В.Л. ДЯТЛОВ, С.К. ДЕМЕНТЬЕВ

О КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОНА НА МАГНИТНОЙ ПЛЕНКЕ

О конструкции пленочного параметрона

Сущность предлагаемой конструкции можно уяснить из рис.I, на котором показаны две проекции параметрона. Рассматриваемая конструкция состоит из подложки (5), удлиненной вдоль оси y, на которой имеются два контакта (4). На одной стороне подложки снизу напыляется пермаллоевая пленка (I) и проводящая пленка (2), соединяющая контакты. С другой стороны подложки напыляется конденсатор параметрона, состоящий из двух проводящих (2) и одной диэлектрической (3) пленок.

Система пленок вместе с контактами образует колебательный контур, состоящий из пленочного конденсатора и индуктивности, величина которой определяется свойствами и размерами пермаллоевой пленки и размерами подложки.

В рассматриваемой конструкции не предусмотрено каких-либо проводников и контактов для создания возбуждающих переменного и постоянного магнитных полей в пермаллоевой пленке. Предполагается, что каждый параметрон располагается в некоторой полости, в которой создаются указанные поля, которые проникают в пермаллоевую пленку через проводящие пленки. Эти поля прикладываются вдоль оси y параметрона. Предполагается также, что ось легкого намагничивания пермаллоевой пленки создается вдоль оси y в процессе напыления.

2. Основные расчетные соотношения

Основные расчетные соотношения устанавливаются решением уравнений, описывающих параметрические колебания в пленочном параметроне. Эти уравнения получены в статье I:

$$n^2\frac{d^2\varphi}{d\theta^2}+\lambda\frac{d\varphi}{d\theta}+\frac{1}{2}\sin 2\varphi+(h_o+h\sin 2\theta)\sin\varphi - h_x\cos\varphi=0;$$

$$K_o h_x+K_1\frac{dh_x}{d\theta}+K_2\frac{d^2h_x}{d\theta^2}= -K_3\frac{d^2}{d\theta^2}\sin\varphi-K_4\frac{d}{d\theta}\sin\varphi, \tag{2}$$

где

$$n^2=\frac{J\omega^2}{\mu_o M H_\kappa}=\frac{(1+\alpha^2)\,\omega^2}{\mu_o^2\,\gamma^2 H_\kappa M};$$

$$\lambda=\frac{\alpha\,\omega}{\mu_o\gamma H_\kappa};\quad h_o=\frac{H_o}{H_\kappa};\quad h=\frac{H}{H_\kappa};$$

$$K_o=1+\frac{r'}{r};$$

$$K_1=\frac{\rho\mu_o S''\omega}{r}+Cr'\omega;$$

$$K_2=\rho\mu_o S''C\omega^2;$$

$$K_3=\frac{\rho\mu_o S'C\omega^2 M}{H_\kappa};$$

$$K_4=\frac{\rho\mu_o S'\omega M}{r\cdot H_\kappa}.$$

Здесь ω - круговая частота параметрических колебаний, $\theta=\omega t$,

где t - время;

α - коэффициент релаксации в уравнении Ландау-Лифшица-Гильберта,

$\mu_o\gamma$ = 22,2 · I0^{6}смa^{-I} сек$^{-I}$;

M - модуль магнитного момента;

H_κ - коэрцитивная сила вращения;

H_o - величина постоянного поля, направленного вдоль оси легкого намагничивания;

S' - площадь поперечного сечения пермаллоевой пленки (по оси y);

S'' - площадь поперечного сечения промежутка между пермаллоевой пленкой и обкладками конденсатора (по оси y);

C - емкость пленочного конденсатора;

r - эквивалентное диэлектрическим потерям сопротивление пленочного конденсатора;

r' - сопротивление проводящих пленок контура.

Если a - толщина, b - длина пермаллоевой пленки (вдоль оси y), то $S'=ab$.

Если a'' - толщина подложки, b'' - ее длина, то $S''=a''b''$.

Величина емкости C может быть подсчитана из соотношения:

$$C=\frac{\varepsilon_1\varepsilon_o b'c}{a'},$$

где a' - толщина диэлектрической пленки конденсатора;

b' - длина перекрытия пленочных обкладок конденсатора;

c - ширина пленочных обкладок;

ε_1 - действительная составляющая комплексной проницаемости диэлектрической пленки на частоте $f=\frac{\omega}{2\pi}$.

Величина сопротивления r может быть подсчитана из соотношения:

$$r=\frac{a'}{\omega\varepsilon_2\varepsilon_o b'c},$$

где ε_2 - мнимая составляющая комплексной проницаемости диэлектрической пленки на частоте $\frac{\omega}{2\pi}$.

