#### УДК 533.93

# ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ИМПУЛЬСНОГО ИОННОГО ПУЧКА ВРЕМЯПРОЛЕТНЫМ МЕТОДОМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Ю.И. Исакова, А.И. Пушкарев, В.А. Тарбоков

Томский политехнический университет

E-mail: aipush@mail.ru

Предложена методика оперативного контроля параметров ионного пучка, формируемого импульсным генератором мощных ионных пучков ТЕМП-4М в режиме магнитной самоизоляции, ускоряющее напряжение 200...250 кВ, плотность ионного тока 20...40 А/см<sup>2</sup>. Использована времяпролетная диагностика на основе одного быстродействующего датчика-цилиндра Фарадея с магнитной отсечкой. Методика позволяет определить состав пучка (тип ионов и кратность ионизации), абсолютные значения плотности тока ионов и энергетический спектр для каждого типа ионов с погрешностью не хуже ±10 %.

#### Ключевые слова:

Ионный пучок, времяпролетный метод, состав пучка, энергетический спектр, цилиндр Фарадея.

#### Key words:

Ion beam, time-of-flight method, beam composition, energy distribution, Faraday cup.

Совершенствование продукции машиностроения затруднено без применения новых прогрессивных технологических процессов, позволяющих повысить ресурс и надежность деталей и узлов в самых жестких условиях эксплуатации. Этим вызвано развитие методов поверхностного упрочнения лазерным излучением, электронным пучком, ионной имплантацией, мощными ионными пучками (МИП) и др. Воздействие ионным пучком гигаватной мощности с плотностью энергии 0,5...1 Дж/см<sup>2</sup> обеспечивает нагрев поверхностного слоя обрабатываемого изделия со скоростью 10<sup>9</sup> К/с и охлаждение со скоростью 10<sup>8</sup>...10<sup>10</sup> К/с, что позволяет получать в поверхностных слоях составы и наноразмерные структуры, недоступные ни одному из традиционных металлургических способов. В результате улучшаются свойства материалов: твердость, прочность, износостойкость; повышаются эксплуатационные характеристики изделий из них. Ионный состав и энергетический спектр МИП определяет глубину модифицированного слоя обрабатываемого изделия и величину удельного энерговыделения. Поэтому в процессе оптимизации режима обработки изделия важно контролировать состав и количественное соотношение ионов в пучке.

Методику измерения состава ионного пучка при ускорении ионов в электрическом поле и их пространственном разделении посредством магнитного поля впервые предложил в 1913 г. J. Tomson. В 1919 г. Е.W. Aston сконструировал прототип современного магнитостатического масс-спектрометра. Для регистрации ионов с большой массой в спектрометре Томсона необходимо использовать магнитное поле с индукцией более 1...5 Тл, что увеличивает габариты и массу прибора. Детальную информацию о составе пучка, энергетическом разбросе групп ионов в спектрометре Томсона получают с использованием с трековой диагностики на основе пластиков [1]. Однако обработка регистрирующих пластин требует много времени и не позволяет оперативно контролировать параметры

пучка. Использование в спектрометре Томсона фоточувствительных полупроводниковых матриц (для регистрации пространственного разделения ионов) затруднено в высоковольтных источниках ионных пучков и при регистрации МИП с плотностью тока выше 10 А/см<sup>2</sup> из-за вероятности разрушения фоточувствительных элементов.

Идея времяпролётного масс-анализатора принадлежит W. Stephens, предложившему конструкцию прибора в 1946 г. [2]. Первый анализатор был построен W. Wiley и I. MacLaren в 1955 г. [3]. К достоинствам времяпролетных масс-анализаторов относится высокий верхний порог детектируемой массы иона, ограниченный только резким уменьшением чувствительности ионного детектора. Состав МИП определяют времяпролетным методом с использованием двух измерителей ионного тока, установленных на разном расстоянии от диода [4]. В работе [5] представлен более подробный обзор истории развития времяпролётных масс-спектрометров с момента их изобретения до настоящего времени.

Использование быстродействующего цилиндра Фарадея и широкополосного осциллографа позволяет оперативно контролировать ионный пучок с использованием только одного датчика, установленного на достаточном расстоянии от диода. Цель выполненной работы — разработка методики оперативного контроля параметров ионного пучка наносекундной длительности.

