


УТВЕРЖДАЮ
Декан ЭФФ


Г.С. Евтушенко
« 20 » ноября 2008 г.

Н.Н. Коваль

ИЗУЧЕНИЕ ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЫ

Методические указания к выполнению
лабораторных работ по курсу «Плазменные технологии»
для магистрантов, обучающихся по магистерской программе 210106
«Физическая электроника» направления 210100
«Электроника и микроэлектроника»

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 539.211(07)
ББК 22.37я73
К56

Коваль Н.Н.

К56 Изучение эмиссионных свойств плазмы: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Плазменные технологии» для магистрантов, обучающихся по магистерской программе 210106 «Физическая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» / Н.Н. Коваль. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 32 с.

ISBN 5-98298-386-1


УДК 539.211(07)
ББК 22.37я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
сильноточной электроники ЭФФ
«1» сентября 2008 г.

Зав. кафедрой СЭ
член-корреспондент РАН


Н.А. Ратахин

Председатель учебно-методической
комиссии


А.Н. Гормаков

Рецензент

Ведущий научный сотрудник ИСЭ СО РАН г. Томска
Ю.Ф. Иванов

ISBN 5-98298-386-1

© Коваль Н.Н., 2008
© Томский политехнический университет, 2008
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Принцип генерации электронного пучка в системе с плазменным катодом	4
2. Блок-схема лабораторной установки	5
2.1. Конструкция установки	5
2.2. Конструкция электронного источника на основе плазменного эмиттера с сеточной стабилизацией границы плазмы и состав стойки с блоками питания источника	7
2.3. Система газового питания электронного источника	10
2.4. Блок схема вакуумной системы	11
2.5. Активные датчики вакуума (поз. 20 блок схемы установки (рис. 2))....	11
2.5.1. Датчик АТВ-2.....	11
2.5.2. Датчик АИВ-51	12
2.6. Стойка управления установкой.....	13
2.6.1. Состав стойки управления	13
2.6.2. Программное обеспечение.....	14
3. Параметры установки и диапазон их изменения	16
4. Методика исследования временных, вольтамперных, газовых и энергетических характеристик электронного источника	17
4.1. Контроль и измерение токов в цепях электронного источника	17
4.2. Контроль ускоряющего напряжения	17
4.2.1 Измерение энергии электронного пучка	18
4.2.2. Методика измерения сопротивления.....	19
4.2.3. Методика определения плотности энергии.....	19
5. Описание измерительной аппаратуры и методики работы на ней	20
5.1. Контроль импульсных сигналов в цепях электронного источника	20
5.1.1. Использование запоминающего осциллографа	20
5.2. Использование калориметра.....	20
5.2.1. Пошаговая инструкция работы с калориметром	21

1. ПРИНЦИП ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СИСТЕМЕ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ

Принцип генерации электронного пучка в источнике на основе плазменного эмиттера с сеточной стабилизацией границы плазмы иллюстрирует рис. 1. Источником электронов в таком источнике служит плазма, генерируемая импульсным контрагированным дуговым разрядом низкого давления. Газоразрядная система электронного эмиттера состоит из катодной ячейки с Mg катодом и полого анода большой площади. Торец полого анода, выполненный в виде мелкоструктурной металлической сетки (размер ячеек $\sim 0,3 \times 0,3$ мм), выполняет роль эмиссионной поверхности. Дуговой разряд зажигается между катодом и полым анодом через контрагирующий канал и горит преимущественно на сетку эмиссионного электрода, что обеспечивает высокий коэффициент извлечения (отношение амплитуды тока извлеченного электронного пучка к току разряда близкое к единице). Устойчивое зажигание и горение разряда в дуговой форме определяется наличием магниевого катода, на котором при зажигании разряда возникает катодное пятно, существующее в течение всего импульса горения разряда.

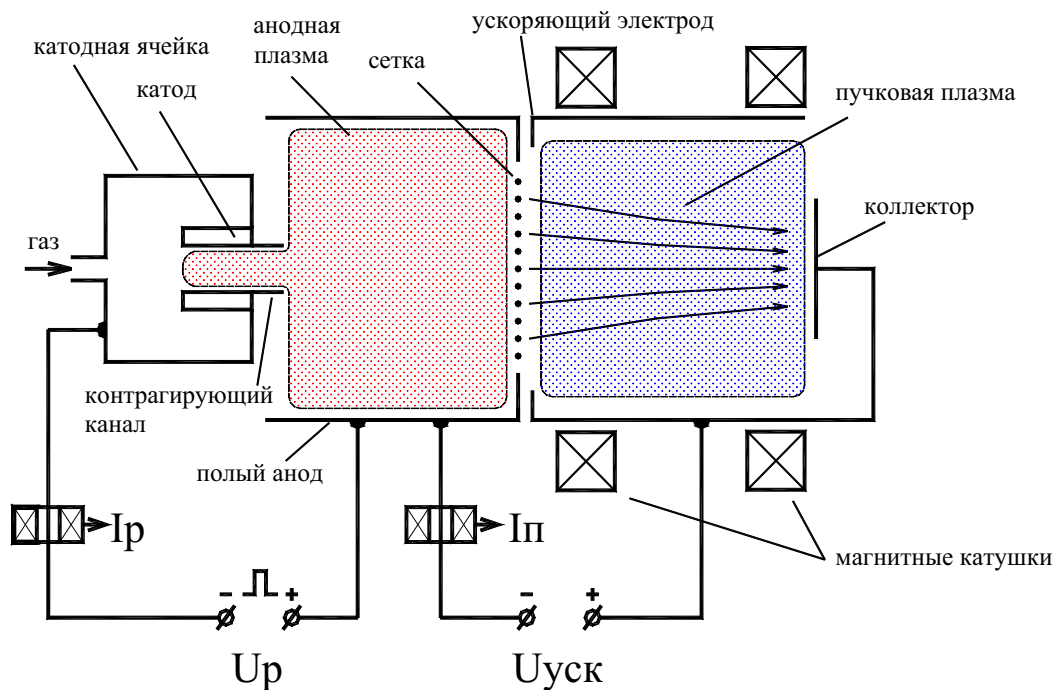


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Высокое постоянное напряжение прикладывается между сетчатым электродом и ускоряющим электродом, выполненным в виде диафрагмы. Под действием постоянного ускоряющего напряжения происходит извлечение электронов из плазмы через ячейки сетки и ускорение их до энергии, соответствующей приложенному напряжению. Сетка формирует и стабилизирует границу плазмы, позволяя получать пучок с относительно однородным распределением плотности эмиссионного тока. Извлеченные из плазмы и ускоренные до энергии, соответствующей приложенному высокому ускоряющему напряжению, электроны производят ионизацию газа в ускоряющей промежуточной и дрейфовой областях, создавая пучковую плазму. Таким образом, через время порядка нескольких микросекунд в электронном источнике реализуется система, состоящая из катодной плазменной эмиссионной поверхности, стабилизированной сеткой, и плазменного анода с подвижной плазменной границей, которая устанавливается в соответствии с законом “степени трех вторых” для ионного тока в ускоряющей промежуточной области. Эмитированные плазменным катодом электроны ускоряются электрическим полем в слое между катодной и анодной плазмами и попадают в пространство дрейфа, где происходит компенсация пространственного заряда пучка ионами, образовавшимися в результате ионизации газа. Для стабилизации электронного пучка в ускоряющей промежуточной и дрейфовой областях, вся система помещена в продольное магнитное поле, создаваемое магнитными катушками. Диагностика импульсных токов, I_p (ток разряда) и I_n (полный ток пучка) электронного источника, осуществляется с помощью поясов Роговского, установленных в соответствующих цепях электронного источника.

