

УДК 621.384.6

## КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ЛИНЕЙНЫМ УСКОРИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОНОВ

© 1995 г. БРЯЗГИН А.А., ФАКТОРОВИЧ Б.Л.

— Контроллер на микропроцессоре K1816BE31 содержит 22-канальный интегрирующий 10-разрядный двупроводный аналого-цифровой преобразователь, 8-канальный 12-разрядный цифроаналоговый преобразователь, 24-разрядный выходной регистр, 16-разрядный входной регистр, генератор тактового импульса с фазовой привязкой к частоте промышленной сети, имеющий диапазон  $0.5 \div 50$  Гц с шагом регулирования 0.05 Гц, и генератор задержанного импульса относительно тактового с временем задержки  $550 \text{ нс} \div 20 \text{ мс}$  с шагом 550 нс. Для связи с центральной э.в.м. служит гальванически развязанный последовательный порт, совместимый с RS-232. Характерное время сбора всей информации и выдачи всех сигналов управления — 0.5 с.

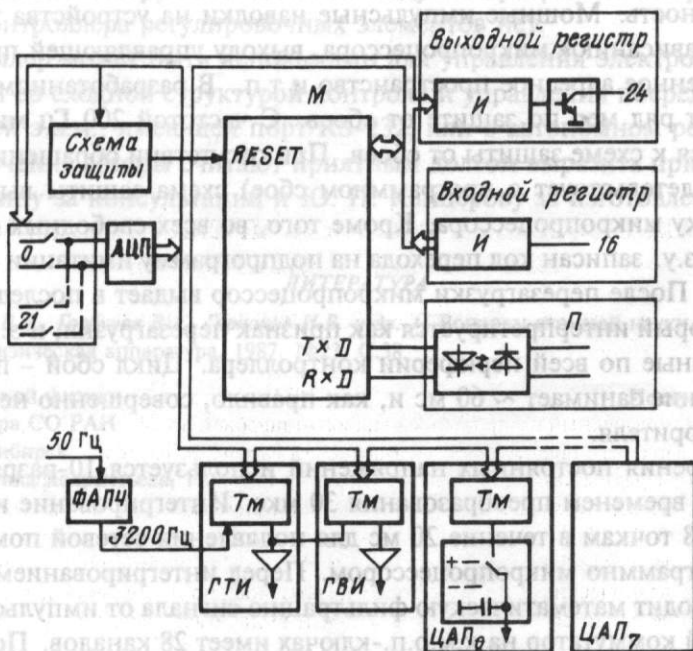
Линейные ускорители электронов серии ИЛУ применяются в различных исследовательских и технологических целях около 15 лет. Ускоритель представляет собой тороидальный резонатор метрового диапазона, возбуждаемый генератором на триоде ГИ-50А в режиме импульсов длительностью 500 мкс с частотой следования до 50 Гц. Ускоренный пучок с энергией до 2.5 МэВ и средней мощностью до 40 кВт выпускается в атмосферу.

Управление ускорителем сводится к регулированию частоты следования импульсов электронного пучка и энергии пучка посредством генераторов тактового и задержанного импульсов. Автономные регуляторы инжектора пучка, магнитной системы и системы транспортировки облучаемых объектов требуют управляющих напряжений от цифроаналоговых преобразователей.

В последние годы управление ускорителем осуществляется от персонального компьютера IBM PC с помощью аппаратуры широкого применения, выполненной в стандарте КАМАК [1]. Информационная и конструктивная избыточность КАМАК-аппаратуры для данных целей побудила к разработке одноплатного специализированного управляющего контроллера ускорителя. Разработанный контроллер обладает функционально полным набором узлов для сбора аналоговой и дискретной информации, ее первичной обработки и выдачи сигналов управления на ускоритель, а также для связи через последовательный порт RS-232 с управляющей э.в.м. IBM PC.

Контроллер содержит следующие устройства:

— 22-канальный 10-разрядный интегрирующий АЦП с временем интегрирования 20 мс и диапазоном  $\pm 5$  В (точность АЦП 0.1%, дифференциальная нелинейность 0.4%, входное сопротивление 2 МОм).



Блок-схема контроллера

- 8-канальный 12-разрядный ЦАП с временем преобразования 0.5 с и диапазоном  $\pm 12$  В (точность ЦАП 0.05%);
- 16-разрядный входной регистр с входными уровнями, совместимыми с т.т.л.;
- 24-разрядный выходной регистр с выходом на транзисторе с открытым коллектором (выходной ток до 100 мА);
- генератор тактовых импульсов (ГТИ) с частотой выходных импульсов  $0.5 \div 50$  Гц с фазовой привязкой к частоте сети (шаг частоты 0.05 Гц, амплитуда импульсов 15 В);
- генератор импульса, задержанного относительно тактового (время задержки  $550$  нс  $\div$  18 мс с шагом 550 нс, амплитуда импульса 15 В);
- последовательный порт RS-232 со скоростью обмена 19200 бод, гальванически развязанный с э.в.м. и использующий для связи 3 линии: «Т×D», «R×D» и «GROUND».

Контроллер выполнен в стандарте «Вишня-160» и имеет встроенный блок питания. Потребляемая мощность  $\leq 10$  Вт.