#### 1. Экспериментальная установка

Исследования были проведены на ускорителе ТЕМП-4 [6] в режиме формирования двух импульсов — первый отрицательный (≈100 нс, 100...150 кВ) и второй положительный (80 нс, 200...250 кВ). Состав пучка: ионы углерода и протоны, плотность ионного тока на мишени 20...150 А/см<sup>2</sup>, частота импульсов 5–10 имп./мин. Ускоритель состоит из емкостного накопителя генератора импульсных напряжений, наносекундного генератора и вакуумного диода с магнитной самоизоляцией. Наносекундный генератор выполнен в виде коаксиальной двойной формирующей линии с жидким диэлектриком (водой), волновое сопротивление 4,5 Ом, содержит основной и предварительный газовые разрядники. Для оптимизации процесса формирования взрывоэмиссионной плазмы на поверхности потенциального электрода конструкция ускорителя ТЕМП-4 была модернизирована [7]. Блок-схема диодного узла модернизированного ускорителя ТЕМП-4М, схема измерения напряжения и плотности ионного тока в полосковом диоде с самоизоляцией показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема диодного узла: 1) потенциальный электрод диода, 2) заземленный электрод, 3) колимированный цилиндр Фарадея, 4) пояс Роговского, 5) делитель напряжения

Ток диодного узла измеряли поясом Роговского с обратным витком. Плотность ионного тока определяли коллимированным цилиндром Фарадея (КЦФ) с магнитной отсечкой электронов (0,4 Тл). Напряжение на потенциальном электроде контролировали резистивным делителем напряжения, установленным в диодной камере, и высокочастотным высоковольтным делителем, установленным перед диодным узлом. Электрические сигналы с датчиков регистрировали осциллографом Tektronix 3052В (500 МГц, 5·10<sup>9</sup> отсч./с). Погрешность синхронизации электрических сигналов не превышала 0,5 нс. Калибровка диагностического оборудования показала, что оно корректно отражает работу ускорителя в режиме короткого замыкания и при работе на активную нагрузку 6...10 Ом (ускоряющее напряжение 150...250 кВ). Точность измерения напряжения, полного тока диода, плотности ионного тока, частотные характеристики диагностического оборудования позволяют рассчитать импеданс диода и параметры ионного тока с погрешностью не хуже ±10 %.

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы, характеризующие работу диодного узла ускорителя ТЕМП-4М.



Рис. 2. Осциллограммы: 1) ускоряющего напряжения, 2) полного тока, 3) плотности ионного тока плоского диода с самоизоляцией. Зазор 8 мм, расстояние до КЦФ 18 см

Исследования выполнены на плоском диоде площадью 20×4 см<sup>2</sup>. Потенциальный электрод изготовлен из графита, заземленный электрод – из нержавеющей стали с прорезями шириной 4 мм, прозрачность 60 %. Зазор между потенциальным и заземленным электродами выбирался из условия согласования импеданса диода с волновым сопротивлением двойной формирующей линии и составлял 7,5...8 мм. Полосковый диод с магнитной самоизоляцией эффективно работал при давлении 0,1 Па с ресурсом более 10<sup>5</sup> импульсов. Частота генерации импульсов МИП ограничивалась только тепловым режимом диода.

## 2. Исследование состава пучка

Для анализа состава ионного пучка, формируемого диодом, использовали явление пространственного разделения разных ионов по пути движения от диода до регистрирующего устройства -КЦФ. При ускорении в анод-катодном зазоре диода ионы разной массы и степени ионизации приобретают разную скорость. Предполагается, что в диоде ионы разных типов формируются синхронно в течение импульса ускоряющего напряжения, и на пути дрейфа их скорость не меняется. Плотность ИОНОВ пучка, формируемого ускорителем ТЕМП-4М, менее  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>, поэтому вероятность их столкновения (и изменения скорости) в пространстве дрейфа низка. Для каждого момента времени генерации ионного пучка по величине напряжения, приложенного к диоду (шаг 0,4 нс), рассчитывали плотность тока определенного типа ионов и величину времени задержки прихода этих ионов в КЦФ. Расчетные кривые сопоставляли с экспериментальными данными.

Задержка сигнала, вызванная движением ионов от диода до КЦФ, равна:

$$\Delta t = \frac{D}{v_i},\tag{1}$$

где D – расстояние от КЦФ до заземленного электрода диода;  $v_i$  – скорость ионов.



**Рис. 3.** Осциллограммы: 1) напряжения и 2) плотности ионного тока в плоском диоде. Расчетная плотность тока: кривая 3 – для протонов; кривая 4 – для ионов С<sup>+</sup>. Расстояние до КЦФ: а) 14; б) 17 см

При прохождении анод-катодного промежутка диода ион приобретает кинетическую энергию, равную:

$$E = \frac{m_i v_i^2}{2} = z U,$$
 (2)

где U – напряжение, приложенное к диоду;  $m_i$  – масса иона; z – заряд иона в Кл.

Из соотношений (1) и (2) получим выражение для расчета задержки прихода ионов в КЦФ:

$$\Delta t = D \sqrt{\frac{m_i}{2zU}}.$$
(3)

В режиме ограничения объемным зарядом, в нерелятивистском приближении, с учетом расширения плазменной эмиссионной поверхности величина плотности ионного тока определяется соотношением Чайлда—Ленгмюра [8].

$$J_{uou} = \frac{4\alpha \,\varepsilon_0 \sqrt{2z}}{9\sqrt{m_i}} \frac{U^{3/2}}{(d_0 - vt)^2},\tag{4}$$

где  $d_0$  — начальный зазор анод-катод;  $\varepsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость; v — скорость расширения плазмы;  $\alpha$ =1,86 в ионном режиме диода, когда электронно-ионные потоки в межэлектродном зазоре достигают предельных величин.