2. БЛОК-СХЕМА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

2.1. Конструкция установки

Блок-схема лабораторной установки приведена на рис. 2. В состав установки входят следующие основные блоки:

- Электронный источник.
- Система газового питания электронного источника.
- Вакуумная камера с системой откачки на основе турбомолекулярного насоса.
- Активные датчики вакуума на основе термопарных (ПМТ-2) и ионизационного (ПМИ51) манометрических преобразователей.
- Двухкоординатный манипулятор для перемещения образцов деталей в вакуумной камере.

Рис.

- Стойка управления установкой, на основе персонального компьютера (ПК), специализированных контроллеров (на основе микроконтроллеров (МК)) и силовых управляющих элементов.
- Стойка с блоками питания (БП) электронного источника состоящая из схем питания разрядов, блоков питания соленоидов, высоковольтного источника ускоряющего напряжения. Работа БП происходит под управлением специализированного контроллера на основе МК.

2.2. Конструкция электронного источника на основе плазменного эмиттера с сеточной стабилизацией границы плазмы и состав стойки с блоками питания источника

Газоразрядная система плазменного эмиттера состоит из двух взаимосвязанных систем. Первая система, образованная полым электродом 1 и катодом 3, составляет систему иницирующего разряда, функционирующего при относительно высоком (~ 1 Па) давлении в течение относительно короткого (до 25 мкс) промежутка времени. Повышенное давление в системе иницирующего разряда обеспечивается за счет напуска в нее рабочего газа (Ar) через систему газового питания (блоки 17, 18 – газовый баллон с редуктором и газовый натекатель). Для снижения напряжения зажигания иницирующего разряда цилиндрический электрод 1 с внутренним диаметром 10 мм и длиной 50 мм помещен в магнитное поле с индукцией 0,1 Тл постоянных кольцевых магнитов 2. При включении транзисторного ключа ТК1 (стойка БП), к первичной обмотке высоковольтного разделительного трансформатора TR1 через балластное сопротивление R1 подключается блок накопительных емкостей, выбранных таким образом, чтобы за время формирования импульсов разрядных токов напряжение на них изменялось незначительно. Иницирующий разряд зажигается первоначально в тлеющем режиме при подаче со вторичной обмотки TR1 импульса напряжения с амплитудой около 12–15 кВ. Длительность импульса тока иницирующего разряда, имеющего амплитуду (10–15) А, определяется временем открытого состояния ключа ТК1 и составляет около 25 мкс. Через (10–15) мкс после подачи напряжения на иницирующий разряд производится подача напряжения на основную разрядную систему. Основной дуговой разряд с регулируемой длительностью (50–200) мкс, определяемой временем открытого состояния ключа ТК2, зажигается между электродом 3 и полым анодом 6 через контрагирующий канал 5 в электроде 3 с последующим переключением разряда на сетчатый эмиссионный электрод 7. Переключение разряда обеспечивается за счет включения в цепь электрода 6 сопротивления $R_a = (10–100)$ Ом. Устойчивое

зажигание основного разряда, даже при относительно низком приложенном напряжении (≥ 100 В), определяется наличием плазмы, созданной иницирующим разрядом и выбором полярности напряжения на первой разрядной системе. При указанной полярности, электрод 3 выполняет роль полого катода как для иницирующего, так и для основного разряда.

Устойчивое зажигание и горение основного разряда в дуговой форме определяется наличием дополнительного магниевого электрода 4, на котором возникает катодное пятно уже при зажигании иницирующего разряда. Регулировка тока основного разряда осуществляется за счет наличия балластного сопротивления R_2 и изменения напряжения на блоке накопительных конденсаторов, заряжаемых от регулируемого стабилизатора напряжения SU. Для создания перепада давлений между двумя разрядными системами, служащего для облегчения зажигания иницирующего разряда и снижения давления в ускоряющем промежутке, связь между ними осуществляется через малый, диаметром 6 мм контрагирующий канал 5.

Электрод 7, имеющий эмиссионное отверстие диаметром (40–50) мм, затянутое мелкоструктурной эмиссионной сеткой с прозрачностью (50–60) %, установлен на торце полого анода диаметром 80 мм и длиной 100 мм.

Высокое постоянное напряжение (5÷25) кВ прикладывается между электродом 7 и ускоряющим электродом 8, расположенным от него на расстоянии (8–10) мм и выполненным в виде диафрагмы диаметром 80 мм. Источник высокого напряжения (22), обеспечивает режим работы с частичным разрядом накопительных емкостей $C_{н1}$ и $C_{н2}$, зарядка которых происходит через зарядное сопротивление $R_3 = 1$ кОм, а разряд – через балластное сопротивление $R_6 \approx 1$ Ом. Под действием постоянного ускоряющего напряжения происходит извлечение электронов из плазмы через ячейки сетки и ускорение их до энергии, соответствующей приложенному напряжению. Номинал емкостей $C_{н1}$, $C_{н2}$ выбирается таким образом, чтобы уменьшение напряжения на ней при формировании импульса тока пучка, было незначительным. Это позволяет генерировать пучок с малым энергетическим разбросом ускоренных электронов. Элементы $C_{н1}$, $C_{н2}$, R_3 и R_6 вынесены из стойки БП электронного источника и образуют блок накопительных емкостей 19.

Сетка формирует и стабилизирует границу плазмы, позволяя получать пучок с относительно однородным распределением плотности эмиссионного тока. Извлеченные из катодной плазмы и ускоренные электроны производят ионизацию газа в ускоряющем промежутке и пространстве дрейфа. Плазма, возникающая в дрейфовой трубе в результате ионизации газа элек-

тронным пучком, приобретает потенциал близкий к потенциалу анода. Таким образом, в газонаполненном диоде через некоторое время $\tau = (3 \div 5)$ мкс реализуется система, состоящая из катодной плазменной эмиссионной поверхности, стабилизированной сеткой, и плазменного анода с подвижной плазменной границей, которая устанавливается в соответствии с законом “степени трех вторых” для ионного тока в ускоряющей промежутке. Эмитированные плазменным катодом электроны ускоряются в слое между катодной и анодной плазмами и попадают в пространство дрейфа, где происходит компенсация пространственного заряда пучка ионами, образовавшимися в результате ионизации газа.

В условиях компенсации пространственного заряда пучка может происходить его сжатие собственным магнитным полем. Для стабилизации электронного пучка в ускоряющей промежутке и дрейфовом пространстве, вся система помещена в продольное магнитное поле, создаваемое импульсными магнитными катушками. Катушки 10 расположены на верхней и нижней части вакуумной камеры 12 вне откачиваемого объема рабочей камеры и создают продольное магнитное поле величиной до $B = 0,05$ Тл в области формирования и транспортировки электронного пучка. До момента ввода в рабочую камеру пучок транспортируется в металлической трубе дрейфа 9 диаметром 82 мм и длиной 200 мм, в цепь которой может включаться дополнительное сопротивление $R_d = (0-2)$ Ом. На торце трубы 9 может быть установлена диафрагма 11. Пучок после транспортировки попадает на рабочий стол 13 манипулятора 14. Передвижение стола манипулятора осуществляется шаговыми двигателями 15, расположенными вне вакуумной камеры. Диагностика импульсных токов электронного источника осуществляется с помощью поясов Роговского, установленных в соответствующих цепях электронного источника. Блок термисторов (калориметр) 16 используется в случае проведения измерений энергии пучка или измерения распределения энергии пучка по его сечению.

Использование импульсного питания катушек магнитного поля от управляемых стабилизированных источников тока ST1, ST2 позволило устранить нагрев соленоидов и увеличить максимальные значения магнитного поля по сравнению с вариантом питания соленоидов постоянным током. Так как источники ST1, ST2 включаются до подачи напряжений на разрядную систему, то в момент генерации тока электронного пучка магнитное поле уже достигает установленного значения и остается практически неизменным в течение всего импульса тока пучка.