Коэффициент ρ для рассматриваемой конструкции параметрона можно определить, исходя из условия, что $c\gg d$, где c - ширина пленочного полувитка индуктивности и одновременно ширина пленочных обкладок конденсатора, а d - расстояние между проводящими пленками конденсатора и полувитком. При этом условии

$$H_x=\frac{1}{c}i \quad \text{и} \quad \rho=\frac{1}{c}.$$

Сопротивление r' можно оценить по формуле:

$$r'\approx\frac{2b'}{\sigma c\cdot a'''},$$

где a''' - толщина проводящих пленок контура,

σ - проводимость этих пленок.

Потери энергии в параметроне характеризуют три параметра: λ, r и r'. Параметр λ характеризует потери энергии в пермаллоевой пленке, r' - потери в проводящих пленках, r - потери в диэлектрике конденсатора. Эти потери будут отсутствовать при $\lambda\to 0$, $r\to\infty$, $r'\to 0$.

Если, изменяя свойства диэлектрика конденсатора и изменяя толщины проводящих пленок, сопротивления τ и τ' можно изменять так, чтобы они не оказывали существенного влияния на работу параметрона, то параметр λ зависит от физических свойств пленки, и его величина получается довольно определенной при каждой данной частоте колебаний магнитного момента пленки.

Согласно экспериментальным результатам [3], для пермаллоевых пленок 80% Ni, 20% Fe

$$\alpha \cong 0{,}011 + \frac{26 \cdot 10^6}{\omega} .$$

Отсюда

$$\lambda = \frac{\alpha\omega}{\mu_0 \gamma H_\kappa} \cong \frac{1{,}2}{H_\kappa}$$

при $\omega \leqslant 2\pi \cdot 50 \cdot 10^6$ сек$^{-1}$.

Условия, при которых можно пренебрегать потерями в сопротивлениях τ' и τ относительно колебаний с частотой $\frac{\omega}{2\pi}$, можно получить из уравнения (2):

$$K_1 << |K_0 - K_1| ,$$

$$K_4 << |K_3| ,$$

откуда следует, что $C\omega\tau' << 1 - \rho\mu_0 S'' C\omega^2$

и $\quad C\omega\tau \gg 1 . \qquad (3)$

Однако имеется вполне определенный предел для уменьшения сопротивления τ' за счет увеличения размера a'''. В предлагаемых конструкциях параметронов пермаллоевая пленка экранирована проводящими пленками, и для проникновения поля в пермаллоевую пленку без амплитудных и фазовых искажений должно соблюдаться неравенство:

$$a''' << z_0 = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0 \sigma}}\ ^{1)} , \qquad (4)$$

где z_0 - глубина проникновения поля в среду с такими же электромагнитными параметрами, как и у проводящих пленок.

---

1) Условие (4) обеспечивает как малые амплитудные искажения, так и малые фазовые искажения поля, проникающего в пермаллоевую пленку через неферромагнитные проводящие пленки, так как при проникновении поля в металлы действительная и мнимая составляющие постоянной распространения равны.

Если принять $\sigma \cong 10^5$ ом$^{-1}$см$^{-1}$,

$\omega = 2\pi \cdot 30 \cdot 10^6$ сек$^{-1}$,

то $\quad z_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ см.

При выполнении условий (3) уравнение (2) будет иметь вид:

$$h_x + K_2 \frac{d^2 h_x}{d\theta^2} = -K_3 \frac{d^2}{d\theta^2} \sin\varphi . \qquad (5)$$

Из этого уравнения можно приближенно получить выражение для h_x, полагая $h_x \cong h'_x \sin\theta$:

$$h_x \cong -\nu^2 \frac{d^2}{d\theta^2} \sin\varphi , \qquad (6)$$

где $\quad \nu^2 = \frac{K_3}{1 - K_2} .$

Подставляя выражение для h_x из (6) в (I), можно получить такое уравнение:

$$n^2 \frac{d^2\varphi}{d\theta^2} + \nu^2 \cos\varphi \frac{d^2}{d\theta^2} \sin\varphi + \lambda \frac{d\varphi}{d\theta} +$$

$$+ \frac{1}{2}\sin 2\varphi + (h_0 + h\sin 2\theta)\cdot\cos\varphi = 0 . \qquad (7)$$

Это уравнение было решено на электронной вычислительной машине при различных значениях ν, λ и h и при $n = 0{,}1$ и $h_0 = 1$ ($H_0 = H_K$). Результаты этих решений приведены в статье 3.

