

УДК 681.7

Система контроля энергетического спектра ионных пучков

А. Н. Козлов, В. Д. Смольянинов, А. П. Еремин
ФГУДП «НИИ электронной и ионной оптики», Москва, Россия

А. М. Филачев

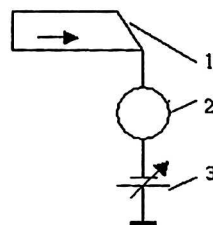
Государственный научный центр ГУП «НПО «Орион»», Москва, Россия

Одной из причин, сдерживающей внедрение технологического процесса обработки материалов пучками ионов, является отсутствие в ряде ионно-лучевых установок средств контроля важных параметров. В результате этого не обеспечивается технологическая воспроизводимость процессов ионно-лучевой обработки материалов. Одним из параметров, определяющих процесс обработки, является энергия ионов. Описана разработанная система контроля для анализа энергетического спектра ионов.

Обычные измерения ионного тока с помощью запирающего потенциала носят интегральный характер. Для получения информации о токе ионов, обладающих малым разбросом энергии, применяется специальная схема измерения. Для получения величины тока ионов, обладающих энергией, заданной запирающим потенциалом V , накладывается на этот потенциал переменное напряжение. Регистрирующая часть прибора выделяет переменную составляющую тока ионов. Детектируя полученное напряжение, получаем сигнал, амплитуда которого пропорциональна току ионов, обладающих энергией, заданной потенциалом V . Данная система позволила правильно выбрать режимы обработки, а также повысить воспроизводимость технологических процессов.

Основная схема регистрации ионных и электронных пучков и измерения их параметров, методом запирающего потенциала показана на рис. 1.

Рис. 1. Основная схема регистрации ионов:
1 — коллектор частиц; 2 — регистрирующее устройство;
3 — регулируемый источник напряжения



Существуют различные конструкции коллектора частиц. Коллектор в простейшем виде представляет собой проводящую площадку площадью S , которая собирает частицы. В более сложном виде это конструкция снабжена селектором частиц. Это либо электростатическая система, обычно двух-трех-сеточная конструкция, либо совмещенная электростатическая и магнитная система. Селектор частиц обеспечивает, как разделение ионной и электронной компоненты, так и селекцию частиц по энергии.

Обычно применяют сетки из нержавеющей стали — 100 линий на сантиметр, с прозрачностью ~75 %, и располагают их друг от друга на расстоянии порядка миллиметра. При регистрации ионных пучков протекают процессы

распыления сеток. Выбитые электроны, вакуум порядка $0,001 \div 0,01$ Па, и высокое напряжение между сетками создают условие для возникновения разряда в области сеток [1]. Поэтому желательно разнести в пространстве процесс разделения пучков на ионную и электронную компоненту и процесс разделения ионов по энергиям. Для этого было разработано устройство, изображенное на рис. 2.

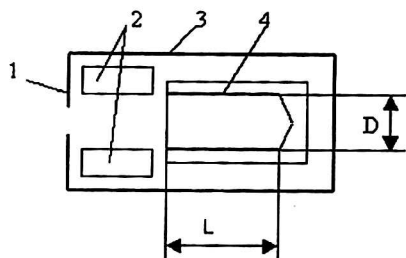


Рис. 2. Устройство регистрации ионов:

- 1 — входная диафрагма; 2 — магнит;
- 3 — корпус магнитомягкий;
- 4 — коллектор ионов

Устройство работает следующим образом: часть пучка, вырезанная входной диафрагмой (имеется набор диафрагм различных диаметров 3, 5, 7 мм), попадает в область действия магнитного поля. Под действием этого поля электроны отклоняются от своего прямолинейного движения и не попадают на коллектор. Вторичные электроны, выбитые из коллектора под действием ионной бомбардировки, претерпевают ряд соударений со стенками коллектора и оседают на коллекторе ($L \gg D$). Селекция ионов по энергиям осуществляется запирающим потенциалом $0 \div 5,0$ кВ, который подается на коллектор ионов. Недостатком данного устройства является наличие области скрещивания электрического и магнитного полей. При низком вакууме возможно зажигание тлеющего разряда в этой области, если размеры области больше длины свободного пробега частиц при данном вакууме. Также устройство не должно иметь внешних электромагнитных полей, выходящих за корпус.

Хорошо работает цилиндр Фарадея, снабженный «трехсеточным» дискриминирующим устройством (рис. 3).