Использование в схемах питания разрядов и магнитного поля в качестве коммутирующих элементов IGBT-транзисторов позволяет оперативно и в широких пределах изменять амплитуду разрядного тока (и таким образом регулировать ток электронного пучка) и, управляя транс-

портирующим магнитным полем, варьировать диаметр пучка. Таким образом, разработанные принципы и методы управления электропитанием позволяют максимально реализовать основные достоинства источника на основе плазменного эмиттера с сетчатой стабилизацией эмиссионной границы – возможность в широком диапазоне и независимо изменять длительность импульсов тока пучка без механических переключений элементов схемы блоков электропитания, ток пучка, энергию ускоренных электронов и частоту следования импульсов.

Управление всеми составными частями БП производится управляющим блоком на основе микроконтроллера 23, допускающего как автономную работу, так и работу под управлением ПК. На передней панели блока расположены органы управления и LCD-дисплей, на котором отображаются установленные параметры и ход выполнения заданной программы обработки образцов. Блок контроллера включает в себя интерфейс RS485, что дает возможность организовать связь между микроконтроллером и персональным компьютером. В автономную программу контроллера заложена возможность выполнения программы обработки, состоящей из двух стадий с независимой установкой для каждой стадии всех параметров. Использование внешнего управляющего ПК(24) позволяет автоматизировать работу установки. Управление всеми режимами установки производится с консоли оператора (экран ПК). Так, например управление процессом получения рабочего вакуума в циклах «открытие камеры» – «откачка» осуществляется при помощи 2-х клавиш консоли оператора (25-26).

2.3. Система газового питания электронного источника

Система газового питания электронного источника состоит из газового баллона (Ar), газового редуктора и газового натекателя РРГ-10. Максимальный расход газа обеспечиваемый управляемым газовым натекателем при максимальном сигнале управления 5 В – не менее 0,36–0,9 л/час. Максимальное допустимое избыточное давление на входе регулятора 0,3 МПа. Питание регулятора ± 15 В (ток не менее 0,2 А при пульсациях менее 20 мВ) и формирование сигнала управления (0–5В) обеспечивается блоками стойки управления. Выход натекателя РРГ-10 соединен с электронной пушкой токонепроводящей трубкой. Внутри газовой трубки помещается песок для предотвращения возникновения газового разряда по разряженному газу при подаче на электронную пушку ускоряющего напряжения.

2.4. Блок схема вакуумной системы

Блок схема вакуумной системы представлена на рис. 3.

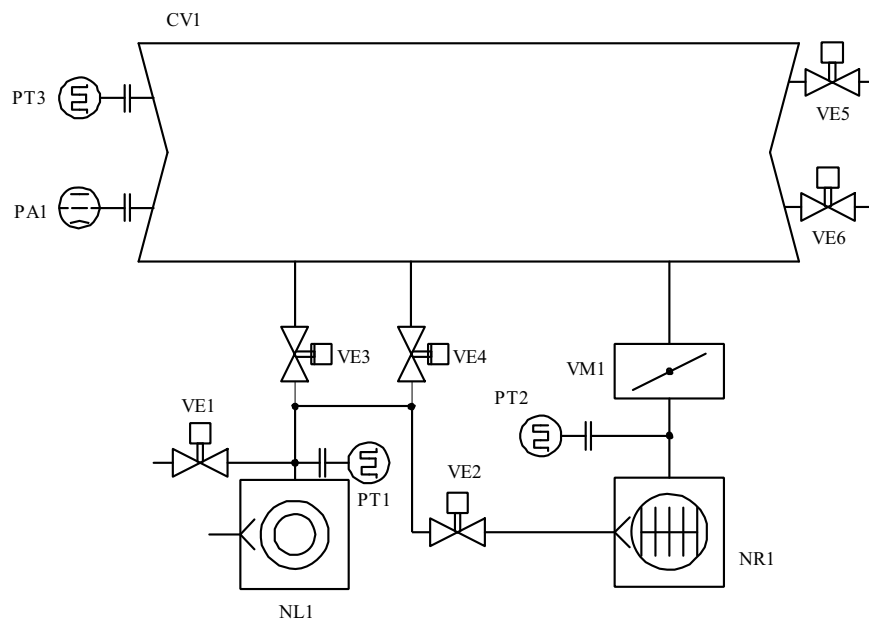


Рис. 3. Схема вакуумной откачки:

CV1 – вакуумная камера; NL1 – насос форвакуумный; NR1 – насос вакуумный, турбомолекулярный; VM1 – затвор вакуумный с электромеханическим приводом 23ВЭ; VE1, VE2, VE3, VE4 – клапаны вакуумные с электромагнитным приводом КВУМ-25; VE5 – клапан напуска воздуха КВУМ-16; VE6 – управляемый газовый натекатель РРГ-10; PT1, PT2, PT3 – лампа манометрическая термопарная ПМТ-2; PA1 – лампа манометрическая, ионизационная ПМИ-51

2.5. Активные датчики вакуума (поз. 20 блок схемы установки (рис. 2))

В установке используются два типа активных датчиков вакуума (вакуумметры АТВ-2 и АИВ-51). Датчики выполнены на основе МП и размещаются непосредственно на манометрических преобразователях, установленных на узлах вакуумной системы.

2.5.1. Датчик АТВ-2

Датчик АТВ-2 предназначен для построения автоматизированных систем измерения давления газа совместно с преобразователем манометрическим термопарным ПМТ-2 в диапазоне давлений от 130 Па до 0.13 Па. Вывод измеренных значений и управление вакуумметром осуществляется по последовательному каналу RS-485 с использованием помехозащищенного протокола обмена. Также предусмотрен аналоговый выход соответствующий измеренному значению давления. Вакуумметр АТВ-2 обеспечивает все необходимые режимы работы датчика ПМТ-2 в соответствии с его техническими и электрическими характери-

стиками. Измерение давления производится путем считывания напряжения термопары лампы при фиксированном токе нагрева подогревателя лампы.

Технические и функциональные характеристики АТВ-2

- Напряжение питания – +12В (–20 % + 10 %).
- Потребляемый ток – не более 300 Ма.
- Последовательный канал обмена и управления – RS485:
- Скорость 9600 бод, 8 бит в байте, 1 стоповый бит, проверка на четность – нет.
- Точность измерения напряжения термопары не хуже – 50 мкВ.
- Дискретность измерения напряжения термопары не хуже 20 мкВ.
- Аналоговый выход (Aout): 0–5В, линейно соответствует напряжению на термопаре (U): 0–10 мВ. При этом $U = K \cdot A_{out}$, где $K = 0,002$. Максимальный ток аналогового выхода – 1мА.
- Измерение напряжения питания устройства.
- Светодиодная индикация режима работы: горит – нормальный режим работы, мигание – отсутствует ток накала нагревателя лампы.

2.5.2. Датчик АИВ-51

Датчик АИВ-51 предназначен для построения автоматизированных систем измерения давления газа совместно с преобразователем манометрическим ионизационным ПМИ-51 в диапазоне от 10 Па до 0.001 Па. Вывод измеренных значений и управление вакуумметром осуществляется по последовательному каналу RS-485 с использованием помехозащищенного протокола обмена. Вакуумметр АИВ-51 обеспечивает все необходимые режимы работы датчика ПМИ-51 в соответствии с его техническими и электрическими характеристиками.

Измерение давления производится путем считывания ионного тока при фиксированном токе эмиссии катода лампы. Давление газа p является функцией ионного тока I . Кривая преобразования $p = f(I)$ приводится для воздуха:

- в диапазоне давлений 0,001 – 0,02 Па используется постоянная преобразования $K = 6 \times 10^4$ (Па/А). Погрешность преобразования составляет –20 % – +20 %.
- в диапазоне давлений 0,02–10 Па используется типовая градуировочная характеристика манометрического преобразователя. Погрешность измерения давления при этом –30 % – +30 %.

При измерении давления в других газах необходимо знать поправочный коэффициент соответствия воздуху.

