вод. Такая конструкция напоминает сегнетоэлектрические элементы с управляемой диэлектрической проницаемостью [2], но принцип управления здесь иной.

При возрастании управляющего напряжения $E_у$ пластина расширяется, зазор Δ постепенно уменьшается и полностью перекрывается при $E_у = E_{кр}$ (рис. 1, *а*). При этом затухание участка волновода, содержащего керамический элемент, увеличивается, как показано на рис. 1, *б*, построенном по экспериментальным данным. Измерения проводились на частоте 9,4 *Ггц* ($\lambda_0 = 3{,}2$ *см*) в стандартном прямоугольном волноводе сечением 10×23 *мм*^{2}. Длина элемента вдоль волновода составляла 1,1 *мм*. Для уменьшения величины начального затухания при $E_у = 0$ производилось согласование элемента при помощи реактивных штырей.

Увеличение затухания при уменьшении зазора можно объяснить возрастанием эффективного значения диэлектрической проницаемости и потерь участка волновода, заполненного керамическим элементом. Для волновода с двухслойным диэлектриком (керамика + воздух) в случае малого воздушного зазора эффективные значения диэлектрической проницаемости и потерь определяются следующими выражениями:

$$\varepsilon \simeq \frac{b\varepsilon_к}{b + \varepsilon_к\Delta}, \qquad \operatorname{tg}\delta \simeq \frac{b \operatorname{tg}\delta_к}{b + \varepsilon_к\Delta} \tag{1}$$

где b — высота волновода; $\varepsilon_к$ — диэлектрическая проницаемость керамики и $\operatorname{tg}\delta_к$ — тангенс угла потерь керамики.

Зависимость этих величин от напряженности управляющего поля $E_у$ показана пунктиром на рис. 1, *в*. Величины $\varepsilon_к$ и $\operatorname{tg}\delta_к$ получены экспериментально, эффективные значения ε и $\operatorname{tg}\delta$ рассчитаны по формулам (1). Рис. 1, *в* приводится для пояснения полученной экспериментально характеристики (рис. 1, *б*) управления затуханием волновода. Поскольку величина диэлектрической проницаемости керамики очень велика, то даже небольшие изменения воздушного зазора в значительной степени влияют на параметры волновода, содержащего такой сегнетоэлемент.

В данной конструкции большое значение имеет также изменение условий отражения сигнала СВЧ от электрострикционного элемента, расположенного поперек волновода. Это подтверждается как экспериментально, так и расчетным путем. При определении параметров прямоугольного волновода, перегороженного сегнетоэлектрической пластинкой, были получены расчетные соотношения [3] для величины затухания α в случае полного согласования и для затухания $\varkappa$ несогласованной пластинки. При больших значениях ε расчет затухания волновода, содержащего сегнетоэлектрическую пластинку, можно проводить по упрощенным формулам:

$$\underset{дб}{\alpha} \simeq 8{,}69\,\frac{2\pi d}{\lambda_0}\sqrt{\frac{1}{2}\,\varepsilon\left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta} - 1\right)}, \tag{2}$$

$$\underset{дб}{\varkappa} \simeq 10 \lg\left[\frac{e^{2\gamma d} + 4z - 1}{4ze^{\gamma d}}\right]^2, \tag{3}$$

где d — толщина пластинки; λ_0 — длина волны в вакууме; z — волновое сопротивление волновода с сегнетоэлектриком; γ — постоянная распространения. Величины z и γ можно рассчитывать по ε и $\operatorname{tg}\delta$. Параметры керамики $\varepsilon_к$ и $\operatorname{tg}\delta_к$ определяются из эксперимента [4]. При толщине пластинки 0,11 *см* и $\lambda_0 = 3{,}2$ *см* расчет по формулам (1)—(3) приводит к следующим результатам: при $E_у = 0$ $\alpha = 1{,}8$ *дб* и $\varkappa = 16$ *дб*; при $E_у = 6$ *кв/см* $\alpha = 9{,}6$ *дб* и $\varkappa = 40$ *дб*. Различие расчетных и экспериментальных (рис. 1, *б*) данных можно объяснить погрешностью измерений и недостаточно полным согласованием сегнетоэлемента в волноводном тракте.