Блок-схема контроллера показана на рисунке.

Микропроцессор M (K1816BE31) осуществляет согласованную работу всего контроллера, связь с э.в.м., а также предварительную математическую обработку данных. Выбор микропроцессора обусловлен высокой тактовой частотой, наличием последовательного порта и возможностью использования внутренних таймеров для организации нескольких процессов реального времени. Внутреннее о.з.у. на 128 байт позволяет обойтись без внешней оперативной памяти.

Важнейшим условием надежной работы контроллера является высокая помехозащищенность. Мощные импульсные наводки на устройства такого типа приводят к «зависанию» микропроцессора, выходу управляющей программы в непредусмотренное адресное пространство и т.п.. В разработанном контроллере предпринят ряд мер по защите от сбоев. С частотой 200 Гц микропроцессор обращается к схеме защиты от сбоев. При отсутствии обращения в течение 5 мс (что свидетельствует о программном сбое) схема защиты выдает сигнал на перезагрузку микропроцессора. Кроме того, во всех свободных от программы ячейках п.з.у. записан код перехода на подпрограмму имитации аппаратной перезагрузки. После перезагрузки микропроцессор выдает в последовательный порт код, который интерпретируется как признак перезагрузки, и э.в.м. восстанавливает данные по всей периферии контроллера. Цикл сбоя – перезагрузка – восстановление занимает  $\sim 60$  мс и, как правило, совершенно не отражается на работе ускорителя.

Для измерения постоянных напряжений используется 10-разрядный АЦП (К1113ПВ1) с временем преобразования 30 мкс. Интегрирование измеряемого сигнала по 128 точкам в течение 20 мс для подавления сетевой помехи осуществляется программно микропроцессором. Перед интегрированием микропроцессор производит математическую фильтрацию сигнала от импульсных помех. Двупроводный коммутатор на к.м.о.п.-ключах имеет 28 каналов. Пользователю доступны 22 канала, шесть остальных используются для самокалибровки контроллера.

Выходное напряжение ЦАП выделяется как постоянная составляющая импульсов эталонной амплитуды, вырабатываемых к.м.о.п.-ключами. Ключи управляются ш.и.м.-сигналом таймера  $T_m$  (К580ВИ53). Разрядность ЦАП устанавливается программно и может быть любой до 16. Существующая программа использует 12-разрядную версию ЦАП. с частотой ш.и.м.-сигнала 450 Гц как компромисс между достаточной точностью и приемлемым быстродействием.

Входные и выходные регистры сделаны обычным способом на параллельных периферийных интерфейсах (К580ВВ55).

Выходные тактовые импульсы получают делением частоты задающего генератора. Задающий генератор с частотой 3200 Гц имеет фазовую автоподстройку к частоте сети (ФАПЧ). Генератор задержанного импульса, как и делитель тактового генератора, собраны на таймере КР580ВИ53.

Для связи контроллера с э.в.м. используется последовательный порт П (RS-232). Все сигнальные линии порта гальванически развязаны. Протокол RS-232 реализуется программно через последовательные вход и выход микропроцессора. Используется помехоустойчивый протокол обмена информации с э.в.м. с предельной скоростью 5 мс на одну управляющую команду э.в.м. Характерное время сбора всей информации об ускорителе и выдачи всех управляющих сигналов около 0.5 с.

Все входные и выходные сигналы контроллера защищены диодно-резисторными цепочками от импульсных помех, превышающих напряжение питания.

АЦП и ЦАП калибруются одним из модулей программы микропроцессора. На плате контроллера регулировочных элементов нет.

Контроллер может быть использован для управления электрофизическими установками со сходной структурой контроля и управления посредством любой управляющей э.в.м., имеющей порт RS-232, или в автономном режиме.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить признательность В. П. Останину за консультации и Ю. П. Канцерову за изготовление контроллера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ауслендер В.Л., Горбунов В.А., Горнаков И.В. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Электрофизическая аппаратура. 1987. №23. С.38.

Институт ядерной физики  
им. Г.И.Будкера СО РАН  
630090, Новосибирск  
просп. Академика Лаврентьева, 11

Поступила в редакцию  
8.VIII.1994





мальное число параллельных дискретных хордовых каналов  $N$  при использовании отдельных оптимальных гауссовых пучков определяется по формуле [3]

$$N = \frac{a}{K} \left( \frac{\pi}{2\lambda l} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где коэффициент  $K$  равен отношению диаметра окна к характерному диаметру  $d$  гауссова пучка с распределением интенсивности  $I(r) = I_0 \exp[-(2r/d)^2]$ . Как известно, для того чтобы гауссов пучок не дифрагировал на окне, необходимо, чтобы параметр  $K \geq 2 \div 3$ . В установке ПСП-2М характерные размеры составляют:  $l = 2.4$  м;  $a = 0.12$  м и отсюда  $N = 2 \div 3$ . Естественно, что восстановить детальный радиальный профиль плотности плазмы по такому числу хордовых измерений невозможно.

