

Краткие сообщения

12

О возможности комбинированной фокусировки пучка нейтральных частиц в вакууме осесимметричными магнитными и электрическими полями

© Н.И. Штепа

Черниговский государственный педагогический университет им. Т.Г. Шевченко, 250038 Чернигов, Украина

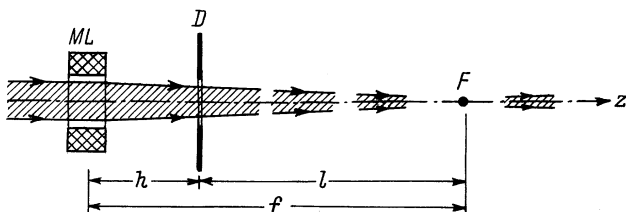
(Поступило в Редакцию 28 сентября 1998 г.)

Рассматривается возможность комбинированной — поперечной и продольной фокусировки цилиндрического однородного пучка мелких ($10^{-1} - 10^{-4}$ см) нейтральных частиц диамагнетиков в вакууме с помощью короткой магнитной линзы и переменного электрического поля диафрагмы.

Под действием постоянных осесимметричных магнитных [1], электрических полей [2] возможна обычная (поперечная) фокусировка в вакууме мелких ($10^{-1} - 10^{-4}$ см) нейтральных частиц. В [3] показано, что с помощью переменного периодического осесимметричного электрического поля однородный пучок нейтральных частиц можно преобразовать в поток их сгустков, достигающих в продольном направлении максимального сжатия (продольной фокусировки) на определенном (фокусном) расстоянии.

Идея комбинированной фокусировки (одновременно поперечной и продольной) пучка нейтральных частиц осложняется тем, что переменное электрическое поле совместно с продольной фокусировкой производит и обычную (поперечную) изменяющуюся со временем фокусировку. Последняя вносит искажения в основную поперечную фокусировку, создаваемую постоянными осесимметричными магнитными или электрическими полями. Устранить полностью такое искажение невозможно, однако его можно существенно уменьшить подходящим выбором параметров фокусировок.

Рассмотрим комбинированную фокусировку однородного цилиндрического пучка нейтральных мелких ($10^{-1} - 10^{-4}$ см) частиц диамагнетика в вакууме под действием соосных короткой магнитной линзы ML , формирующей поперечную фокусировку, и переменного электрического поля диафрагмы D с малым круглым отверстием, формирующей продольную фокусировку (см. рисунок). Пусть частицы пучка, движущиеся вдоль оси



симметрии, имеют одинаковую начальную скорость v_0 . Постоянное магнитное поле линзы локализовано на осевом интервале $z_1 \leq z \leq z_2$ с заданной осевой напряженностью $H = H(z)$. За магнитной линзой расположена плоская диафрагма с радиусом отверстия R . Фокусирующее нейтральные частицы поле диафрагмы локализовано вблизи ее отверстия в интервале $z_3 \leq z \leq z_4$, размер которого порядка размера отверстия. До и после указанного интервала поле диафрагмы в статическом режиме однородное с напряженностями $E_3 = 0$ и $E_4 = E = \text{const} \neq 0$. Распределение его потенциала вдоль оси [4]

$$\Phi(z) = \Phi_0 - \frac{1}{\pi} ER \left(\frac{|z|}{R} \arctg \frac{|z|}{R} + 1 \right) - \frac{1}{2} Ez,$$

где Φ_0 — потенциал в центре диафрагмы, z отсчитывается от этого центра.

Осевое распределение переменного поля диафрагмы $\varphi = \varphi(z, t)$ задается в виде [3]

$$\varphi(z, t) = \Phi(z) \cdot \eta(t),$$

где $\eta = \eta(t)$ — периодическая функция с периодом T .