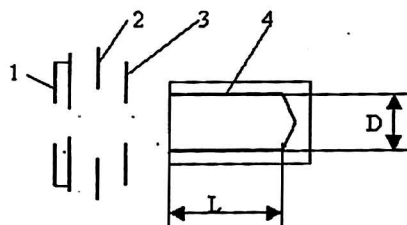


Рис. 3. «Трехсеточный» дискриминатор

Диаметр входного отверстия измерителя составляет 5 мм. На запирающую сетку 3 (диафрагму) подается отрицательный потенциал, отсекающий вторичные электроны. Диафрагма 2 создает градиент электрического поля заданной величины, который тормозит ионы исследуемой энергии. Диафрагма 1 служит для экранирования полей измерительного устройства от внешнего пространства. Напряжение на тормозящей диафрагме 2 изменяется от 0 до 4 кВ.

Результаты, полученные с помощью описанных устройств, носят интегральный характер, и для получения энергетического спектра необходимо про дифференцировать полученную зависимость, используя известные математические методы. Запирающее напряжение разбивается по шагам. Для каждого шага делают измерение величины ионного тока. Затем для каждой ступеньки запирающего напряжения ЭВМ находит среднее значение ионного тока и строит график зависимости изменения ионного тока от дискретного запирающего напряжения.

Если движение частиц с определенной энергией U_0 упорядоченно, то распределение ионов описывается функцией Максвелла:

$$f(U) \sim \exp[-e(U^{1/2} - U_0^{1/2})^2 / kT_b],$$

где kT_b — температура ионного пучка.

Используя нелинейную программу аппроксимации кривой с применением метода наименьших квадратов, оптимизируют значение kT_b для получения лучшего соответствия экспериментальным данным. Положительные ионы, находящиеся в газовом объеме, где происходит электрический разряд, имеют распределение по скоростям, видимо, в большинстве случаев отличное от статистики Максвелла-Больцмана. Поэтому использование применительно к ионам соотношений, аналогичных приведенным, строго говоря, неправильно. Однако в приближенных расчетах такими соотношениями часто пользуются, поскольку нет точных данных о распределении ионов по скоростям [2].

Непосредственно получать сигналы, пропорциональные энергии ионов, позволяет схемотехнический способ (рис. 4).

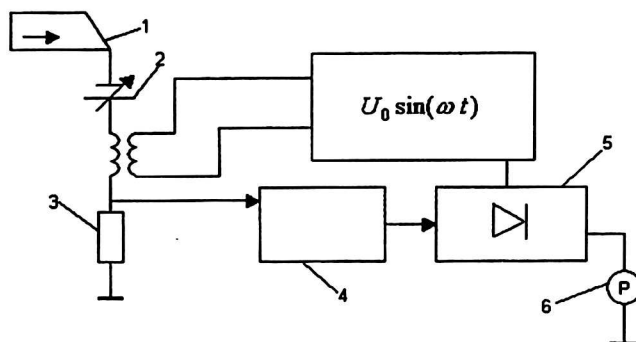


Рис. 4. Измерение тока ионов заданной энергии:

1 — коллектор ионов; 2 — источник регулируемого напряжения; 3 — измерительный резистор; 4 — узкополосный фильтр; 5 — синхронный детектор; 6 — измерительный прибор

С помощью источника регулируемого напряжения 2 устанавливаем величину энергии ионов, ток которых регистрируется прибором 6. Для получения величины тока ионов заданной энергии накладываем на напряжение смещения переменное напряжение U_0 . Переменная составляющая тока через измерительный резистор 3 детектируется детектором 5 и выделяется на измерительном приборе 6. Измеренная величина и будет показывать величину тока ионов, обладающих заданной энергией. Чем меньше амплитуда U_0 , тем выше разрешающая способность по энергиям. При малых значениях U_0 для дополнительного повышения чувствительности метода можно использовать синхронный детектор с частотой модуляции в диапазоне 400—1000 Гц.

Непосредственно увидеть в реальном масштабе времени полный спектр энергии ионов позволяет метод, описанный ниже (рис. 5).

Генератор пилообразного напряжения управляет источником высокого напряжения. Пилообразное высокое напряжение подается на коллектор одного из описанных выше устройств. Ионный ток снимается с измерительного резистора. Далее усиливается усилителем с полосой пропускания 3 кГц. Полученный сигнал поступает на дифференцирующий каскад. После него получаем сигнал, пропорциональный изменению ионного тока (тока ионов, обладающих одной энергией), т. е. распределение ионного тока по энергиям.