Поскольку отмеченная трудность связана с дифракционной расходимостью гауссовых пучков, решением задачи является просвечивание плазмы одним, но сильно растянутым в направлении расположения каналов пучком. Такой «эллиптический гауссов» пучок с распределением интенсивности по поперечным координатам  $I = I_0 \exp[-(2X/d_X)^2 - (2Y/d_Y)^2]$  формируется в интерферометре из аксиально-симметричного гауссова пучка при помощи цилиндрической оптики. В области плазмы эллиптичность пучка  $\epsilon = d_Y/d_X \gg 1$ . Разделение пучка на отдельные эффективные хордовые каналы проводится уже на выходе интерферометра непосредственно перед линейкой детекторов.

Устройство интерферометра показано на рис. 1. Волноводный HCN-лазер с в.ч.-накачкой 1 [4] настраивается на  $EH_{11}$ -моду с выходной мощностью до 200 мВт. Излучение от лазера к установке передается по полуму диэлектрическому волноводу 3 (стеклянная труба) длиной  $\sim 10$  м с таким же, как и у волновода лазера, внутренним диаметром – 56 мм. На некотором расстоянии от выходного торца волновода  $EH_{11}$ -мода преобразуется в  $TEM_{00}$ -моду – аксиально-симметричный гауссов пучок с характерным размером  $d = 26$  мм. При помощи телескопической системы из двух одномерных  $90^\circ$  параболических зеркал 4 с фокусным расстоянием 67 мм и 400 мм пучок растягивается в направлении  $Y$  в 6 раз до характерного размера  $d_Y = 156$  мм и поступает на вход интерферометра Маха-Цандера. Пучок с таким размером практически не расходится в интерферометре в  $Y$ -направлении. Параболические зеркала изготовлены из латуни на станке с ч.п.у. и затем отполированы. При растяжке пучка при помощи более простой системы из двух цилиндрических линз из-за сферических aberrаций такой системы фокусные расстояния линз и соответственно размеры телескопа должны быть минимум в  $5 \div 7$  раз больше.

Делительная плоскопараллельная пластина 5 изготовлена из кристаллического кварца и имеет толщину, обеспечивающую равное деление  $X$ -поляризованного пучка. Цилиндрическая линза 6 служит для  $X$ -фокусировки пучка на центр области с плазмой 7 ( $Z = 0$ ,  $d_X = 13$  мм), для того чтобы провести его через узкие щели в наружном лайнере плазменной установки 13. Другая такая же линза преобразует пучок в плоскопараллельный для обращения его волнового фронта на плоском зеркале 8. Разделение пучка на отдельные каналы осуществляется при помощи оптической системы многоканального детектора, состоя-

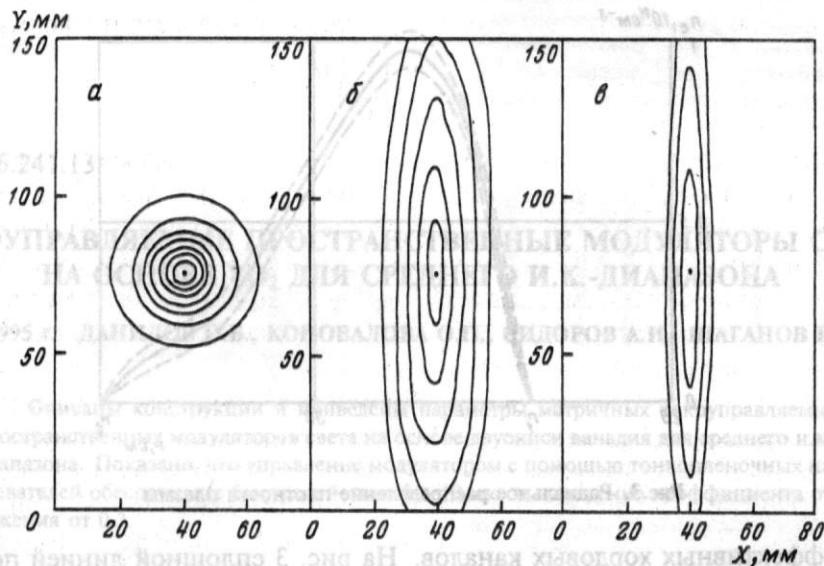


Рис.2. Распределения интенсивности пучка: а - на выходе волновода (эксцентриситет  $\varepsilon = 1$ ); б - на выходе параболического телескопа ( $\varepsilon = 6$ ); в - в центре плазмы (плоскость  $Z = 0$ ,  $\varepsilon = 12$ )

шей из цилиндрической линзы  $X$ -фокусировки 9 и шести цилиндрических линз  $Y$ -фокусировки 10. Все цилиндрические линзы интерферометра изготовлены из фторопласта.

Детекторы 11 представляют собой  $n$ -InSb-фотосопротивления, помещенные в отдельные интегрирующие камеры. Камеры с детекторами охлаждаются до температуры жидкого гелия в криостате 12. Устройство криостата, а также вопросы оптимизации детекторов будут описаны в отдельной статье.

Для ослабления паразитной обратной связи между интерферометром и лазером используется ослабитель мощности пучка 2.

Для уменьшения вибрации детали интерферометра смонтированы на изолированной от установки массивной текстолитовой  $O$ -образной раме.

