

ПЛАЗМООПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Авторы: А. И. Морозов

ПЛАЗМООПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, плазменные устройства для фокусировки потока заряженных частиц с помощью электрического и/или магнитного полей, созданных самой плазмой. П. с. изучает плазмооптика в отличие от [электронной и ионной оптики](#), рассматривающей фокусировку пучков заряженных частиц внешними электрич. и магнитными полями в вакууме.

Первыми электронно-оптич. системами были источники сильноточных электронных пучков. Англ. учёными И. [Ленгмюром](#), К. Чайлдом и Дж. Пирсом подробно разработаны основы оптики пучков частиц с объёмным зарядом и установлен закон «трёх вторых», введён «плазменный масштаб» – дебаевский радиус (см. [Ленгмюра формула](#)). В 1947 О. Шерцер впервые использовал объёмный заряд пучка для ослабления сферич. аберрации.

В 1946–49 Г. В. Спивак с сотрудниками (СССР) обнаружил и систематически исследовал фокусировку магнитной линзой направленного потока электронов, эмитированных катодом ртутной дуги. Тогда же был разработан пром. электромагнитный способ разделения изотопов урана с помощью сильноточных ионных пучков, использующий для фокусировки квазиоднородное поперечное магнитное поле. В таком сепараторе объёмный заряд быстрых ионов практически компенсирован холодными электронами, возникающими при столкновении ионов с атомами остаточного газа. Образующиеся при этом медленные ионы выталкиваются небольшим положительным зарядом пучка на стенки камеры, т. е. здесь реализуется также и газовая фокусировка, для которой нужно некоторое оптимальное давление в камере.

В 1945–47 Д. [Габор](#) сформулировал идею и попытался реализовать т. н. линзу с объёмным зарядом (рис. 1). В объём квазиоднородного магнитного поля с пробками

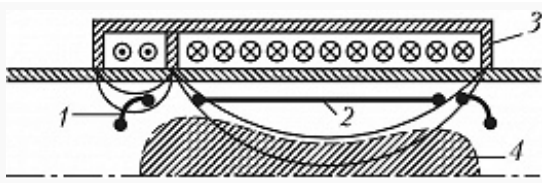


Рис. 1. Схема линзы с объёмным зарядом: 1 – горячий катод; 2 – анод; 3 – магнитопровод; 4 – электронное облако.

(см. [Открытые ловушки](#)) впрыскиваются электроны из катода. При малой напряжённости магнитного поля, нужного лишь для удержания электронов, фокусировка ионов в линзе Габора осуществляется объёмным зарядом электронов, концентрация которых n_e много больше концентрации ионов n_i . Если

n_e постоянна в объёме линзы (а этого специально добивались), то напряжённость электрич. поля

E_r пропорциональна радиусу линзы

r и линза не должна создавать aberrаций. Высокая подвижность электронов плазмы приводит к выравниванию электрич. потенциала вдоль магнитных силовых линий произвольной конфигурации вне зависимости от того, является система квазинейтральной (

$n_i \approx n_e$) или нет. В этом случае каждая силовая линия магнитного поля служит своеобразным электродом, на который можно подать свой потенциал и, варьируя конфигурацию магнитных силовых линий, создать в системе требуемое

распределение потенциала. Подобные системы, в которых распределение потенциала задаётся, а не определяется уравнением Лапласа, называются «собственно П. с.». К ним можно отнести линзу Габора и

Z-пинчи, в которых приосевая зона используется для фокусировки и транспортировки релятивистских электронных и сильнооточных ионных пучков. Реально приращение потенциала

$\Delta \Phi$ вдоль силовой линии невелико при небольшой и слабо меняющейся в пространстве темп-ре

T_e электронов (

$\Delta \Phi \sim \Delta T_e / e + T_e D n_e / e n_e$, e – заряд электрона).

Схемы осн. типов П. с. приведены на рис. 2. На рис. 2,а схематически изображён ускоритель ионов, которые в облаке электронов, формирующих электрич. поле и компенсирующих объёмный заряд ускоряемых ионов, движутся от более высокого