Таким образом, управление мощностью проходящего сигнала может осуществляться не только изменением затухания электрострикционного элемента, но и изменением отражений от этого элемента, которое обусловлено изменением эффективного значения ε. При этом, безусловно, изменяется и коэффициент стоячей волны (КСВ): если при $E_у = 0$ после согласования КСВ $\simeq 1{,}2$, то при $E_у = 6$ *кв/см* КСВ возрастает до 2,5. Для некоторых устройств это может оказаться нежелательным. В таком случае нужно более тщательно конструировать согласующие устройства, например, можно осуществлять самосогласование электрострикционного элемента при изменении $E_у$ [3].

Согласно данным рис. 1, *б* величина затухания волновода в зависимости от управляющего напряжения изменяется от 2 до 12 *дб*. Для других электрострикционных элементов подобной конструкции эта величина достигала 20 *дб*. Экспериментально были исследованы не только статические характеристики управления (рис. 1, *б*), но также была осуществлена амплитудная модуляция сигнала СВЧ синусоидальным напряжением 50 *гц* — 5 *кгц*. Амплитудная модуляция происходила [illegible]ния. Коэф-

фициент модуляции составлял 50—60%. Специальные измерения не проводились, однако быстродействие такого устройства в импульсном режиме может достигать, по-видимому, 10^5—10^6 *гц*. Следует также отметить, что конструкция модулятора проста, а мощность, расходуемая на управление, весьма мала, так как элемент является емкостной нагрузкой (10—80 *пф*). Напряженность управляющего поля, как следует из приведенных характеристик, довольно велика. Однако величина управляющего напряжения зависит от конструкции элемента и может быть существенно понижена увеличением числа электродов, как описано в работе [2].

Таким образом, большая электрострикция некоторых сегнетоэлектриков может быть использована при конструировании электрически управляемых устройств СВЧ, например, для амплитудных модуляторов, переключателей и управляемых аттенюаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Н. Вербицкая, Докл. АН СССР, 1953, 114, 3, 533.
2. Ю. М. Поплавко, Радиотехника и электроника, 1962, 7, 8, 1458.
3. Ю. М. Поплавко, Радиотехника, 1963, 18, 10, 22.
4. Ю. М. Поплавко, Изв. вузов МВССО СССР (Радиотехника), 1963, 6, 1, 83.

Киевский ордена Ленина политехнический институт

Поступило в редакцию 12 XII 1962
После переработки 19 VIII 1963

УДК 537.291

КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

О. Я. Савченко

Теория подобия однокомпонентных систем в настоящее время хорошо развита [1]. Целью настоящего сообщения является расширение теории подобия однокомпонентных систем на многокомпонентные.

Если система состоит из N сортов частиц, характеризуемых зарядами e_i и массами μ_i, то она может быть описана функциями действия S_i и плотностями ρ_i i-й компоненты (индекс i* пробегает значения от 1 до N) [2]. Но S_i и ρ_i при стационарном движении заряженных частиц в электростатическом поле $U(x, y, z)$ (если пренебречь их столкновениями и температурным разбросом скоростей) определяются уравнениями Гамильтона — Якоби [2]

$$\frac{1}{2\mu_i}\left\{\left(\frac{\partial S_i}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial S_i}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial S_i}{\partial z}\right)^2\right\} + e_i U(x, y, z) = 0, \tag{1}$$

уравнениями непрерывности

$$\operatorname{div} \rho_i \nabla S_i = 0, \tag{2}$$

уравнением Пуассона

$$\Delta U = 4\pi \sum_{1}^{N} \rho_i(x, y, z) \tag{3}$$

(сумма берется по всем N индексам), решенными при выполнении определенных граничных условий. Пусть $S_i(z, y, z)$ — решение системы уравнений (1)—(3) при следующих граничных условиях: вблизи поверхности F значения плотности электрических зарядов, потенциала и функции действия равны соответственно $\rho_i(F)$,

* Здесь и в дальнейшем индекс i означает, что приводится соотношение или берется выражение для всех N индексов i.