На рис.2 приведены распределения интенсивности пучка в сечениях  $XY$  в различных местах интерферометра. Распределения снимались сканирующим управляемым э.в.м. пироэлектрическим детектором с приемной площадкой  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>. На этих распределениях центральная точка соответствует максимальной интенсивности в данном сечении. Последовательно охватывающие ее замкнутые линии - уровни постоянной интенсивности, составляющие по величине  $1 - m/(M + 1)$  долю максимума, где  $m$  - порядковый номер охватывающей точку уровня,  $M$  - полное число уровней в сечении. Измеренные распределения имеют незначительные отклонения от расчетных, практически не влияющие на контраст интерферометра в различных точках по сечению пучка.

Описанная конструкция интерферометра позволяет получить на радиальном размере области плазмы, равном 120 мм, при длине измерительного плеча 2,4 м

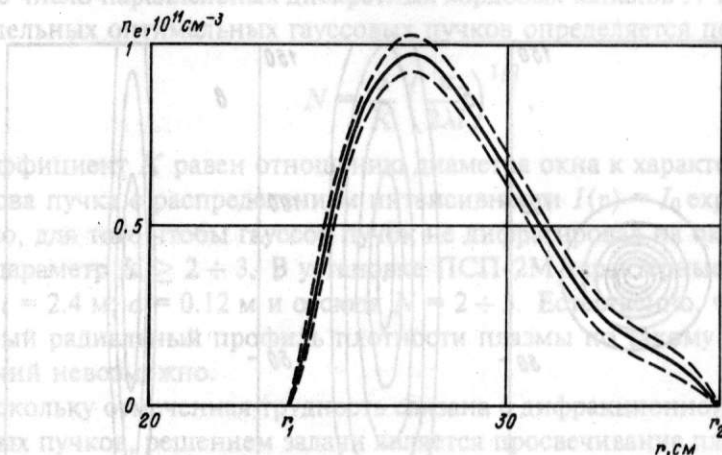


Рис.3. Радиальное распределение плотности плазмы

шесть эффективных хордовых каналов. На рис. 3 сплошной линией показано измеренное радиальное распределение плотности плазмы в квазистационарной фазе тренировочного разряда на установке ПСП-2М. Профиль плотности плазмы восстанавливался по данным измерений с использованием регуляризирующего алгоритма [5]. Расстояние по вертикальной оси между двумя штриховыми линиями – погрешность восстановления профиля плотности плазмы. Для плавных распределений она превышает погрешность измерения в отдельных каналах на  $50 \div 70\%$ .

Автор признателен А.В.Белобородову за помощь в автоматизации измерений распределения интенсивности пучка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Abdrashitov G.F., Beloborodov A.V., Volosov V.I. et al.* // Nuclear Fusion. 1991. V.31. №7. P.1275.
2. *Белобородов А.В., Кубарев В.В.* //Физика плазмы. 1992. Т.18. С.219.
3. *Кубарев В.В., Мишагин В.В.* Препринт ИЯФ СО РАН 86-45. Новосибирск, 1986.
4. *Кубарев В.В.* // ПТЭ. 1986. №3. С.177.
5. *Белобородов А.В., Кубарев В.В.* Препринт ИЯФ СО РАН 88-144. Новосибирск, 1988.

Институт ядерной физики  
им.Г.И.Будкера СО РАН  
630090, Новосибирск  
просп. Акад. Лаврентьева, 11

Поступила в редакцию  
28.II.1994  
После доработки  
29.XI.1994



УДК 533.599

**СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА  
ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР**© 1995 г. АНАШИН В.В., ВАЛЫКА И.Е., ГАВРИЛОВ Н.Г., КРУГЛЯКОВ Э.П.,  
ФЕДОРЧЕНКО М.В., ЧХАЛО Н.И.

Описана конструкция специализированной сверхвысоковакуумной автоматизированной установки для напыления многослойных интерференционных структур методом импульсного лазерного испарения. Подробно описаны узлы, обеспечивающие высокую надежность установки и качество напыляемых пленок. Установка имеет высоковакуумные шлюзы для закладки подложек и мишеней. Испарение мишеней осуществляется коммерческим Nd – ИАГ-лазером, работающим в режиме модулированной добротности. Основные технические характеристики установки: вакуум в камере напыления  $10^{-8} \div 10^{-10}$  Торр, в шлюзах –  $10^{-6} \div 10^{-7}$  Торр; скорость напыления  $0.03 \div 0.5$  нм/с; производительность установки 2–3 готовых изделия, напыленных в условиях сверхвысокого вакуума, за смену; воспроизводимость толщины пленок  $\pm 0.8\%$ .

Существенный прогресс в рентгенооптике в настоящее время связан с появлением многослойных интерференционных структур (м.и.с.) для рентгеновского излучения [1]. М.и.с. должны содержать  $40 \div 300$  слоев толщиной  $0.5 \div 10$  нм при межслойной шероховатости  $< 0.3$  нм, неравномерности средней толщины слоев по площади м.и.с.  $\leq 1\%$ , взаимном перемешивании слоев  $\leq 0.3$  нм. В процессе изготовления м.и.с. необходимо поочередное напыление двух и более веществ, причем недопустимо загрязнение пленок остаточными газами установки.

