

Из (6) следует, что для уменьшения добротности рабочего вида колебаний не более чем на 10 % необходимо выполнение условия

$$|l| \geq 1.5\gamma_{12} \sqrt{k}, \quad (7)$$

где $k=d_1/d_2$ при $d_1 \gg d_2$ и $k=d_2/d_1$ при $d_1 \ll d_2$.

На основе соотношения (7) можно построить графики зависимости требуемой величины расстройки l как функции γ для различных k , которые приведены на рис. 2, б. Эти графики позволяют по заданным значениям γ и k определять допустимую в области собственной частоты рабочего вида колебаний плотность спектра, при которой взаимодействие рабочего колебания с соседними еще не сказывается на его добротности. Например, для ниобиевых СПР с $\gamma \approx 10^{-5} - 10^{-4}$ и $k \approx 10^3 - 10^4$ значение l должно быть не менее $5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$, т. е. абсолютная величина расстройки частот должна составлять $\sim (5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}) f_0$, где f_0 — собственная частота рабочего вида колебаний.

Таким образом, полученные в работе соотношения и графики позволяют по заданным допускам на отклонения формы СПР от идеальной определять соответствующие значения коэффициента межвидовой связи и на их основе устанавливать допустимую в области собственной частоты рабочего вида колебаний плотность спектра, при которой межвидовая связь еще не сказывается на добротности рабочего вида колебаний.

В заключение авторы выражают благодарность Ю. Г. Юшкову за постоянный интерес и внимание к работе.

Список литературы

- [1] Диденко А. Н., Севрюкова Л. М., Ятис А. А. Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ структуры. М.: Энергоиздат, 1981. 208 с.
- [2] Штейншлейгер В. Б. Явления взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах. М.: Оборонгиз, 1955. 112 с.
- [3] Мандельштам Л. И. Лекции по колебаниям. Полн. собр. тр. М.: Изд-во АН СССР, 1950. Т. IV.

Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском политехническом институте им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию
23 мая 1988 г.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ПЛАЗМООПТИЧЕСКИХ ЛИНЗ

В. А. Манеев

В работах, посвященных рассмотрению плазмооптических линз (ПОЛ) (или имеющих другое название, использующих эффект эквипотенциализации силовых линий магнитного поля в объеме линзы) [1-3], приводятся формулы, позволяющие оценить их фокусное расстояние F . Так, в [1]

$$F = \frac{UR}{2\Phi} \frac{1}{\Theta}, \quad (1)$$

где Φ — потенциал, поданный на линзу; U — ускоряющий потенциал частиц пучка; R — радиус магнитной катушки; Θ — геометрический фактор, имеющий величину порядка единицы.

В работах [2, 3] была сделана попытка раскрыть смысл геометрического фактора и уточнить выражение (1)

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{2R}{L} \rightarrow [2], \quad (2a)$$

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{2r_{\text{эл}}^2}{Rl} \rightarrow [3], \quad (2b)$$

где L — длина катушки, создающей магнитное поле; l — длина цилиндрического электрода, на который подается потенциал Φ , а $r_{\text{эл}}$ — его радиус.

Формулы (2) могут использоваться для оценок фокусного расстояния только линз типа линзы Габора [4], имеющих длинную соленоидальную катушку и длинный цилиндрический электрод. Однако для линз другого типа магнитная система может быть бронированной, а электроды могут иметь вид тонких колец ($r_{\text{эл}}/l < 1$) [5], поэтому для них выражения (2) не могут дать достоверной оценки F , что затрудняет применение таких устройств и в большинстве случаев не позволяет даже в первом приближении оценить величину электрического поля, необходимую для фокусировки пучков.

Рассмотрим ПОЛ, представленную на рисунке. K — катушка, создающая магнитное поле, которую представим в виде бесконечно тонкого кольца с током (для бронированных магнитных систем — это достаточно точное приближение); радиус катушки определяет эффективную «длину» линзы; \mathcal{E} — центральный электрод (на который подается потенциал Φ) из системы электродов, служащих для задания распределения потенциала φ электрического поля в объеме устройства по закону [1]

$$\varphi = a\psi, \quad (3)$$

где ψ — функция магнитного потока, a — константа.

Для «тонкой» плазмооптической линзы, согласно [1], фокусное расстояние можно записать как

$$\frac{1}{F} = \frac{ea}{mv_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} H(z) dz = \frac{2}{2U} \int_{-\infty}^{+\infty} H(z) dz, \quad (4)$$

где e , m , v_0 — соответственно заряд, масса частиц пучка и их начальная скорость; $H(z)$ — распределение напряженности магнитного поля на оси симметрии с максимальным значением H_0 : $H(z) = H_0 R^2 / (R^2 + z^2)^{3/2}$. Тогда

$$F = \frac{U}{aRH_0}, \quad (5)$$

Определим константу a . Вследствие (3)

$$a = \frac{\Phi}{\Psi_{\text{эл}}} = \frac{\Phi}{r_{\text{эл}} A_{\theta_{\text{эл}}}}, \quad (6)$$

где $\Psi_{\text{эл}}$, $A_{\theta_{\text{эл}}}$ — значения функции магнитного потока и азимутальной компоненты векторного потенциала на электроде соответственно.

$$A_{\theta_{\text{эл}}} = \frac{4}{\pi} \frac{H_0 R}{1+b} \left[D(k) - \frac{1}{2} K(k) \right], \quad (7)$$

где $k^2 = 4b/(1+b)^2$, $b = r_{\text{эл}}/R$, $D(k)$, $K(k)$ — полные эллиптические интегралы.