Технические и функциональные характеристики АИВ-51

- Напряжение питания – +12В (–10 % + 10 %).
- Порешаемый ток – не более 750 мА
- Последовательный канал обмена и управления – RS485.
- Скорость 9600 бод, 8 бит в байте, 1 стоповый бит, проверка на четность – нет.
- Пределы измерения ионного тока – 10 нА – 300 мкА.
- Точность измерения ионного тока – не хуже 5 % от измеренной величины.
- Защитное выключение накала катода при давлении более – 8 Па (изменяется программно).
- Полоса низкочастотной фильтрации измеренного сигнала ионного тока – 640 Гц – 0.1 Гц (изменяется программно).
- Измерение напряжения питания устройства.
- Светодиодная индикация режима работы: горит – нормальный режим работы, мигание – отсутствует ток эмиссии.

Внимание: напряжение на аноде лампы ПМИ-51 составляет +250В, необходимо избегать прикосновения к токопроводящим элементам на лампе при включенном устройстве.

2.6. Стойка управления установкой

Управление установкой осуществляется со стойки управления. Конструктивное исполнение стойки – стандарт 19-дюймов. На передней панели стойки находятся ключ-бирка (включение сети стойки), индикатор «СЕТЬ», кнопка аварийной остановки, откидывающаяся панель с мини клавиатурой и манипулятором «мышь». На верхней части стойки установлен индикатор режимов установки – «Маячок», имеющий 3 различных по цвету светящихся сегмента. В зависимости от режима работы установки включается соответствующая световая индикация.

2.6.1. Состав стойки управления

Состав стойки управления

- Система управления выполняется на базе не промышленного персонального компьютера (ПК) в корпусе стандарта 19" с 17" ЖК монитором, в качестве органов управления используется резистивный сенсорный экран. Дополнительно возможно использование клавиатуры и манипулятора «мышь».
- Преобразователь интерфейсов (RS-232 – RS-485) обеспечивает связь ПК с контроллерами стоки управления.

- Контроллер вакуумной системы обеспечивает:
 - управление двигателем форвакуумного насоса 2НВР-5Д;
 - управление двигателем турбомолекулярного насоса ТМН-500 (маслонасос и основной двигатель питаются от преобразователей частоты (ПЧ) CF23-05);
 - управление двигателем вакуумного затвора (через ПЧ типа DFE-01);
 - управление вакуумными клапанами (КВУМ-М);
 - управление световым индикатором режимов работы установки («маячок»);
 - опрос состояния датчиков системы (датчик воды ТМН, датчик воды стола манипулятора, датчик двери вакуумной камеры, датчик защитного кожуха электронного источника, датчик работы масла насоса, контроль срабатывания вакуумных клапанов);
 - управление газовым натекателем (формированием сигналов управления натекателем).
- Контроллер движения обеспечивает через драйверы ШД управление шаговыми двигателями двухкоординатного манипулятора.
- Контроллер калориметра подключается к порту RS-232 ПК и обеспечивает работу с блоком термисторов при калориметрических измерениях параметров электронного пучка.
- PCI платы АЦП (НВЛ45) устанавливаемые в ПК используются для осциллографического контроля и измерения импульсных токов электронного источника. В случае использования двух плат возможна одновременная регистрация четырех независимых каналов. Контроль над работой электронного источника может осуществляться также с помощью внешнего 4-х канального осциллографа (возможный тип TDS-224, TDS-2014) или 2-х канального (TDS-220 или подобного).
- Программное обеспечение ПК обеспечивает опрос состояния и управление всеми составными частями стойки управления и установки в целом.

2.6.2. Программное обеспечение

Управление работой установки происходит под контролем программы, запущенной в среде Windows XP. Программа имеет три рабочих окна, выбираемых в зависимости от выполняемой операции. На рис. 4. представлено первое окно программы «вакуумная система». В этом окне программа позволяет работать как в режиме автоматической откачки вакуумной системы (кнопки «откачка» «напуск»), так и в ручном. В ручном ре-

жиме программа производит блокирование ошибочных действий оператора. После получения вакуума окно «вакуумная система» используется для включения освещения в камере и для задания необходимого расхода рабочего газа (до заданного давления A_g в камере). При переходе к окну программы «электронный источник» (рис. 5.) оператор задает параметры работы электронного источника. Окно управляющей программы «манипулятор» (рис. 5) служит для управления 2-координатным манипулятором.

При проведении калориметрических измерений используется специальная программа, обслуживающая контроллер калориметра (рис. 6).

Для настройки активных датчиков используется сервисная программа для калибровки ионизационных и термопарных вакуумметров.

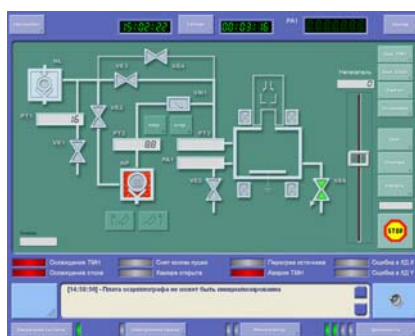


Рис. 4. Окно управляющей программы «вакуумная система»

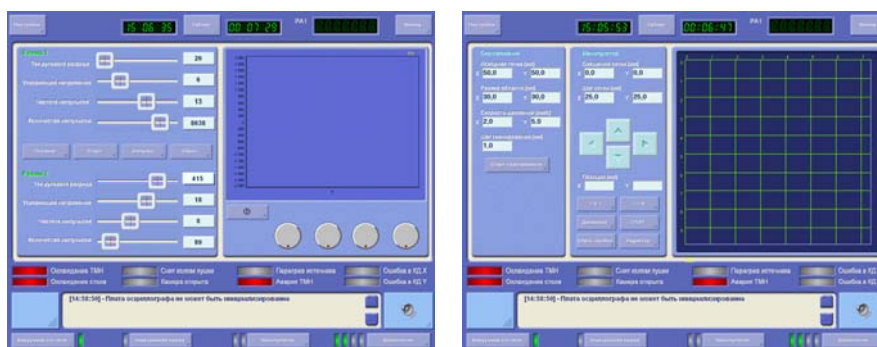


Рис. 5. Окна управляющей программы «электронный источник» и «манипулятор»

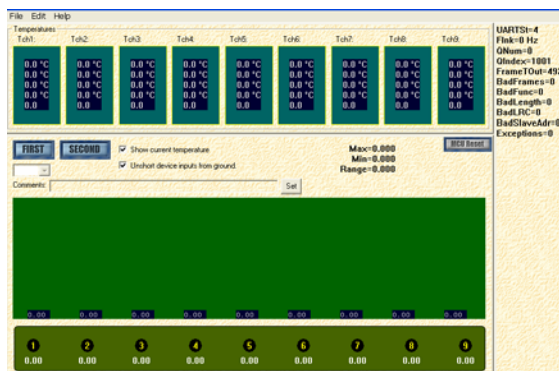


Рис. 6. Основное окно управляющей программы калориметра

3. ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВКИ И ДИАПАЗОН ИХ ИЗМЕНЕНИЯ

- Размер установки – $2,15 \times 1,3 \times 2,0$ м
- Номинальное напряжение сети трехфазного тока 50 Гц – 380 В
- Максимальная потребляемая мощность – 2 (12 кВт*)
- Расход воды (охлаждение ТМН и манипулятора) не более – 150 л/час
- Размеры рабочей камеры – $600 \times 500 \times 400$ мм
- Предельное давление в вакуумной камере – $(2-3) \cdot 10^{-3}$ Па
- Рабочее давление в вакуумной камере – $(1-5) \cdot 10^{-2}$ Па
- Рабочий газ – Ar
- Длительность цикла откачки (не более) – 20 минут
- Рабочий ход манипулятора
(размер области сканирования) – 180×180 мм
- Ускоряющее напряжение – 5–20 кВ
- Длительность импульсов тока пучка – 50М200 мкс
- Частота повторения импульсов тока пучка, f – 0,3–10 Гц
- Амплитуда тока электронного пучка – 20–200 А,
(до 30 А при $f = 10$ Гц)
- Диаметр пучка (на обрабатываемых образцах) – 1–3 см
- Величина магнитного поля в области
транспортировки пучка – (0,005–0,05) Тл

4. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ, ВОЛЬТАМПЕРНЫХ, ГАЗОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННОГО ИСТОЧНИКА

4.1. Контроль и измерение токов в цепях электронного источника

Электронный источник, используемый в установке, генерирует импульсный электронный пучок микросекундной длительности. Контролировать и измерять параметры таких импульсных пучков (амплитуда тока, форма импульса тока) можно лишь при использовании осциллографа. В качестве датчиков тока в установке используются пояса Роговского (трансформатор тока по принципу действия) для измерения тока иницирующего разряда I_{d1} , основного разряда I_{d2} , и полного тока пучка $I_{п}$. Для контроля токов в магнитных катушках I_{s1} , I_{s2} (при настройке) используются датчики на эффекте Холла. Все сигналы с датчиков выведены на разъемы, установленные в стойке блоков питания электронного источника в отсеке для осциллографа.