При разработке вакуумных установок и методов напыления м.и.с. упор делается на стабилизацию параметров напылительного процесса и высокую вакуумную гигиену. Наиболее хорошо освоенными методами изготовления м.и.с. являются ионное распыление в его различных модификациях [2] и термическое испарение [3, 4]. Менее изученным, однако весьма перспективным является метод импульсного лазерного испарения [5, 6].

Этот метод сочетает в себе достоинства двух других методов. Во-первых, как в случае термического испарения, нет необходимости в рабочем газе, а вводимая в объем мощность  $\sim 10$  Вт не приводит к сколько-нибудь значительному нагреву элементов конструкции вакуумной камеры. Все это создает идеальные условия для получения химически чистых пленок. Во-вторых, высокоэнергичные ионы в потоке испаренного материала образуют центры конденсации равномерно по всей поверхности растущей пленки. Это приводит, как в случае ионного распыления, к однородному росту пленки без образования крупных кристалли-

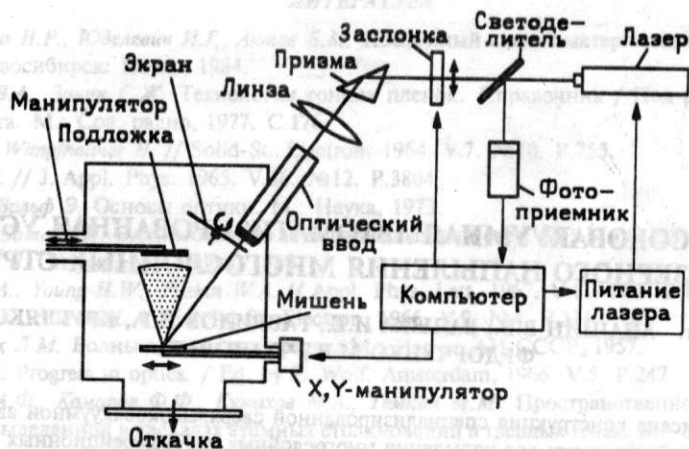


Рис.1. Схема установки для распыления материалов методом импульсного лазерного испарения

тов. В-третьих, этот метод обеспечивает высокую эффективность использования испаряемого материала.

В данной работе описана установка импульсного лазерного испарения, конструкция и элементы которой оптимизированы для получения высококачественных многослойных интерференционных структур рентгеновского диапазона.

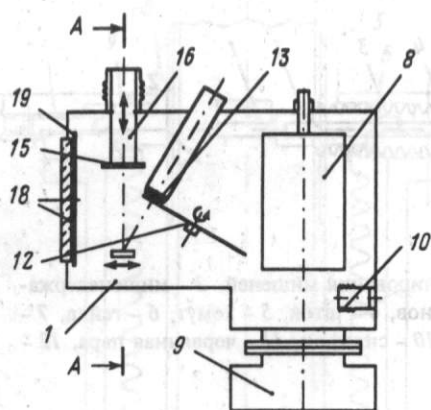
### Состав и принцип работы установки

Установка, схема которой приведена на рис. 1, состоит из вакуумной части, лазерного испарителя и системы автоматизации. Процесс напыления происходит следующим образом. Излучение лазера, проходя через управляемую компьютерную заслонку, фокусирующую линзу, оптический ввод в вакуум и защитный экран, попадает на мишень. Плотность мощности лазерного излучения на мишени достигает сотен мегаватт на квадратный сантиметр. При этом поверхностный слой материала мишени превращается в плазму. Плазменный сгусток газодинамически ускоряется в направлении, перпендикулярном к мишени, и осаждается на подложке. В процессе напыления с помощью X, Y-манипулятора мишень под лазерным пучком непрерывно сканируется. После нанесения заданного количества вещества заслонка закрывается и напыление либо прекращается, либо при нанесении многослойной структуры автоматически устанавливается новая мишень и процесс возобновляется.

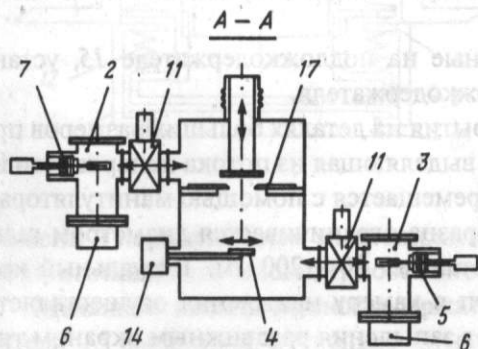
Для контроля толщины напыляемых пленок предварительно на отдельных пленках при фиксированной мощности лазера определяется количество вещества, напыляемого за один импульс лазерного излучения. В дальнейшем, толщина покрытий задается числом импульсов лазерного излучения.