Скорость расширения взрывоэмиссионной плазмы при расчетах по соотношению (4) определяли по импедансу диода по методике [9]. На рис. 3 приведены типичные осциллограммы ускоряющего напряжения (второй импульс) и плотности ионного тока. С увеличением расстояния от диода до КЦФ задержка ионного тока относительно ускоряющего напряжения увеличивается. При этом экспериментальные значения плотности ионного тока и расчетные по соотношениям (3) и (4) также хорошо совпадают (рис. 3,  $\delta$ ). Отсутствие изменения состава пучка, формируемого плоским дио-

дом, в процессе транспортировки подтверждает корректность использования разработанной методики для диагностики МИП, генерируемым ускорителем ТЕМП-4М.

## 3. Определение энергетического спектра ионов

Энергетический спектр ионов является одним из важнейших параметров МИП, определяющих его распределение по глубине при поглощении в конденсированной среде. Разработанная методика позволяет оперативно контролировать спектр отдельно для каждого типа ионов. В этом случае для каждого значения ускоряющего напряжения, регистрируемого осциллографом (шаг 0,4 нс), по соотношению (3) рассчитывали временную задержку и строили кривую изменения кинетической энергии определенного типа ионов, синхронную с осциллограммой сигнала с КЦФ. На рис. 4 приведены расчетные значения для ионов углерода, генерируемых в диоде с магнитной самоизоляцией (данные рис. 3,  $\delta$ ).



Рис. 4. Изменение в процессе генерации ионного пучка: 1) плотности ионного тока и 2) кинетической энергии ионов

Полученные данные позволяют определить распределение ионов по энергии. Энергетические спектры ионов, формируемые плоским и фокусирующим диодами, приведены на рис. 5.



Рис. 5. Спектры плотности ионов 1) С<sup>+</sup>и 2) протонов, формируемых плоским диодом

Выполненные исследования энергетического спектра ионов, формируемых ускорителем ТЕМП-4М в режиме магнитной самоизоляции показали, что основная часть ионов углерода и протонов

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бойко В.И., Скворцов В.А., Фортов В.Е., Шаманин И.В. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.
- Stephens W.E. A Pulsed Mass Spectrometer with Time Dispersion // Phys. Rev. – 1946. – V. 69. – № 12. – P. 691–692.
- Wiley W.C., MacLaren I.H. Time-of-Flight Spectrometer with Improved Resolution // Rev. Sci. Instr. 1955. V. 26. № 12. P. 1150–1157.
- Москалев В.А., Сергеев Г.И. Измерение параметров пучков заряженных частиц. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
- Mamyrin B.A. Time-of-flight mass spectrometry (concepts, achievements, and prospects) // International Journal of Mass Spectrometry. – 2001. – V. 206. – № 3. – P. 251–266.

имеет кинетическую энергию более 150 кэВ. Доля низкоэнергетичных ионов не превышает 15...20 %.

## Заключение

Предложена методика оперативного контроля параметров ионного пучка, формируемого импульсным генератором в режиме магнитной самоизоляции при ускоряющем напряжении 200...250 кВ и плотности ионного тока 20...40 А/см<sup>2</sup>. Использована времяпролетная диагностика на основе одного быстродействующего датчика-цилиндра Фарадея с магнитной отсечкой.

Методика позволяет определить состав пучка и абсолютные значения суммарной плотности ионов и плотности ионов разной массы и кратности ионизации, энергетический спектр каждого типа ионов с погрешностью не хуже  $\pm 10$ %. При контроле параметров пучка не требуется сложное оборудование и длительная обработка результатов измерений. Методика апробирована на импульсном ионном ускорителе ТЕМП-4М, формирующем ионный пучок сложного состава мощностью 6....8 ГВт с интегральной плотностью до  $2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 08-08-12086.

- Remnev G.E., Isakov I.F., Pushkarev A.I., et al. High Intensity Pulsed Ion Beam Sources and Their Industrial Applications // Surf. and Coatings Technol. – 1999. – V. 114. – P. 206–212.
- Патент 86374 РФ. МПК<sup>8</sup> Н05Н 9/00. Импульсный ионный ускоритель / А.И. Пушкарев, В.А. Тарбоков, Р.В. Сазонов. Заявлено 27.04.2009; Опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24. – 5 с.: ил.
- Langmuir I. The Effect of Space Charge and Residual Gases on Thermionic Currents in High Vacuum // Phys. Rev. – 1913. – V. 2. – P. 450–455.
- Pushkarev A.I., Sazonov R.V. Research of Cathode Plasma Speed in Planar Diode With Explosive Emission Cathode // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2009. – V. 37. – № 10. – Part 1. – P. 1901–1907.

Поступила 03.02.2010 г.