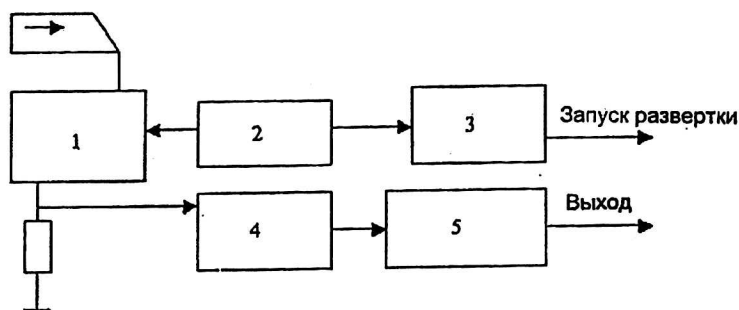


Рис. 5. Схема получения энергетического спектра ионов:

1 — регулируемый источник высокого напряжения; 2 — генератор пилы; 3 — синхроимпульсы ($\tau \sim 2$ мс); 3 — усилитель ФНЧ (0—3 кГц); 4 — дифференцирующий каскад ($F = 30$ кГц)

С помощью такого устройства исследовался энергетический спектр ионного пучка источника "Ион-2" на серийной вакуумной установке ВУ-1А. На расстоянии 200 мм от катодов ионного источника помещался цилиндр Фарадея, снабженный "трехдиафрагменным" дискриминирующим устройством. Камера откачивалась до 0,001 Па и в рабочем режиме находилась при давлении 0,02 Па (рис. 6).

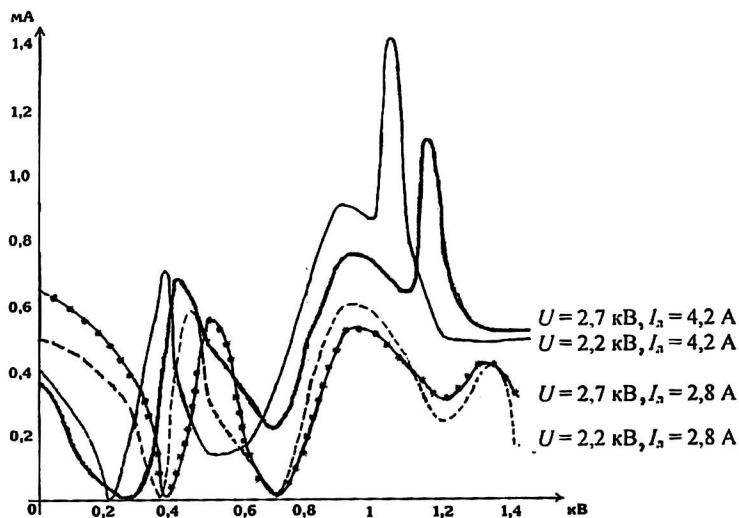


Рис. 6. Энергетический спектр ионного источника "ИОН-2"

Ионный источник "ИОН-2" исследовался на получение низких энергий (до 1 кэВ). Из полученных кривых видно, как влияет ток линзы ионного источника на энергию ионов. При токе линзы 2,8 А ионный пучок расфокусирован и до цилиндра Фарадея большие энергии не доходят. При токе линзы 4,2 А ионный пучок сфокусирован, более плотный и имеет большие энергии (на рисунке не показаны). Наличие нескольких пиков можно объяснить взаимным соударением ионов на пути от источника до цилиндра Фарадея. Данное устройство, расположенное на заслонке ионного источника, позволяет правильно выбрать режим работы ионного источника для каждого конкретного материала, особо чувствительного к энергии ионов.

Л и т е р а т у р а

1. Ковальский Г. А. Электрическая плазма в газовом разряде — М.: Изд-во МИРЭА, 1983.
2. Ворончев Т. А., Соболев В. Д. Физические основы электровакуумной техники. — М.: Высшая школа, 1967.

The monitoring system of low energy spectrum ion beams

A. N. Kozlov, V. D. Smolyaninov, A. P. Eremin
Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

A. M. Filachev
State Scientific Center NPO "Orion", Moscow, Russia

Constraining reason ion technology use, is absence of control equipment important parameters of ion beams. As a result of it technological repeatability in ion processing materials is not provided. Energy of ions is the important parameter of ion beam. This work is told about the designed monitoring system and analysis of ion power spectrum. The current measurements with the help of locking potential have integrated characteristic. For reception density a current of the ions having energy, given in locking potential, we impose on this potential AC voltage. Recording part of the device allocates a variable component of ion current. Detecting the received voltage we shall receive a signal proportional to ion current. The given system correctly has allowed to choose modes of processing and to increase technological repeatability.