При измерении сигналов с поясов Роговского необходимо принимать во внимание их чувствительность. В установке используются пояса дающие 1 В сигнала при протекании тока 20 А (чувствительность 20А/В). Таким образом, например, если на осциллографе установлен масштаб отображения сигнала 5В/деление, то одно деление (по вертикали) на экране будет соответствовать амплитуде тока $20 \times 5 = 100$ А.

При контроле токов магнитных катушек следует помнить что при токе соленоида 10 А сигнал с датчика на эффекте Холла составляет около 4 В.

4.2. Контроль ускоряющего напряжения

В установке используется источник ускоряющего напряжения с накопительными емкостями (суммарная емкость около 6 мкФ), которые заряжаются между импульсами тока пучка до заданного напряжения. Напряжение на емкостях можно проконтролировать по индикатору, установленному на передней панели источника ускоряющего напряжения (индикатор установлен в стойке БП электронного источника). Во время импульса напряжение на накопительных конденсаторах уменьшается тем сильнее, чем больше была амплитуда и длительность тока пучка. Осциллограмма напряжения на ускоряющем промежутке может быть получена расчетным путем (исходными данными для расчета являются

зарядное напряжение, осциллограмма тока пучка, величина суммарной емкости источника ускоряющего напряжения (6 мкФ) и величина балластного сопротивления ($R_6 = 1 \text{ Ом}$). На один из разъемов стойки БП выведен сигнал с делителя напряжения, установленного в источнике ускоряющего напряжения. При контроле этого сигнала следует учитывать, что делитель подключен на выход этого источника, и, следовательно, истинное напряжение на ускоряющем промежутке электронного источника во время извлечения тока пучка будет отличаться от сигнала с делителя на величину падения напряжения на балластном (R_6) и зарядном (R_3) сопротивлениях.

4.2.1 Измерение энергии электронного пучка

Относительно точное измерение энергетических характеристик электронного пучка (полной энергии пучка за импульс, плотности энергии и распределения плотности энергии по сечению пучка) в области взаимодействия пучка с обрабатываемыми образцами возможно только калориметрическим методом. При измерениях используется специальный блок термисторов, помещаемый в вакуумную камеру. Внешний вид блока с термисторами (вариант 1) показан на рис. 7.

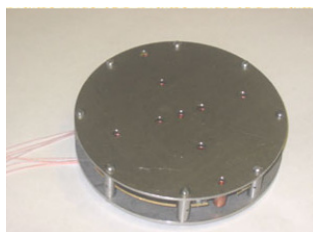


Рис. 7

Примечание. На рис. 7. представлен блок термисторов расположенных крестообразно. В случае использования второго варианта выполнения этого блока все термисторы располагаются на одной линии.

В корпусе блока термисторов из нержавеющей стали смонтированы теплоизолированные поглотители (цилиндры Фарадея). Каждый поглотитель находится за калиброванным отверстием с площадью S_{ab} , через которое на него попадает электронный пучок. К поглотителю прикреплен терморезистор. Измеряя сопротивление этого терморезистора, до и после воздействия на него электронным пучком, можно определить принесенную в поглотитель энергию. Измерение сопротивления терморезистора обеспечивается блоком регистрации. Блок регистрации соединяется с персональным компьютером через последовательный порт RS-232. Программа управления опрашивает блок регистрации и производит вычисление плотности энергии.

4.2.2. Методика измерения сопротивления

Сопротивление терморезистора R1 измеряется схемой (показан один канал многоканальной системы), представленной на рис. 8.

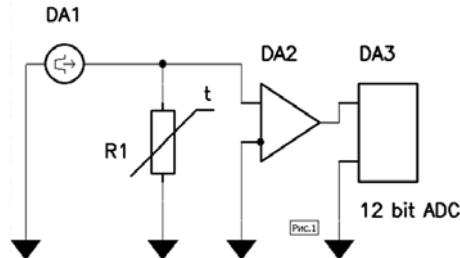


Рис. 8

Импульсный источник тока DA1 выдает измерительный ток, который, протекая по терморезистору R1, создает на нем падение напряжения. Напряжение с датчика нормируется усилителем DA2 и подается на 12-ти битный АЦП. Показания с 9-ти АЦП снимаются микроконтроллером и передаются в персональный компьютер по последовательному порту RS-232. На каждое измерение микроконтроллер может снять до 30-ти показаний АЦП, с целью уменьшения погрешности методом усреднения.

4.2.3. Методика определения плотности энергии

При определении плотности энергии производится два измерения температуры поглотителя. До и после воздействия электронным пучком. Плотность энергии вычисляется по формуле:

$$De = Hc \cdot \frac{dT \cdot M}{Sab}$$

где: De – плотность энергии, ($\text{Дж}/\text{см}^2$); Hc – теплоемкость, ($\text{Дж}/(\text{грамм} \cdot \text{градус})$); dT – изменение температуры, (градус); Sab – площадь отверстия перед поглотителем, (см^2); M – масса поглотителя, (грамм).

5. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ И МЕТОДИКИ РАБОТЫ НА НЕЙ

5.1. Контроль импульсных сигналов в цепях электронного источника

Контроль импульсных сигналов в цепях электронного источника может проводиться с помощью плат АЦП установленных в ПК и с использованием специальной управляющей программы. Также может использоваться запоминающий осциллограф (типа TDS 224, TDS-2014 или подобные).

5.1.1. Использование запоминающего осциллографа

При использовании для измерений импульсных сигналов внешнего осциллографа он может быть установлен в стойку БП электронного источника. Необходимо подключить осциллограф к шнуру сетевого питания и подать на входные разъемы сигналы с установленных в этом отсеке сигнальных разъемов в соответствии с тем, какие сигналы нужно отображать на экране осциллографа.

5.2. Использование калориметра

Калориметр состоит из блока регистрации на основе микропроцессора (МП) и выносного блока термисторов. Блок термисторов может содержать до 9-ти поглотителей энергии. К каждому поглотителю прикреплен терморезистор. Измеряя сопротивление этого терморезистора, до и после воздействия, можно определить энергию, привнесенную в поглотитель электронным пучком. Измерение сопротивления терморезисторов обеспечивается МП блоком регистрации, внешний вид (без верхней крышки корпуса) представлен на рис. 9.

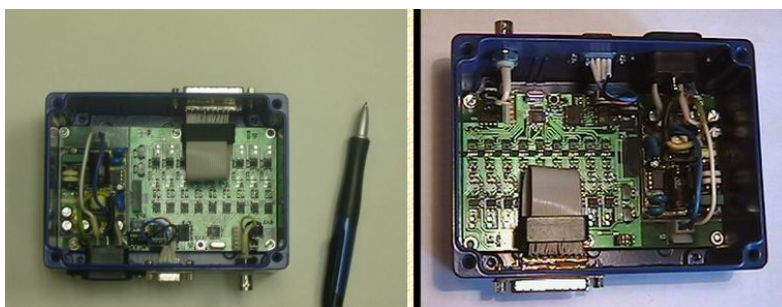


Рис. 9

Блок регистрации соединяется с персональным компьютером через последовательный порт RS-232. Программа управления опрашивает блок регистрации и производит вычисление плотности энергии.

