

04;10

## О сепарации по массам квазинейтральных пучков

© А.И. Морозов, Н.Н. Семашко

ИЯС РНЦ „Курчатовский институт“, Москва

Поступило в Редакцию 11 июля 2002 г.

Уточнена рабочая схема процесса сепарирующей системы, в которой квазинейтральный поток смеси ионов разделяется на потоки частиц с равными массами.

1. Среди различных плазменных технологий сегодня значительное внимание уделяется созданию в плазме электрических полей различных конфигураций и направленностей. На одной стороне этих разработок находятся проблемы кильваторного ускорения (малые времена, гигантские напряженности полей), а на другой — плазмооптика с ее стационарными  $E$ -полями относительно небольшой напряженности ( $\sim 100 \div 1000$  V/cm). Здесь речь будет идти об одной из плазмооптических систем (ПОС).

Принципы ПОС были сформированы А.И. Морозовым в [1] и затем развивались в теоретических и экспериментальных работах [2,3].

Так были созданы плазмооптические линзы, рекуператоры, плазменные ускорители, в том числе космические плазменные двигатели [4].

Главным достоинством ПОС является их способность управлять сильноточными квазинейтральными пучками с помощью не только магнитных, но и электростатических полей. Для этого должно всюду выполняться (при  $T_e \rightarrow 0$ ) условие взаимной ортогональности электрического и магнитного полей, т. е. должно быть [1,3]:

$$\Phi = \Phi(\gamma), \quad (1)$$

здесь  $\gamma$  — индекс магнитной силовой линии. Условие (1), как правило, не согласуется с уравнением Лапласа ( $\Delta\Phi = 0$ ) для вакуумных полей. Однако в ряде случаев  $\Phi(x)$  удовлетворяет и (1), и  $\Delta\Phi = 0$ . В этом случае ПОС называют транзитивной. Транзитивные системы строго реализуются в следующих случаях: если магнитные силовые линии —



Схема осесимметричного сепаратора.

прямые или — в случае осевой симметрии — направлены по радиусам. Кроме этого, транзитивны могут быть и системы с плоскими полями.

2. Среди ПОС особый интерес представляют сепарирующие системы, в которых квазинейтральный поток смеси ионов разделяется на потоки частиц с равными массами (мы считаем все ионы однократно заряженными). В [2] описана одна принципиальная система транзитивного сепаратора, который мы ниже будем называть МСПО („масс-сепаратор плазмооптический“).

Эта схема имеет три важные особенности (см. рисунок):

- Система осесимметрична, а поля  $(\mathbf{E}, \mathbf{H})$  полоидальны, дрейф электронов азимутальный замкнутый, а источник потока ионов — кольцевой.

- На входе в „фокусирующее пространство“ находится азимутатор с достаточно сильным радиальным магнитным полем. В результате, если перед азимутатором скорость частицы была  $\mathbf{v}_0 = (v_{or}, 0, v_{oz})$ ,

причем  $v_{or} \ll v_{oz} \approx v_0$ , то после прохождения азимутатора она будет равна  $\mathbf{v}_1 = (v_{or}, v_\theta, v_z)$ , причем  $v_\theta^2 + v_z^2 = v_0^2$ . При этом в силу закона сохранения момента  $rv_\theta = -\frac{e}{c} \frac{\psi}{M}$ :

$$\psi = \delta(rA_z). \quad (2)$$

Азимутальная компонента скорости, приобретаемая частицей после прохождения азимутатора, при условии  $v_{\theta 0} \approx 0$  зависит только от массы частиц.

• Пройдя азимутатор, частицы попадают в ФП — фокусирующее пространство. Это пространство ограничено двумя коаксиальными цилиндрами, на которые поданы разные потенциалы. Это поле не влияет на движение вдоль  $Z$ , а по отношению к  $v_z$  и  $v_\theta$ , т.е. в плоскости  $(r, \theta)$  оно способно фокусировать частицы, как в энергоанализаторе Юза–Рожанского, т.е. на протяжении азимута  $\delta\theta = \pi/\sqrt{2}$ . Очевидно, соответственно будет иметь место фокусировка в координатах  $(r, z)$ . Для обеспечения электрического поля в ФП при наличии квазинейтральных пучков необходимо создать в его объеме однородное продольное магнитное поле, которое должно обеспечить выполнение условия (1), или замагнитить электроны. Для этой цели достаточно поле порядка нескольких десятков эрстед, которое практически не повлияет на динамику ионов. Поэтому кольцевой фокус будет находиться от азимутатора на расстоянии

$$L = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{v_{1z}}{v_{1\theta}}.$$

3. Уточним описанную схему рабочего процесса. Если обозначить через  $R_0$  радиус щели в азимутаторе, то электрическое поле на этом радиусе ее вычитается так, чтобы для некоей „центральной“ массы  $M_0$  выполнялось условие равновесия

$$\frac{M_0 v_{\theta 0}^2}{R_0} = eE_0.$$

Сместившись по азимуту на  $\pi/\sqrt{2}$ , частицы „центральной“ массы фокусируются при том же  $r = R_0$ . Однако частицы с  $M > M_0$  и с  $M < M_0$  фокусируются соответственно при  $r < R_0$  и  $r > R_0$ . Для масс, близких к  $M_0$ , смещение фокуса по  $r$  равно

$$\delta r = R_0 \frac{(-\delta M)}{M_0}, \quad M = M_0 + \delta M.$$

Расчеты показывают, что МСПО может обеспечить при соответствующем выборе размеров „панорамную“ сепарацию масс в одной установке от  $M \sim 50$  до  $M \sim 200$  а.е.м.

При этом предъявляются достаточно скромные требования к параметрам потока, выходящего из источника.

4. Эксперименты, проводимые с плазменными ускорителями типа плазменных двигателей, показывают, что плотность ионного потока на входе из таких ускорителей может быть  $\leq 1$  А/см<sup>2</sup> при  $M \sim 100$  а.е.м, а энергия частиц  $\sim 100 \div 1000$  еV. Если взять  $\sim R = 1.0$  м, а ширину потока  $\sim 1$  см, то суммарный ионный ток будет  $\sim 700$  А. При этих параметрах суммарная масса ( $M \sim 100$  а.е.м), перерабатываемая за год одним МСПО, будет приблизительно 10–15 тонн, разумеется, если неустойчивости радикально не испортят рабочий процесс.

Авторы благодарят своих коллег А.П. Шубина, В.В. Савельева, В.К. Наумова за участие в работе. Они благодарны В.П. Смирнову за доброжелательное и заинтересованное отношение к данным вопросам.

## Список литературы

- [1] Морозов А.И. // ДАН СССР. 1965. Т. 163. № 6. С. 1363.
- [2] Морозов А.И., Лебедев С.В. // Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А. Леонтовича. В. 8. М.: Атомиздат, 1974. С. 247.
- [3] Морозов А.И. // Энциклопедия низкотермальной плазмы. Т. III. / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. С. 435.
- [4] Морозов А.И. // Там же. С. 443.