

ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОР ИОНОВ С МАГНИТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ ЗАРЯДОВ

Б.Е. Дашевский, В.А. Подвязников, А.М. Прохоров, В.К. Чевокин

Разработан времяпролетный энергоанализатор ионов с магнитным разделением зарядов, предназначенный для диагностики лазерной плазмы. Приведены основные характеристики и пример его использования в эксперименте.

Времяпролетные анализирующие системы являются наиболее развитой диагностической техникой для изучения распределения ионов лазерной плазмы по скоростям. Для получения информации о всем энергетическом спектре за одну лазерную вспышку такие системы требуют наличия многих детекторов /1/. К тому же они часто лишены временного разрешения /2/. В данной работе сообщается о разработке на базе ионного ЭОП /3/ времяпролетного энергоанализатора ионов с магнитным разделением зарядов, позволяющего за одну лазерную вспышку зарегистрировать энергетический спектр ионов плазмы с высоким разрешением по энергии.

Принцип работы устройства иллюстрирует рис. 1. Разделение ионов и электронов происходит на сетке у границы вакуумной камеры. Далее ионы проходят сквозь апертурную щель и попадают в магнитное поле, образованное двумя постоянными магнитами, которое отклоняет их вдоль направления входной щели ЭОП. Система юстируется таким образом, что изображение лазерной плазмы проецируется сквозь апертурную щель в нижний край входной щели ЭОП. Поэтому на экране видна точка, вызванная попаданием на фотокатод ЭОП рентгеновского излучения лазерной плазмы. Положение ее служит репером для проведения временных измерений. Размер апертурной щели составляет 300 мкм, размер входной щели ЭОП 8 мм × 100 мкм. Апертурная щель и магниты находятся под потенциалом фотокатода.

При продольном размере магнита l_B и в плече отклонения l_0 величина отклонения у ионов в направлении щели ЭОП в условиях малого угла отклонения есть

$$y = l_B l_0 (ZeB/M) (v_0^2 + 2ZeU/M)^{-1/2}, \quad (1)$$

где v_0 – скорость иона у входа в анализатор, M – масса иона, U – потенциал фотокатода ЭОП, e – заряд электрона, B – индукция магнитного поля. В данном эксперименте $l_B = 20$ мм, $l_0 = 50$ мм, так что для регистрации ионов кратности от $Z = 1$ до $Z = 4$ при высоте щели ЭОП 8 мм из (1) получаем $B \lesssim 0,36\sqrt{AU}$ кГс, где A – атомный вес иона, U измеряется в киловольтах. Для фиксированного значения магнитного поля изменением потенциала фотокатода от 1,5 до 4,5 кВ можно установить необходимую область дисперсии энергоанализатора при изменении массы регистрируемых ионов. В случае перехода к мишени из материала с атомным весом, отличающимся от веса предыдущей мишени более чем в 3 раза, требуется изменение напряженности магнитного поля.

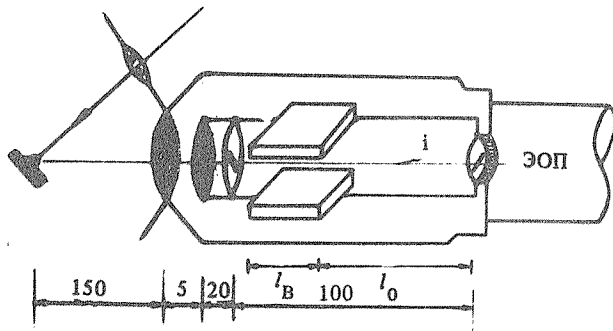


Рис. 1. Схема времяпролетного энергоанализатора ионов с магнитным разделением зарядов.

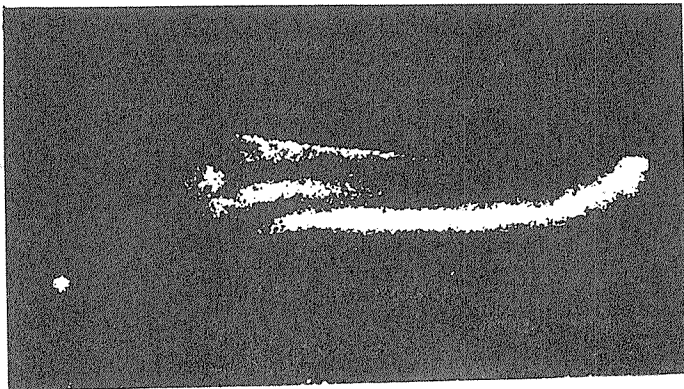
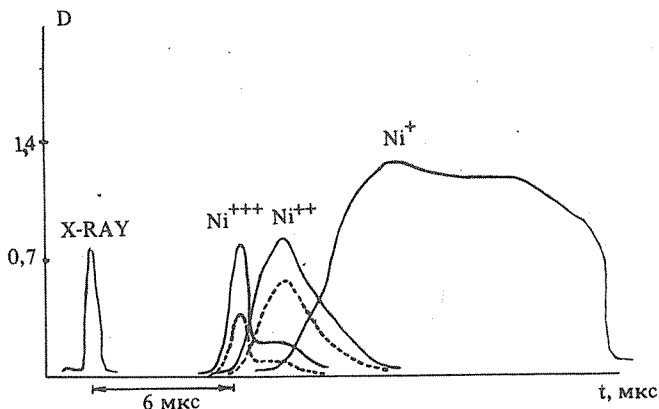