### Конструкция вакуумной части и ее отдельных узлов

Схема вакуумной части установки (далее установка) приведена на рис. 2. Высоковакуумные шлюзы для закладки подложек (2) и мишеней (3) откачива-



**Рис.2.** Схема вакуумной части установки для напыления пленок методом импульсного лазерного испарения. 1 – камера напыления, 2 – шлюзовая камера для подложек, 3 – шлюзовая камера для мишеней, 4 – мишенедержатель с мишенями, 5 – манипулятор для мишеней, 6 – насос НМД-0.16, 7 – манипулятор для подложек, 8 – криопанель, 9 – насос НМД-0.4, 10 – сублимационный насос, 11 – вакуумный затвор, 12 – экран, 13 – оптический ввод, 14 – система сканирования, 15 – подложкодержатель, 16 – захват подложкодержателя, 17 – диафрагма, 18 – смотровое окно, 19 – ирисовая диафрагма



ются магниторазрядными насосами 6. Подложки и мишени подаются в камеру напыления с помощью манипуляторов соответственно 7 и 5 с линейным перемещением 400 мм. Основу конструкции манипулятора составляет планетарный механизм, обеспечивающий ввод вращения в вакуум. Далее, через реечную передачу вращательное движение преобразуется в линейное.

Камера напыления 1 откачивается криогенным 8, магниторазрядным 9 (НМД-0.4) и титановым сублимационным 10 насосами. Предельный вакуум составляет  $10^{-10}$  Торр – при использовании вакуумных затворов 11 с металлическим уплотнением и  $10^{-9}$  Торр – с витоновым уплотнением.

Непрерывно вращающийся кварцевый экран 12 предотвращает запыление оптического ввода 13 продуктами испаряемой мишени. Его вращают для того, чтобы за время напыления одного образца (1 ÷ 3 ч) изменение коэффициента пропускания экрана из-за запыления материалом мишени не превышало 1%. Ввод вращения в вакуум основан на преобразовании с помощью винтовой передачи вращательного движения шагового двигателя в поступательное движение штока, который посредством червячной передачи задает вращение экрану.

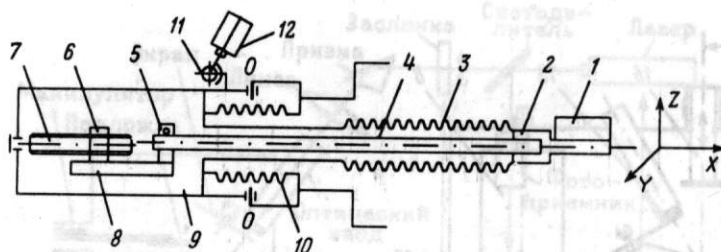


Рис.3. Схема двухкоординатной системы сканирования мишеней. 1 – мишенедержатель, 2 – переходная втулка, 3 – блок сильфонов, 4 – шток, 5 – хомут, 6 – гайка, 7 – вал привода, 8 – направляющая, 9 – корпус, 10 – сильфон, 11 – червячная пара, 12 – двигатель, *О-О* – ось вращения

С помощью системы сканирования 14 испаряемые мишени 4 перемещаются в двух взаимно перпендикулярных направлениях в пределах  $0 \div 40$  мм по координате  $X$  и  $0 \div 60$  мм – по  $Y$ .

Напыляемые подложки, закрепленные на подложкодержателе 15, устанавливаются в механизм захвата 16 подложкодержателя.

Для улучшения равномерности покрытия на деталях больших размеров предусмотрена регулируемая диафрагма 17, выделяющая из потока испаряемого вещества часть пучка. При этом деталь перемещается с помощью манипулятора 7. Максимальный размер напыляемого образца ограничивается диаметром шлюзового канала и размером камеры и составляет  $50 \times 200$  мм. Визуальный контроль за процессом напыления и доступ в камеру напыления осуществляется через смотровое окно 18, защищенное от запыления раздвижным экраном типа «ирисовая диафрагма» 19.

Фланцевые соединения установки используют уплотнения типа Conflat. Все узлы изготовлены из материалов, позволяющих многократно прогревать установку при температуре  $350^\circ\text{C}$ . Наружная часть системы сканирования 14 и привод вращения экрана при прогреве установки снимаются.

**Система сканирования мишеней.** Схема двухкоординатной системы сканирования мишеней 14 приведена на рис. 3. Держатель мишеней 1, имеющий с боков две пружинные направляющие, устанавливается на переходную втулку 2, приваренную к сильфонному блоку 3. На шток 4 одевается и закрепляется хомут 5, который жестко связан с гайкой 6. При вращении вала 7 гайка перемещается по направляющей 8 по координате  $X$ . Привод механизма через систему шестеренок осуществляется шаговым двигателем ШД-5. Корпус механизма перемещения по оси  $X$  (9) закреплен на оси  $O-O$  червячного механизма перемещения по  $Y$ -координате и совершает вокруг нее качательное движение. При этом сильфон 10 работает на изгиб.