5.2.1. Пошаговая инструкция работы с калориметром

Шаг 1. Подключите блок регистрации к последовательному порту компьютера при помощи 9-ти контактного кабеля.

Шаг 2. Подключите блок регистрации к сети питания (110-220 В 50 Гц).

Шаг 3. Запустите программу управления.

Шаг 4. Программа выдает окно, в котором будет указано количество последовательных портов обнаруженных в системе. В выпадающем списке выберите последовательный порт, к которому подключен блок регистрации и нажмите кнопку «ОК».

Шаг 5. Запускается главное окно программы. Программа пытается прочитать настройки калориметра из памяти регистрационного блока. Если появляются какие-либо проблемы, то выводится сообщение, показанное на рис. 10.

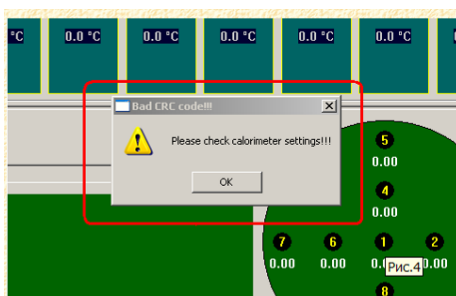


Рис. 10

Вид главного окна показан на рис. 11.

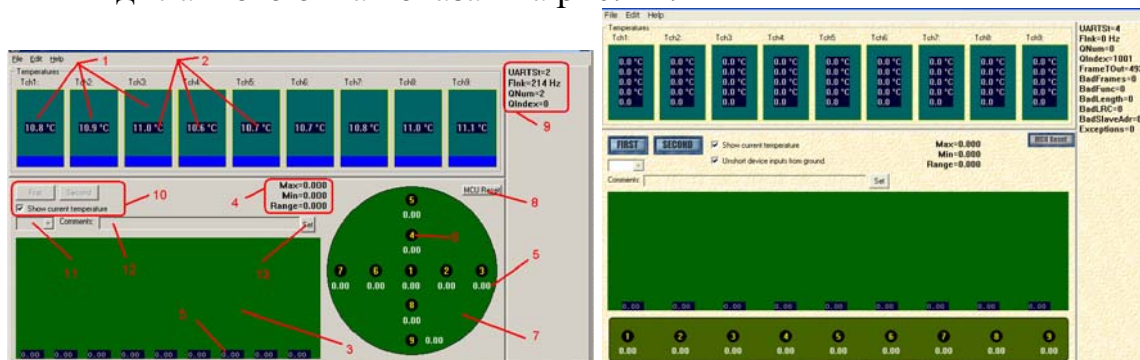


Рис. 11. Два варианта главного окна программы

Цифрами на рисунке обозначены:

1. Графический индикатор текущей температуры датчика.
2. Цифровое значение текущей температуры датчика.
3. Гистограмма распределения плотности энергии по датчикам.
4. Максимальное, минимальное и диапазон значений плотности энергии.
5. Цифровое значение плотности энергии.
6. Номер терморезистора секционного датчика.

7. Изображение размещения терморезисторов на секционном датчике.
8. Кнопка сброса микроконтроллера блока регистрации.
9. Вывод параметров в текстовой форме.
10. Зона управления измерениями.
11. Текущая гистограмма распределения плотности энергии.
12. Комментарий к текущей гистограмме.
13. Запись отредактированного комментария.

Шаг 6. Для корректности измерений надо убедиться в правильности настроек калориметра. Для этого надо зайти в меню указанное на рис. 12.

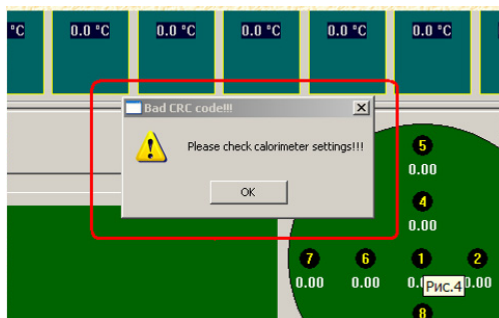


Рис. 12

Появляется окно с настройками калориметра. Вид окна показан на рис. 13.

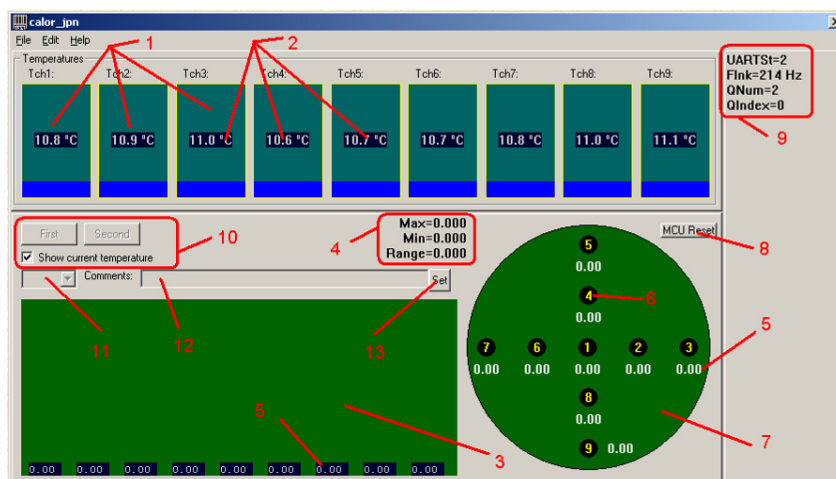


Рис. 13

Цифрами на рисунке указаны:

1. Масса поглотителя с соответствующим номером.
2. Калибровочное сопротивление терморезистора для каждого поглотителя.
3. Температура измерения калибровочного сопротивления.

4. Сопротивления калибратора измерительных токов.
5. Кнопка запуска калибровки измерительных токов.
6. Калибровочные коэффициенты измерительных токов.
7. Глубина фильтрации по каждому измерению.
8. Период мониторинга текущей температуры.
9. Теплоемкость материала поглотителя.
10. Площадь поглотителя.
11. Кнопка принятия отредактированных параметров.
12. Кнопка отказа от принятия отредактированных параметров.
13. Кнопка записи параметров в контроллер регистратора.
14. Кнопка чтения параметров из контроллера регистратора.
15. Кнопка записи параметров в файл.
16. Кнопка чтения параметров из файла.

Если с параметрами все в порядке, то можно перейти к процедуре калибровки измерительных токов. Восстановить измененные параметры можно из файла (рис. 13 поз. 16) или энергонезависимой памяти микроконтроллера блока регистрации (рис. 13 поз. 14).

Результаты калибровки измерительных токов и другие измененные параметры также можно сохранить в файл или в энергонезависимую память микроконтроллера блока регистрации.

Приняв произведенные изменения нажатием кнопки «ОК» переходим к процедуре измерения.

Шаг 7. Подключите 25-ти контактным кабелем секционный датчик к регистратору.

Сразу после старта программа находится в состоянии мониторинга текущей температуры, о чем указывает флажок, показанный на рис. 14.

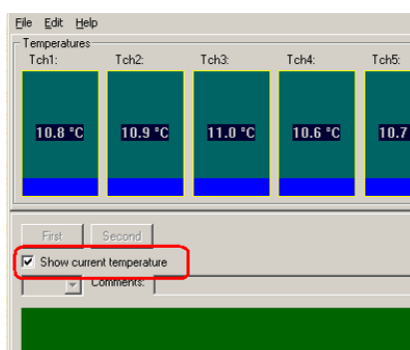


Рис. 14

Для перехода к измерениям этот флажок надо снять. При этом становится активной кнопка измерения температуры поглотителей до выстрела (см. рис. 15).

