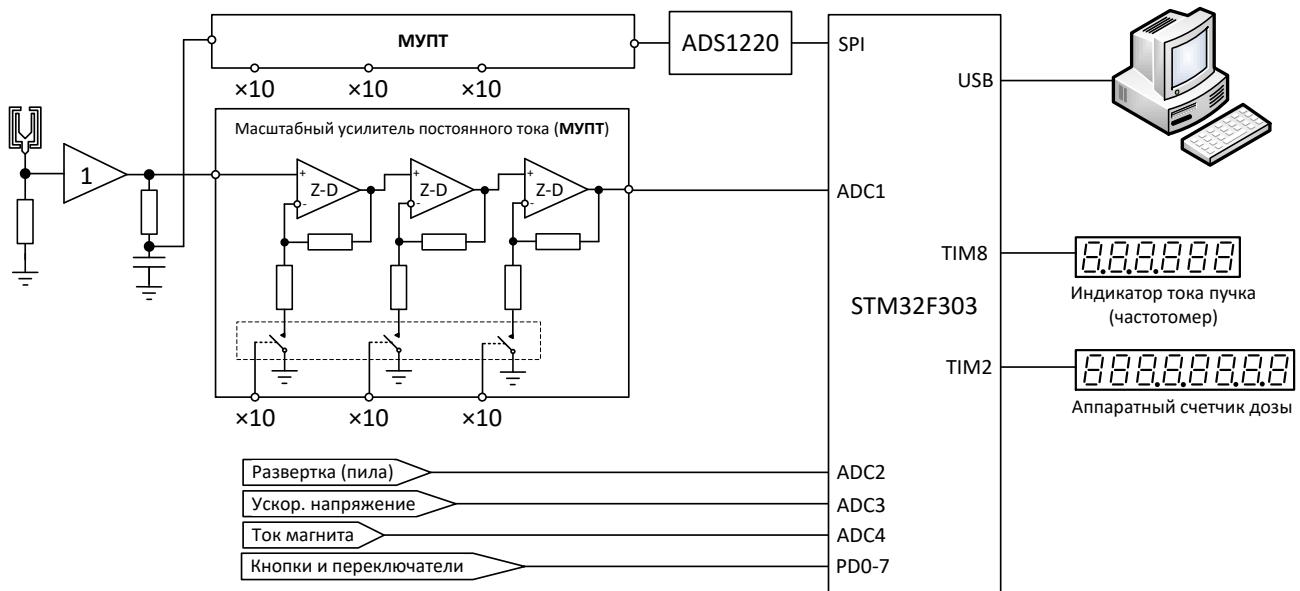


Рис. 3. Структурная схема цифрового интегратора.

Значения параметров, измеренные в виртуальных каналах, содержимое внутренних регистров, дублирующих аппаратный счетчик D и положение органов управления лицевой панели в масштабе реального времени передаются по интерфейсу USB в компьютер.

Цифровой интегратор выполнен в отдельном металлическом корпусе, изготовленном на оборудовании экспериментальной мастерской КФТИ. На фотографии рис. 2 он обозначен цифрой 1. На лицевой панели интегратора расположены светодиодные индикаторы J и D пучка ионов, галетный переключатель диапазонов измерения тока, кнопки и переключатели. Индикаторы J и D пучка ионов являются отдельными малогабаритными законченными устройствами, собранными на микросхемах, ранее показавших высокую надежность и помехозащищенность.

Технические данные:

- Диапазоны измерения J , мкА/см² – 0,1/ 1/ 10/ 100
- Количество разрядов индикации J – 6
- Диапазон измерения D , мкКл/см² – 0,00001 – 9999999,9
- Количество разрядов индикации D – 8
- Интерфейс связи с компьютером – USB класс CDC.

Выводы

Сконструирована и внедрена новая версия СКПИ ИЛУ-3. Основой СКПИ является оригинальный цифровой интегратор, обладающий, по сравнению с предыдущей конструкцией, повышенной в несколько раз точностью и увеличенными на порядок динамическим диапазоном и чувствительностью. Моноблочная конструкция интегратора увеличила помехозащищенность измерительного тракта. Новая каскадная архитектура масштабных усилителей постоянного тока демонстрирует пренебрежимо малое смещение нулевого уровня на выходе даже при 1000 кратном усилении сигнала J .

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках Госзадания для Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук».

Литература

1. В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Д. А. Коновалов, В. Ю. Петухов. ПТЭ № 5, 136 – 139 (2011)
2. В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Д. А. Коновалов, Г. Г. Гумаров. ПТЭ. № 6, 112–116 (2014)
3. В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Д. А. Коновалов. КФТИ им. Е.К. Завойского 2014, Ежегодник. 70-73 (2015)
4. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Воробьев В.В., Рогов А.М.: Формирование слоев пористого кремния и германия с металлическими наночастицами. Казань: ФИЦПРЕСС, 2019
5. В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Д. А. Коновалов. КФТИ им. Е.К. Завойского 2014, Ежегодник. 74-75 (2015)
6. В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Д. А. Коновалов. КФТИ им. Е.К. Завойского 2016, Ежегодник. 68-70 (2017)
7. В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Д. А. Коновалов. КФТИ им. Е.К. Завойского 2017, Ежегодник. 101-104 (2018)
8. A. Assim, E.V. Balashov. Computing, Telecommunications and Control **14** No.3 64-74 (2021)