По сравнению с однокоординатной системой [5] эта система позволяет лучше использовать материал мишени и одновременно напылять существенно большее число материалов и обеспечивает лучшую стабилизацию количества испаряемого вещества за импульс. В сравнении с вращением цилиндрической



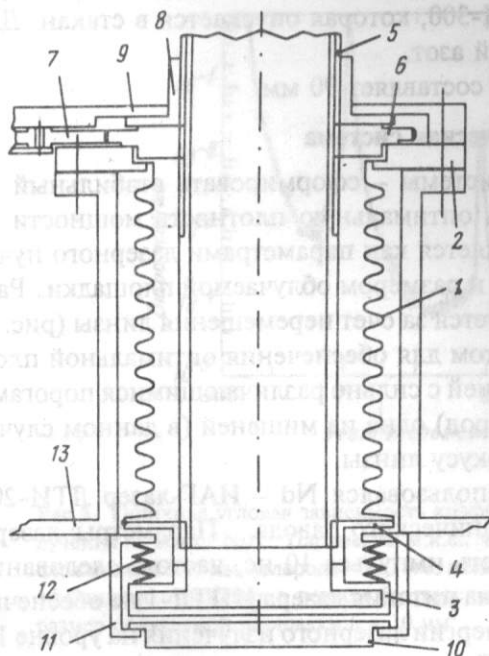


Рис.4. Схема механизма захвата подложкодержателя. 1 – блок сильфонов, 2 – фланец механизма, 3 – заглушка, 4 – втулка, 5 – стакан, 6 – приводная шестерня, 7 – промежуточная шестерня, 8 – направляющая втулка, 9 – корпус механизма, 10 – подложкодержатель, 11 – разрезная скоба, 12 – пружины, 13 – корпус камеры

мишени и перемещением ее в направлении оси вращения [6] существенно проще приготавливать мишени, особенно драгоценных и редких металлов.

**Механизм захвата подложкодержателя.** Механизм крепления подложкодержателя 15 выполняет несколько функций: фиксацию подложки в камере напыления, изменение расстояния между подложкой и мишенью, нагрев и охлаждение подложки. Его основой (рис. 4) является блок, составленный из трех сильфонов 1, который с одной стороны приварен к фланцу 2, а с другой несет медную заглушку 3 с плоским оптически полированным торцом. Втулка из нержавеющей стали 4, приваренная к заглушке диффузионной сваркой, имеет внутреннюю резьбу, в которую вкручивается тонкостенный стакан 5 с наружной резьбой. При вращении шестерни 6, имеющей внутреннюю резьбу, стакан перемещается вертикально и соответственно изменяется расстояние между подложкой и мишенью. Передача вращения на шестерню от рукоятки (на рисунке не показана) осуществляется через промежуточную шестерню 7. Механизм перемещения собран в корпусе 9 и прикреплен винтами к фланцу 2.

На заглушку устанавливается пружинный механизм, прижимающий подложкодержатель 10 к заглушке. Он состоит из разрезанной на две части скобы 11, имеющей прямоугольные направляющие для захода подложкодержателя, и пружин 12. Подложкодержатель устанавливается в крайнем верхнем положении стакана 5, когда скоба упирается в корпус камеры напыления 13. При этом пружины сжимаются, заглушка отходит вверх и в образовавшийся зазор легко входит подложкодержатель. При перемещении стакана вниз пружины разжимаются и подложкодержатель прижимается к скобе. Детали 3 и 10 притерты друг

к другу, что обеспечивает равномерный тепловой контакт между ними. Нагрев подложки осуществляется лампой КГМ-300, которая опускается в стакан. Для охлаждения в стакан заливается жидкий азот.

Длина хода описанного механизма составляет 90 мм.

### Лазерно-оптическая система

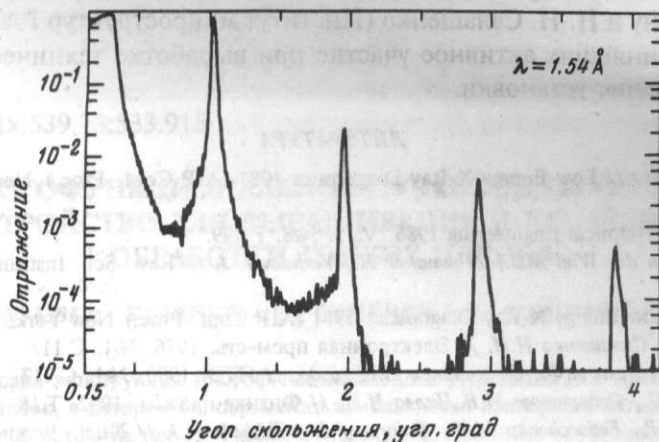
Назначение лазерно-оптической системы – сформировать стабильный во времени лазерный пучок и обеспечить оптимальную плотность мощности на мишени. Плотность мощности определяется как параметрами лазерного пучка (длительность и энергия импульса), так и размером облучаемой площадки. Размер облучаемой части мишени регулируется за счет перемещения линзы (рис. 1) по нониусу с точностью 0.3 мм. При этом для обеспечения оптимальной плотности мощности при распылении мишеней с сильно различающимися порогами испарения (например, вольфрам и углерод) одна из мишеней (в данном случае вольфрам) устанавливается ближе к фокусу линзы.

Для испарения в нашей работе использовался Nd – ИАГ-лазер ЛТИ-205 производства Сергачского электромеханического завода. Параметры лазера: энергия в импульсе 0.3 Дж, длительность импульса 10 нс, частота следования импульсов до 30 Гц. Стандартная система питания лазера ИПТЛ-1 не обеспечивала требуемой стабильности средней энергии лазерного излучения на уровне 1% в течение 1 ÷ 3 ч непрерывной работы. Поэтому для зарядки емкостных накопителей ламп накачки лазера вместо зарядных блоков БУЗ и БГЗ системы питания ИПТЛ-1 были установлены блоки А-011, разработанные ранее в ИЯФ СО РАН для зарядки емкостных накопителей магнитных систем электрон-позитронных накопителей.