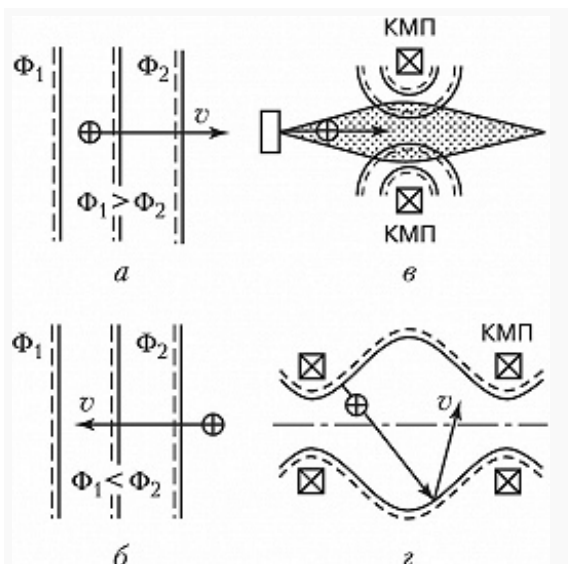


Рис. 2. Схемы плазмооптических систем: а – ускоритель компенсированных ионных потоков (КИП); б – рекуператор энергии КИП; в – плазменная линза для фокусировки КИП; г – магнитоэ...

потенциала Φ_1 в область меньшего потенциала Φ_2 . Слабое магнитное поле воздействует в осн. на электроны и не влияет на динамику ионов. Такая схема реализована в ряде [плазменных ускорителей](#), в т. ч. в плазменных электрореактивных двигателях. На рис. 2, б представлена схема полей в рекуператоре, в котором поток первоначально энергичных ионов тормозится, отдавая энергию в электрич. цепь. Схема фокусирующей плазменной линзы представлена на рис. 2, в. Эта схема применяется не только для фокусирующих и дефокусирующих систем, но и для энергомассанализаторов разл. мощностей, систем транспортировки ионов и др. На рис. 2, г изображена схема магнитоэлектростатич.

ловушки, в которой электроны удерживаются магнитным, а ионы – электрич. полем.

Среди П. с. широкое распространение, наряду с плазменными ускорителями, получили плазменные линзы. Наиболее высокие оптич. характеристики этих линз (минимум aberrаций) были получены в двух режимах: в квазидебаяевском («габоровском») и в режиме с внешним разрядом.

В квазидебаяевском режиме диаметр отверстия линзы

d выбирается меньше [дебаяевского радиуса экранирования](#) ионов, но много больше дебаяевского радиуса экранирования электронов. Этот режим устойчив при плотностях тока ионов до нескольких десятков mA/cm^2 , а при высоких плотностях в таких линзах развиваются неустойчивости.

Режим с внешним разрядом может быть реализован в геометрии, близкой к схеме Габора, но по концам цилиндрич. промежутка располагаются два электрода, между которыми в продольном магнитном поле зажигается [Пеннинга разряд](#). Если в квазидебаяевском режиме в плазменном объёме находятся (в идеале) только

фокусируемые ионы, то во втором случае фокусируемые ионы находятся в разрядной плазме и составляют малую часть общего числа ионов.

Экспериментально плазменная линза в квазидебавевском режиме с электронами, образующимися за счёт вторичной ионно-электронной эмиссии, впервые была подробно изучена в 1970-х гг. на установке, на которой исследовалась фокусировка ионов с энергией до 10 кэВ и током до 10 мА. Напряжённость магнитного поля составляла ок. $(8-16) \cdot 10^3$ А/м. Плазменной линзой удалось сфокусировать квазинейтральный пучок ионов; причём линзу можно было делать как собирающей, так и рассеивающей. Фокусное расстояние плазменной линзы было существенно меньше фокусного расстояния электростатич. линзы. Подавая на электроды соответствующее распределение потенциалов, можно было устранить сферич. aberrацию.

Особенно эффективными плазменные линзы оказались для фокусировки тяжёлых ионов с энергией порядка 1 МэВ, для которых ранее использовались громоздкие квадрупольные линзы. Были созданы плазменные линзы с уникальными параметрами, которые могли фокусировать пучок ионов с энергией 4 МэВ в фокальное пятно размером ок. 10 мкм.

Литература

Лит.: Gabor D. A space-charge lens for the focusing of ion beams // Nature. 1947. Vol. 160. № 4055; Морозов А. И. Фокусировка холодных квазинейтральных пучков в электромагнитных полях // Доклады АН СССР. 1965. Т. 163. № 6; Жуков В. В., Морозов А. И., Щепкин Г. Я. Экспериментальное исследование плазменной фокусировки ионных пучков // Физика и применение плазменных ускорителей. Минск, 1974; Морозов А. И., Лебедев С. В. Плазмооптика // Вопросы теории плазмы. М., 1974. Вып. 8; Lefevre H. W. a. o. Can an electron plasma lens produce sub-micrometer size focal spots of MeV ions? // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1985. Sect. B. Vol. 10–11. Pt. 2.