Под действием такого поля диафрагмы частицы пучка формируются в поток сгустков, которые достигают максимального продольного сжатия (в продольном фокусе) на одинаковых расстояниях l ($l \gg T \cdot v_0$) от диафрагмы при условии, что

$$\eta(t) \simeq A\sqrt{t},$$

где

$$A = \frac{\sqrt{2} \cdot v_0^{3/2}}{\sqrt{\frac{3(\varepsilon - 1)}{4\pi\rho(\varepsilon + 2)} E^2 \cdot l}},$$

ρ — плотность частиц, ε — их относительная диэлектрическая постоянная.

Предположим, что поперечная фокусировка частиц производится только магнитной линзой, т.е. когда поперечной фокусировкой диафрагмы можно пренебречь.

Тогда при условии $f = l + h$, где f — фокусное расстояние магнитной линзы, h — расстояние между магнитной линзой и диафрагмой, фокусы F обеих фокусировок совпадут. Сгустки частиц в них окажутся максимально сжатыми в поперечном и продольном направлениях и произойдет их комбинированная фокусировка. Так как [1]

$$f = \frac{16\pi v_0^2(\mu + 2)\rho}{9(1 - \mu) \cdot \int_{z_1}^{z_2} H'^2 \cdot dz},$$

где $H' = \partial H / \partial z$, а μ — относительная магнитная проницаемость частиц, то условие такой фокусировки примет вид

$$\frac{16\pi v_0^2(\mu + 2)\rho}{9(1 - \mu) \cdot \int_{z_1}^{z_2} H'^2 dz} = \frac{8\pi \rho v_0^3(\varepsilon + 2)}{3(\varepsilon - 1)A^2 E^2} + h,$$

откуда следует, что комбинированная фокусировка не зависит от размера частиц.

Поскольку при принятых ограничениях $|z_1 - z_2| \ll f$, $|z_3 - z_4| \ll l$, то магнитную линзу и диафрагму можно настолько сблизить, чтобы $h \ll f$, l и считать $h \approx 0$. При этом комбинированная фокусировка не будет зависеть и от плотности частиц. Однако для частиц различной плотности ρ ее фокусные расстояния ($l = l(\rho)$) разные, они тем больше, чем больше плотность.

Проведенный анализ комбинированной фокусировки, как было отмечено, справедлив при условии, что вносимым искажением за счет поперечной фокусировки диафрагмы можно пренебречь, т. е. справедливо неравенство

$$\left| \frac{1}{f_0} \right| \ll \frac{1}{f} = \frac{1}{l},$$

где f_0 — фокусное расстояние поперечной фокусировки диафрагмы.

Учитывая, что [2]

$$\frac{1}{f_D} \approx -\frac{9(\varepsilon - 1)}{16\pi(\varepsilon + 2)\rho v_0^2} \cdot \int_{z_3}^{z_4} \varphi''^2(z, t) dz \quad (\text{при } \dot{z} \approx v_0)$$

и

$$\frac{1}{l} = \frac{3(\varepsilon - 1)A^2 E^2}{8\pi \rho(\varepsilon + 2)v_0^3},$$

отмечаем

$$\left| \frac{1}{f_0} \right| \sim \frac{t}{v_0^2} \quad \text{и} \quad \frac{1}{l} \sim \frac{1}{v_0^3}.$$

Это значит, что приведенное неравенство можно удовлетворить за счет уменьшения периода переменного электрического поля T (так как $0 \leq t \leq T$) и скорости частиц пучка v_0 .¹ Кроме того, учитывая различные

¹ Количество частиц в сгустке пропорционально v_0 и T , поэтому указанные условия приводят к их уменьшению.

зависимости f_0 и l от осевого распределения переменного электрического поля, путем оптимального выбора его параметров (для диафрагмы E и R) можно также улучшить качество комбинированной фокусировки.

В заключение отметим, что комбинированная фокусировка мелких нейтральных частиц осесимметричными магнитными и электрическими полями в вакууме возможна в первом приближении.

Список литературы

- [1] Штена Н.И. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 9. С. 1839–1845.
- [2] Штена Н.И. // ЖТФ. 1966. Т. 36. Вып. 3. С. 470–481.
- [3] Штена Н.И. // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 10. С. 2139–2142.
- [4] Рустерхольц А. Электронная оптика. М.: ИЛ, 1932. С. 49.