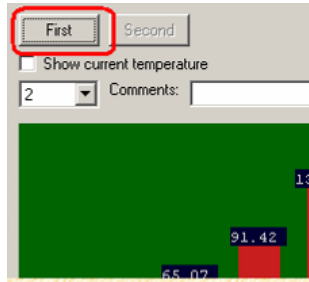


Рис. 15

Шаг 8. Нажмите кнопку измерения температуры поглотителей до выстрела (см. рис. 15). После нажатия кнопки вторым рядом на индикаторах температуры будет выведена температура поглотителей до выстрела (рис. 16 поз.1) и станет активной кнопка измерения температуры поглотителей после выстрела (см. рис. 16 поз.2).

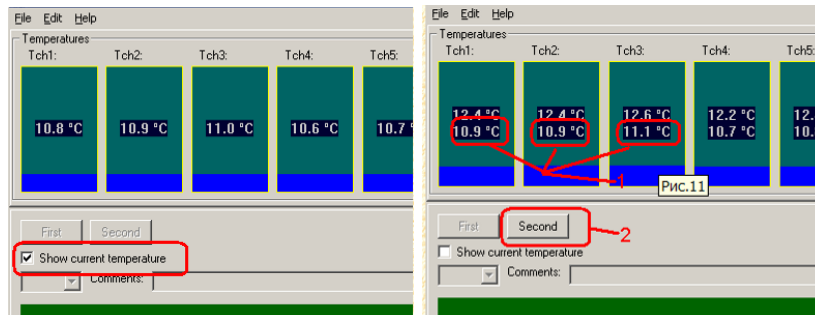


Рис. 16

Шаг 9. Произведите выстрел. Нажмите кнопку измерения температуры поглотителей после выстрела (см. рис. 16). После нажатия кнопки третьим рядом на индикаторах температуры будет выведена температура поглотителей после выстрела (рис. 17 поз. 1), четвертым рядом – разница температур поглотителей до и после выстрела (рис. 17 поз. 2), пятым рядом – рассчитанная плотность энергии на соответствующем поглотителе (рис. 17 поз. 3) и снова станет активной кнопка измерения температуры поглотителей до выстрела (см. рис. 15).

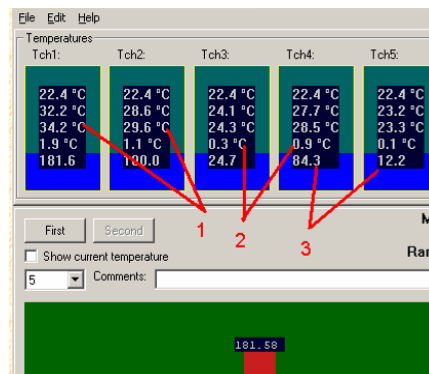


Рис. 17

Рассчитанная плотность энергии для поглотителей выводится на гистограмме (рис. 18 поз. 1), при этом производится автоматическое ее масштабирование по максимальному значению. Кроме того выводится следующая информация:

- Максимальная за измерение зарегистрированная плотность энергии (рис. 18 поз. 2).
- Минимальная за измерение зарегистрированная плотность энергии (рис. 18 поз. 4).
- Диапазон плотностей энергии (рис. 18 поз. 3).

На изображении размещения поглотителей (рис. 18 поз. 5) выводятся:

- Градациями яркости фона номера поглотителя – его плотность энергии (рис. 18 поз. 6).
- Численное значение плотности энергии для соответствующих поглотителей (рис. 18 поз. 7).

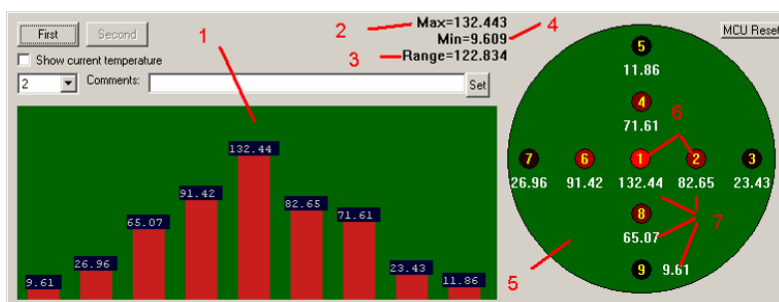


Рис. 18

Результаты измерения заносятся в архив гистограмм. Номер текущей записи архива можно выбрать в выпадающем списке (рис. 19 поз. 1). К каждой записи архива прилагается комментарий, который можно внести в поле ввода (рис. 19 поз. 2). Запись измененного комментария производится кнопкой «Set» (рис. 19 поз. 3).

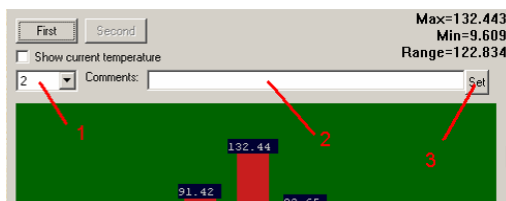


Рис. 19

Шаг 10.

Далее можно перейти к пункту 8 данной инструкции для дальнейших измерений или перейти к мониторингу текущей температуры установкой флажка показа текущей температуры (см. рис. 14.). Сохранение результатов измерений на жесткий диск производится из меню, показанного на рис. 20 поз. 2. Восстановить результаты из файла можно из меню, показанного на рис. 20 поз. 1.

Кроме того возможен экспорт результатов измерений в текстовый формат (рис. 20 поз. 3)

Закончив работу, необходимо выйти из программы через меню, показанное на рис. 20 поз. 4.

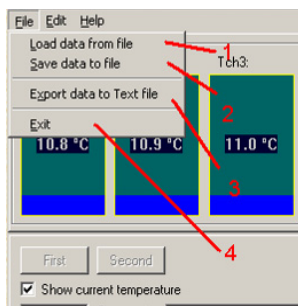


Рис. 20

Калибровка измерительных токов

Шаг 1. Подключите к регистратору набор калибровочных резисторов.

Шаг 2. Убедитесь в верности сопротивлений указанных для данного набора. Сопротивления вводятся в зоне указанной на рис. 21.

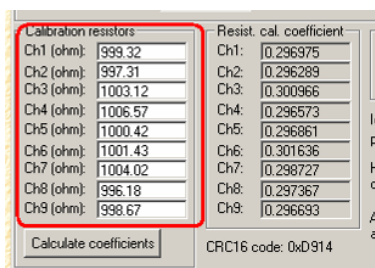


Рис. 21

Шаг 3. После 20-минутного прогрева блока регистрации нажмите кнопку указанную на рис. 22.

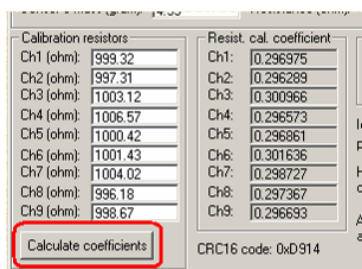


Рис. 22

Шаг 4.

Отключите от регистратора набор калибровочных резисторов. Процедура калибровки измерительных токов закончена.

Вызов окна редактирования параметров калориметра

Для редакции параметров калориметра надо зайти в меню указанное на рис. 23.

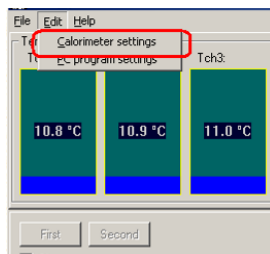


Рис. 23

Появляется окно с настройками калориметра. Вид окна показан на рис. 24.