Для реальных ПОЛ значение b заключается в пределах $0.1 \leq b \leq 0.7$, что определяется чисто конструктивными соображениями. Выражение (5) можно переписать в виде

$$F = \frac{4}{\pi} \frac{UR}{\Phi} \frac{b}{1+b} \left[D(k) - \frac{1}{2} K(k) \right], \quad (8a)$$

или

$$F = \frac{UR}{2\Phi} F', \quad (8б)$$

$$F' = \frac{1}{\Theta} = \frac{8}{\pi} \frac{b}{1+b} \left[D(k) - \frac{1}{2} K(k) \right]. \quad (9)$$

Пользуясь представлением эллиптических интегралов в виде рядов, можно получить следующие выражения, позволяющие оценить F' :

$$F' = \frac{3}{16} \frac{1+b}{k^2} \left(\ln \frac{1}{k'^2} - k^2 \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) \right), \quad b < 0.3, \quad (10a)$$

$$F' = \frac{1}{8\pi} (1+b) \left(\ln \frac{4}{k'} (4 + k'^2) - (8 - k'^2) \right), \quad b \geq 0.3, \quad (10б)$$

где $k'^2 = 1 - k^2 = (1-b)^2 / (1+b)^2$.

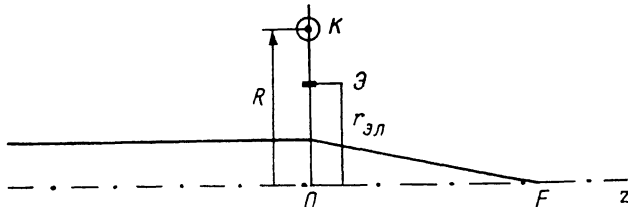
На основании анализа поведения зависимостей (10) можно предложить более простые формулы, позволяющие с высокой точностью (относительно (8)) определить фокусное расстояние ПОЛ, например

$$F^* = \frac{b^2}{1 - b^2(1 - b^2)}, \quad (11)$$

которая в диапазоне изменения $0.1 \leq b \leq 0.5$ дает погрешность менее 1 %, а в диапазоне $0.5 < b \leq 0.7$ максимальную погрешность при $b \approx 0.6$ менее 2.5 %; или

$$F^* = \frac{b^2}{1 - b^2}, \quad (12)$$

дающую несколько худшие результаты: для $0.1 \leq b \leq 0.4$ погрешность не превышает 1 %, с ростом b она увеличивается, при $b=0.5$ составляет ~ 3 % и при $b=0.7$ достигает 20 %.



Видно, что геометрический фактор в общем случае отличен от единицы и имеет величину, близкую к ней, лишь для отдельных специальных геометрий ПОЛ. Так, для линз габоровского типа должны выполняться соотношения либо $L=2R$, либо $l=2r_{эл}^2/R$, а для бронированных — $r_{эл}=0.8R$ — ситуация, близкая к предельной по конструктивным соображениям.

Если считать траекторию приосевой частицы в области линзы обрезанной косинусоидой, то для «толстой» ПОЛ можно получить расстояние от центра линзы до точки фокуса в виде

$$F_{ц} = R \left(1 + \sqrt{c} \operatorname{ctg} 2 \sqrt{\frac{1}{c}} \right), \quad (13)$$

где $c=F'U/\Phi$, а в качестве F' можно выбрать какое-либо из приведенных выше выражений.

Расчеты на ЭВМ фокусировки плазмооптическими линзами квазинейтральных ионных пучков (КИП) показали, что формулы (8), (13) как для «тонких», так и для «толстых» линз дают несколько заниженные (на 5...7 %) значения фокусных расстояний.

Список литературы

- [1] Морозов А. И., Лебедев С. В. // Вопросы теории плазмы. М.: Атомиздат, 1974. Вып. 8. С. 247—381.
- [2] Booth R., Lefevre H. W. // Nucl. Instr. Meth. 1978. Vol. 151. N 1, 2. P. 143—147.
- [3] Mobley R. M., Gammel G., Maschke A. W. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1979. Vol. NS-26. N 3. P. 3112—3114.
- [4] Gabor D. // Nature. 1947. Vol. 160. N 4055. P. 89—90.
- [5] Габович М. Д., Гасанов И. С., Проценко И. М. Препринт ИФ АН УССР. № 82/8. Киев, 1982.

Поступило в Редакцию
10 ноября 1988 г.

ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ ТРЕХКАНАЛЬНЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ РАЗВЕТВИТЕЛЬ

С. И. Божевольный, П. С. Радько

Многоканальные делители оптического излучения являются необходимыми компонентами различного рода интегрально-оптических устройств [1-4]. Электрически управляемый многомодовый трехканальный разветвитель [2] практически невозможно эффективно согла-