$U(F)$, $S_i(F)$. В этом случае $kS_i(x/l,\ y/l,\ z/l)$ — решение системы уравнений

$$\frac{1}{2\mu_i'}\left\{\left(\frac{\partial S_i'}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial S_i'}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial S_i'}{\partial z}\right)^2\right\}+e_i'mU\left(\frac{x}{l},\ \frac{y}{l},\ \frac{z}{l}\right)=0,$$

$$n\,\mathrm{div}\,\rho_i\left(\frac{x}{l},\ \frac{y}{l},\ \frac{z}{l}\right)\nabla S_i'=0, \tag{4}$$

$$m\Delta U\left(\frac{x}{l},\ \frac{y}{l},\ \frac{z}{l}\right)=4\pi n\sum_1^n\rho_i\left(\frac{x}{l},\ \frac{y}{l},\ \frac{z}{l}\right),$$

если постоянные коэффициенты k, l, m, n удовлетворяют соотношениям

$$m=nl^2,$$
$$k^2\mu_ie_i=ml^2\mu_i'e_i' \tag{5}$$

при условии, что $\rho_i'(lF)=n\rho_i(F)$, $U'(lF)=mU(F)$, $S_i'(lF)=kS_i(F)$. В этом нетрудно убедиться непосредственной подстановкой kS_i, $(x/l,\ y/l,\ z/l)$ в систему уравнений (4).

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что в двух геометрически подобных потенциальных полях траектории заряженных частиц подобны, если в соответствующих точках

$$\frac{\rho_iL^2}{U}=\frac{\rho_i'L'^2}{U'}=K_{i1},$$

$$\sqrt{\frac{\mu_i}{e_i}}\frac{j_iL^2}{U^{3/2}}=\sqrt{\frac{\mu_i'}{e_i'}}\frac{j_i'L'^2}{U'^{3/2}}=K_{i2} \tag{6}$$

(L и L' характеризуют линейные размеры системы, а j_i, j_i' — плотность тока i-й компоненты). Величины K_{i1}, K_{i2} могут служить константами подобия для стационарного движения системы заряженных частиц в электростатическом поле. В нестационарном случае движение частиц определяется уравнениями (4):

$$\frac{1}{2\mu_i}\left\{\left(\frac{\partial S_i}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial S_i}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial S_i}{\partial z}\right)^2\right\}+e_iU(x,y,z,t)=-\frac{\partial S_i}{\partial t}, \tag{7}$$

$$\mathrm{div}\,\rho_i(x,y,z,t)\nabla\ S_i(x,y,z,t)=\mu_i\frac{\partial\rho_i(x,y,z,t)}{\partial t}, \tag{8}$$

$$\Delta U(x,\ y,\ z,\ t)=4\pi\sum_1^N\rho_i(x,\ y,\ z,\ t). \tag{9}$$

Если $S_i(x,\ y,\ z,\ t)$ — решение системы уравнений (7)—(9), то $kS_i(x/l,\ y/l,\ z/l,\ t/a)$ будет решением системы

$$\frac{1}{2\mu_i'}\left\{\left(\frac{\partial S_i'}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial S_i'}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial S_i'}{\partial z}\right)^2\right\}+e_i'mU\left(\frac{x}{l},\ \frac{y}{l},\ \frac{z}{l},\ \frac{t}{a}\right)=-\frac{\partial S_i'}{\partial t}, \tag{10}$$

$$n\,\mathrm{div}\,\rho_i\left(\frac{x}{l},\ \frac{y}{l},\ \frac{z}{l},\ \frac{t}{a}\right)\nabla\ S_i'=n\mu_i'\frac{\partial\rho_i\left(\frac{x}{l},\ \frac{y}{l},\ \frac{z}{l},\ \frac{t}{a}\right)}{\partial t}$$

$$m\Delta U\left(\frac{x}{l},\ \frac{y}{l},\ \frac{z}{l},\ \frac{t}{a}\right)=4\pi n\sum_1^N\rho_i\left(\frac{x}{l},\ \frac{y}{l},\ \frac{z}{l},\ \frac{t}{a}\right)$$