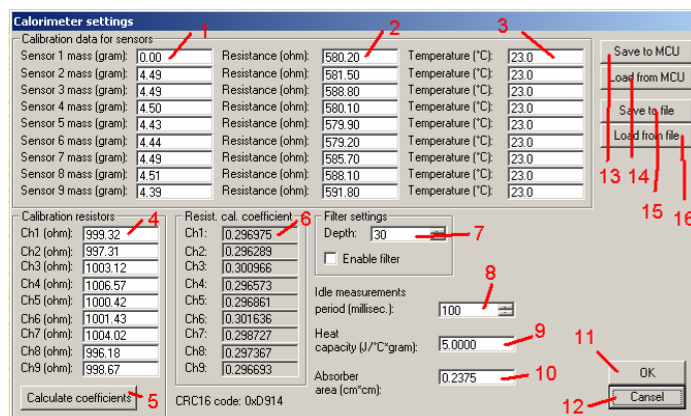


Рис. 24

Цифрами на рисунке указаны:

1. Масса поглотителя с соответствующим номером.
2. Калибровочное сопротивление терморезистора для каждого поглотителя.
3. Температура измерения калибровочного сопротивления.
4. Сопротивления калибратора измерительных токов.
5. Кнопка запуска калибровки измерительных токов.
6. Калибровочные коэффициенты измерительных токов.
7. Глубина фильтрации по каждому измерению.
8. Период мониторинга текущей температуры.
9. Теплоемкость материала поглотителя.
10. Площадь поглотителя.
11. Кнопка принятия отредактированных параметров.
12. Кнопка отказа от принятия отредактированных параметров.

13. Кнопка записи параметров в контроллер регистратора.
14. Кнопка чтения параметров из контроллера регистратора.
15. Кнопка записи параметров в файл.
16. Кнопка чтения параметров из файла.

Калибровочные данные для терморезисторов

Зависимость сопротивления терморезисторов производства фирмы EPCOS от температуры описывается нижеследующей формулой:

$$R_T = R_{T_x} \cdot \exp \left[\frac{\alpha_x}{100} \cdot (T_x + 273,15)^2 \cdot \left(\frac{1}{T + 273,15} - \frac{1}{T_x + 273,15} \right) \right],$$

где: R_T – сопротивление терморезистора при температуре T ; R_{T_x} – сопротивление терморезистора на начале рабочего диапазона; T_x – температура начала рабочего диапазона; T – температура, для которой определяется сопротивление; α_x – температурный коэффициент на начале рабочего диапазона.

Для различных экземпляров резисторов параметры R_{T_x} и α_x имеют различное значение. Чтобы произвести их определение нужно ввести в программу сопротивление каждого терморезистора и температуру терморезистора, при которой производилось измерение сопротивления.

Эти параметры вводятся в поля ввода показанные на рис. 25.

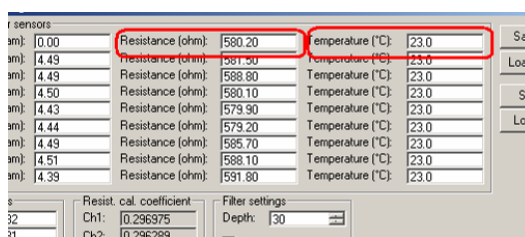


Рис. 25

Определение параметров R_{T_x} и α_x будет автоматически производиться на основе введенного сопротивления и температуры.

Настройки компьютерной программы.

Вызов окна редактирования параметров программы

Для редакции параметров программы надо зайти в меню указанное на рис. 26.

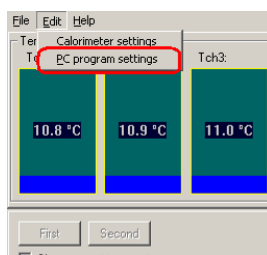


Рис. 26

Появляется окно с настройками калориметра. Вид окна показан на рис. 27.

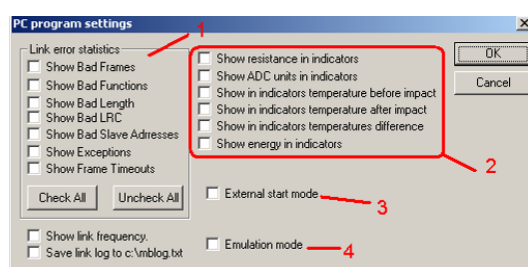


Рис. 27

Цифрами на рисунке указаны:

1. Параметры, индицирующие состояние связи между блоком регистрации и компьютером.
2. Контроль показа параметров измерений.
3. Контроль режима внешнего запуска.
4. Контроль режима имитации работы регистрационного блока.

Параметры, индицирующие состояние связи между блоком регистрации и компьютером

- «**Show Bad Frames**» – показывать количество сообщений с длиной меньшей, чем возможно.
- «**Show Bad Functions**» – показывать количество сообщений с неожиданным кодом функции.
- «**Show Bad Length**» – показывать количество сообщений с неожиданной длиной.
- «**Show Bad LRC**» – показывать количество сообщений с плохим контрольным кодом.
- «**Show Bad Slave Addresses**» – показывать количество сообщений с плохим кодом адреса.
- «**Show Exceptions**» – показывать количество сообщений с флагом исключения.
- «**Show Frame Timeouts**» – показывать количество сообщений без ответа от микроконтроллера.

- «**Show link frequency**» – Показывать частоту следования сообщений между контроллером и компьютером.
- «**Save link log to c:\mblog.txt**» – Записывать протокол сообщений между контроллером и компьютером в файл c:\mblog.txt.

Контроль отображения параметров измерений

Часть параметров измерений показывается в индикаторах только в определенный момент. Чтобы это происходило всегда надо установить соответствующие флаги.

- «**Show resistance in indicators**» – Показывать в индикаторах сопротивление терморезисторов.
- «**Show ADC units in indicators**» – Показывать в индикаторах показания АЦП.
- «**Show in indicators temperatures before impact**» – Показывать в индикаторах температуру до воздействия.
- «**Show in indicators temperatures after impact**» – Показывать в индикаторах температуру после воздействия.
- «**Show in indicators temperatures difference**» – Показывать в индикаторах разницу температур до и после воздействия.
- «**Show energy in indicators**» – Показывать в индикаторах энергию, привнесенную воздействием.

Режим внешнего запуска измерений

В случае выбора этого режима программа не дает доступа к ручному запуску измерений. Запуск измерения температуры до и после выстрела производится подачей сигнала на вход синхронизации. *Блок регистрации игнорирует сигналы запуска длительностью менее 10-ти миллисекунд.*

Режим имитации работы регистрационного блока

Этот режим предназначен для имитации работы регистрационного блока с демонстрационными целями. При этом имитация работы производится самим регистрационным блоком, который производит все операции за исключением запуска АЦП на измерения.

В отчете по лабораторной работе должны быть освещены следующие вопросы

1. Принцип генерации электронного пучка в системе с плазменным катодом.
2. Блок-схема лабораторной установки с кратким описанием схем электропитания, управления и измерения основных параметров.

3. Параметры установки и диапазон их изменения (давление, ток разряда, ток пучка, ускоряющее напряжение, длительность импульса, величина магнитного поля).
4. Методика исследования временных, вольтамперных, газовых и энергетических характеристик электронного источника в зависимости от давления, тока разряда, ускоряющего напряжения и величины магнитного поля.
5. Описание измерительной аппаратуры и методики работы на ней (осциллограф, калориметр).
6. Измерения эмиссионных характеристик электронного источника в зависимости от тока разряда (I_p), ускоряющего напряжения ($U_{\text{уск}}$), давления (p).

Учебное издание

КОВАЛЬ Николай Николаевич

ИЗУЧЕНИЕ ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЫ

Методические указания к выполнению
лабораторных работ по курсу «Плазменные технологии»
для магистрантов, обучающихся по магистерской программе 210106
«Физическая электроника» направления 210100
«Электроника и микроэлектроника»

Верстка

Дизайн обложки

В.П. Аршинова

О.Ю. Аршинова

О.А. Дмитриев

Подписано к печати 19.11.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,68.

Заказ 869. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.