Рис. 3. Микрофотограмма спектра ионов никелевой плазмы. Пунктиром показано число 2-х и 3-хкратно ионизованных ионов никеля с учетом квантовой эффективности фотокатода к ионам различной кратности.

Рис. 2. Фотография временного хода спектра ионов никелевой плазмы.



С уменьшением магнитного поля линейно снижается дисперсия анализатора и уменьшается разрешение по заряду. В отсутствие фокусировки ионного пучка при ширине апертурной щели 300 мкм аппаратная функция энергоанализатора не может быть много меньше 1 мм. Основной причиной уширения пучка с высокой плотностью ионного тока I является его кулоновское расплывание из-за объемного заряда. Оценим величину уширения. Согласно [4]

$$\Delta d/d \approx 1,2 \cdot 10^6 l^2 (A/Z)^{1/2} I (E_i/Z)^{-3/2},$$

где $l = l_A + l_B$ — в сантиметрах, E_i — энергия иона в килоэлектронвольтах, I — в A/cm^2 . Для $l = 7$ см, $I \approx 3 \cdot 10^{-4} A/cm^2$ — плотность тока ионной компоненты никелевой плазмы (взята из коллекторных измерений) с $Z = 1$ и $E_i = 3$ кэВ получим $\Delta d \approx d$, что говорит о существенности данного механизма уширения ионного пучка.

Из (1) получаем значения массового и зарядового разрешения, полагая $\Delta d = 1$ мм: $Z/\Delta Z = M/\Delta M = y(M, Z, U, V)/2\Delta d$. В данном энергоанализаторе углы дисперсии малы и величина отклонения пучка в магнитном поле составляет $y(M, Z, U, V) \approx 10$ мм. Это позволяет получить разрешение $Z/\Delta Z = M/\Delta M \approx 5 - 10$. Таким образом, разработанная зарядоанализирующая система с магнитным отклонением дает возможность раздельно регистрировать ионные компоненты лазерной плазмы с зарядом $Z < 5$ и с разницей масс ионов, превышающей 10–20%.

Кулоновское расплывание ионного пакета в продольном направлении ограничивает разрешение системы по времени пролета и, следовательно, по кинетической энергии ионов, входящих в анализатор, $E_i/\Delta E_i \approx v_0/2\Delta v_0 = t/2\Delta t$. Временное размытие ионного пакета с продольным размером Δl можно записать в виде $\Delta t = \Delta l/v_0 = t_A \Delta l/(l_A + l_B)$, где t_A — время пролета ионов в энергоанализаторе, обычно не превышающее 1 мкс. Положив $\Delta l = 1$ мм, находим требуемое временное разрешение ЭОП $\Delta t < 10$ нс, которое реализовано [3]. Для времен пролета ионов $t \sim 20$ мкс в данном приборе может быть достигнуто энергетическое разрешение $E_i/\Delta E_i \gg 10^3$, тогда как другие системы обеспечивают разрешение порядка 100 на гораздо больших пролетных базах [1].

На рис. 2 показана фотография временного хода спектра ионов никелевой лазерной плазмы при следующих параметрах лазерного импульса: $\lambda = 1,06$ мкм, $E = 10$ мДж, $\tau = 0,1$ нс. На рис. 3 показан энергетический спектр ионов, полученный после фотометрирования. Следует отметить, что в данной конструкции временное разрешение ЭОП не ограничивает энергетического разрешения системы, что дает возможность дальнейшего совершенствования прибора и применения его в экспериментах, где увеличение времени пролета ионов невозможно.

Разработанный энергоанализатор ионов может найти применение в экспериментах по диагностике лазерной плазмы.

Авторы благодарны А.В. Прохиндееву за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быковский Ю. А., Неволин В. Н. Лазерная масс-спектрокопия. М., Энергоиздат, 1985.
2. Olsen J. N., Kuswa G. W., Jones E. D. J. Appl. Phys., 44, 2275 (1973).
3. Дашевский Б. Е. и др. Письма в ЖТФ, 14, 1454 (1988).
4. Сысоев А. А., Чупахин М. С. Введение в масс-спектрокопию. М., Атомиздат, 1977.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 19 декабря 1988 г.