в случае если

$$m=nl^2,$$
$$k^2\mu_ie_i=ml^2\mu_i'e_i',$$
$$\mu_i'l^2=k\mu_ia. \tag{11}$$

Это физически означает, что движение в двух системах подобно при $t'=t/a$, если при $t=t'=0$

$$a=\frac{j_iL^3U'}{j_i'L'^3U},\qquad \frac{\rho_iL^2}{U}=\frac{\rho_i'L'^2}{U'}=K_{i1t},$$

$$\sqrt{\frac{\mu_i}{e_i}}\frac{j_iL^2}{D^{3/2}}=\sqrt{\frac{\mu_i'}{e_i'}}\frac{j_i'L'^2}{U'^{3/2}}=K_{i2t}, \tag{12}$$

$$\frac{e_k\mu_i}{e_i\mu_k}=\frac{e_k'\mu_i'}{e_i'\mu_k'}=M_{ikt}.$$

Поэтому величины K_{i1t}, K_{i2t}, M_{ikt} могут служить константами подобия для нестационарного движения системы заряженных частиц в электрическом поле.

Автор выражает благодарность В. С. Лукошкову за ценные указания.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Лукошков, Сб. Электроника, 1958, 7, 8.
2. Л. Ландау, Л. Пятигорский, Механика, 1, ГИТТЛ, 1940.

Поступило в редакцию
26 XII 1962

УДК 621.385.833.032.262

ЮСТИРОВКА ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА ПРИ ПОМОЩИ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОЙ ПРИЗМЫ

П. А. Стоянов, Л. Ю. Вольфсон

Существующие способы юстировки оптической системы электронного микроскопа можно разделить на две большие группы. К одной группе следует отнести все механические способы юстировки (перемещения линз и других узлов микроскопа друг относительно друга), а к другой — юстировочные средства, основанные на использовании различного рода электронных призм. При этом аберрации призм не должны снижать разрешающую способность электронного микроскопа.

В микроскопах высокого разрешения целесообразно применять юстировочные устройства, входящие во вторую группу. Применение электронных призм открывает новые возможности для создания жесткой конструкции колонны микроскопа, обладающей высокой механической стабильностью [1]. Однако юстировка при помощи призм может оправдать себя только в том случае, если призмы работают стабильно.

Электронные призмы представляют собой электростатические или магнитные отклоняющие системы различной конструкции. Стабильность призмы зависит от стабильности ее источника питания. Для того чтобы призма не ухудшала разрешающую способность микроскопа, стабильность источника питания должна быть в некоторых случаях довольно высокой.

Изложенные выше соображения побудили нас исследовать конструкцию электронной призмы, которая наилучшим образом отвечала бы требованиям стабильности. Такой призмой может стать, в частности, магнитостатическая отклоняющая система [2], обладающая рядом несомненных преимуществ. Во-первых, она не нуждается в источнике питания. Во-вторых, ее стабильность практически идеальна. Затруднения возникают лишь при разработке способа регулировки угла преломления электронного пучка в призме.

Ниже излагаются результаты исследования магнитостатических призм и описывается конструкция призмы, в которой легко осуществить регулировку как величины угла преломления, так и ориентации (азимута) плоскости преломления.

На рис. 1 приведена схема модели магнитостатической призмы, на которой были исследованы ее свойства. Источником поля служит магнит *1*, состоящий из двух стальных колец (*1а* и *1б*), намагниченных по диаметру. Вращением этих колец друг