Блоки имеют следующие характеристики: регулируемое напряжение – до 800 В, ток – 3 А, стабилизация напряжения – 0.05%. Напряжение зарядки устанавливается с помощью э.в.м. следующим образом. С помощью фотоэлемента ФК19 измеряется энергия лазерного излучения, этот сигнал поступает в э.в.м. В зависимости от его величины э.в.м. может изменять напряжение зарядки накопителей. Таким образом удалось стабилизировать среднюю энергию лазерного излучения в течение длительного времени непрерывной работы лазера.

### Система автоматизации

Управление установкой, включающее в себя контроль и корректировку энергии лазерного излучения, напыление заданного количества вещества, замену и сканирование мишеней в процессе напыления, управление заслонкой, перекрывающей лазерный пучок, вывод информации о текущем состоянии процесса напыления, осуществляется с помощью э.в.м. МС-1212. Программы написаны на языке Фортран-4. Все управляющие модули выполнены в стандарте КАМАК. Использование широкой номенклатуры аппаратуры стандарта КАМАК позволяет легко перестраивать процесс напыления по мере возникновения нестандартных задач.



**Рис.5.** Типичная угловая зависимость коэффициента отражения рентгеновского излучения от м.и.с. Ni/C. Параметры м.и.с.: число слоев 76, период 4.56 нм, толщина слоя никеля 1.95 нм, углерода – 2.61 нм, межплоскостная шероховатость 0.26 нм. Коэффициент отражения в первом брэгговском пике на длине волны 0.154 нм – 85%, размер облучаемой площадки  $6 \times 10 \text{ мм}^2$

### Экспериментальные результаты

Описанная установка в течение ряда лет применялась для напыления многослойных интерференционных структур рентгеновской области спектра [7, 8]. Типичные размеры зеркал составляли  $30 \times 40$  и  $30 \times 120$  мм. Равномерность толщин пленок определялась на микрофотометре МИИ-4 и составляла  $\pm 0.8\%$  по всей поверхности зеркал. Количество напыляемых слоев достигало 200.

На рис.5 приведена типичная угловая зависимость коэффициента отражения от м.и.с. Ni/C, оптимизированной на область жесткого рентгеновского излучения. Зеркало нанесено на стекло типа float glass с шероховатостью поверхности 0.6 нм. Параметры зеркала следующие: число слоев 76; период 4.56 нм; толщина слоя никеля 1.95 нм, углерода – 2.61 нм; межплоскостная шероховатость 0.26 нм. Коэффициент отражения в первом брэгговском пике, измеренный на длине волны 0.154 нм, составил 85% при облучаемой площади  $6 \times 10 \text{ мм}^2$ . Относительная флуктуация периода  $\delta d/d$  структуры определялась по уширению брэгговских пиков высших порядков  $\delta\vartheta$  по формуле  $\delta d/d = \delta\vartheta \text{ctg}\vartheta$  и составила 1.2%.

Описанная установка применялась также как источник вакуумно-ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения для калибровки спектрометров рентгеновского излучения [9].

Благодаря возможности нанесения заданного количества вещества с точностью не хуже 1.6%, а также высокой химической чистоте пленок, на описанной установке напылялись эталонные пленки металлов для рентгенофлуоресцентного анализа [10].

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность А. Д. Ахсахалю и Н. Н. Салащенко (Институт микроструктур РАН, г. Нижний Новгород), принявших активное участие при выработке технического задания на проектирование установки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Barbee T.W. Jr.* // Low Energy X-Ray Diagnostics-1981 (AIP Conf. Proc.) New York: AIP, 1981. P.131.
2. *Barbee T.W.* // Optical Engineering 1986. V.25. №8. P.899.
3. *Puik E.J., Van der Wiel M.J., Zeijemakers H., Verhoeven J.* // Rev. Sci. Instrum. 1992. V.63(1). P.1415.
4. *Spiller E.* // Low Energy X-Ray Diagnostics-1981 (AIP Conf. Proc.) New York: AIP, 1981. P.124.
5. *Гапонов С.В., Салащенко Н.Н.* // Электронная пром-сть. 1976. №1. С.11.
6. *Гаспаров В.А., Диме А.Ф., Овчинников И.М. и др.* // ПТЭ. 1990. №1. С.217.
7. *Кругляков Э.П., Федорченко М.В., Чхало Н.И.* // Физика плазмы. 1992. Т.18. Вып.4. С.482.
8. *Kruglyakov E.P., Fedorchenko M.V., Fedorov A.L., Chkhalo N.I.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1991. V.A308. P.325.
9. *Горбовский А.И., Кругляков Э.П., Федорченко М.В., Чхало Н.И.* // Физика плазмы. 1994. Т.20. Вып.1. С.98.
10. *Varyshev V.B., Chkalo N.I., Kondratyev V.I., Kulipanov G.N.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1955. V.A359. P.310.

Институт ядерной физики СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика  
Лаврентьева, 11

Поступила в редакцию  
26.IV.1993

После доработки  
19.X.1994