Из результатов решений следует, что наиболее стабильные параметрические колебания получаются при $\nu \cong 0{,}95$ при $\lambda = 1 \div 0{,}5$, когда амплитуда колебаний $\varphi_m \cong 0{,}8$ и при $\nu \cong 0{,}9$, $\lambda \cong 0{,}5$, когда амплитуда колебаний $\varphi_m \cong 0{,}3$. Отсюда и из выражений для ν^2, K_2 и K_3, а также из других, приведенных выше соотношений, следует, что

$$\nu^2 = \frac{C L \omega^2}{1 - C L' \omega^2} \cong 0{,}9 \div 0{,}8 ,$$

где $\quad C = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 b' c}{a'} ,$

$$L = \frac{\mu_0 \mu a b}{c} ,$$

$$\mu = \frac{M}{H_\kappa} , \quad L' = \frac{\mu_0 a'' b''}{c} .$$

Напряжение на клеммах параметрона, которое совпадает с напряжением на емкости параметрона в рассматриваемой конструкции при сделанных выше допущениях, можно выразить формулой:

$$u = ab\frac{dB}{dt} = \mu_0 Mab\omega \frac{d}{d\theta}\sin\varphi .$$

При малых углах отклонений φ_m вектора намагниченности максимальное значение напряжения гармоники частоты $\frac{\omega}{2\pi}$ можно определить по формуле

$$u_m \cong \mu_0 ab\omega M\varphi_m . \qquad (9)$$

В обе расчетные формулы (8) и (9) не входит размер c. Это позволяет уменьшать этот размер до минимально возможного, тем самым уменьшая габариты параметрона, не изменяя, как следует из формулы (9), выходного напряжения. Однако при этом следует иметь в виду, что с уменьшением размера c будет как бы увеличиваться величина H_k на величину порядка $M\frac{a}{c}$ (если считать $c \ll b$). Действительно, при $c \ll b$ можно вычислить размагничивающий фактор для оси x магнитной пленки по формуле [2]:

$$N_x \cong \frac{abc}{16}\int_0^\infty \frac{ds}{(s+\frac{b^2}{4})\sqrt{(s+\frac{a^2}{4})(s+\frac{b^2}{4})(s+\frac{c^2}{4})}} \cong$$

$$\cong \frac{ac}{8}\int_0^\infty \frac{ds}{(s+\frac{b^2}{4})\sqrt{(s+\frac{a^2}{4})(s+\frac{c^2}{4})}} = \frac{ac}{c^2-a^2}\left[1-\frac{a}{c}\right] \cong \frac{a}{c} .$$

Отсюда и получается указанная выше добавка к величине H_k, равная $N_x M = \frac{a}{c}M$. Например, при $c \cong 2.10^{-1}$см. и $a \cong 2.10^{-5}$см. она равна $0{,}6\,a\,\text{см}^{-1}$. При значениях a, соизмеримых со значениями b, эта добавка будет меньшей.

В схеме для экономии места параметроны необходимо располагать достаточно близко друг к другу. Поэтому необходимо оценить поле около магнитных пленок отдельных параметронов. Оценку, например, можно провести при условии $c \ll b$. Поле можно определить в точках оси x вблизи пленки, исходя из величины магнитных зарядов на торцах пленок, которые равны $q = \pm abM_x$. Эти заряды сосредоточиваются на торцах пленки вдоль размера b. На расстояниях, соизмеримых с размером c, при условии $c \ll b$ поле на оси x можно определить, используя теорему Остроградского-Гаусса:

$$H = \frac{a \cdot M_x}{2\pi x_1} - \frac{a M_x}{2\pi x_2} ,$$

где x_1 - расстояние от правого торца до рассматриваемой точки

и $x_2 = x_1 + c$ - расстояние от левого торца до рассматриваемой точки (рис.I).

При $x_1 = c = 2 \cdot 10^{-1}$ см.

$$H \cong \frac{10^{-5} \cdot 10^4}{4\pi \cdot 2.10^{-1}} \cong 0{,}5 \cdot 10^{-1}\,a/\text{см}.$$

Этот расчет показывает, что при расположении соседних параметронов на расстояниях порядка c, взаимное магнитное влияние параметронов будет достаточно мало.

Мощность, выделяющуюся в параметроне, можно определить с помощью формулы, полученной в статье I:

$$p = \omega\mu_0 MH_k\lambda\frac{\varphi_m^2}{2} ,$$

где p - мощность, выделяющаяся в единице объема магнитной пленки при непрерывной работе параметрона.

Чтобы получить мощность, выделяющуюся в параметроне при трехтактной системе питания, надо умножить величину p на объем пленки и разделить ее на величину, равную приблизительно 3. Тогда

$$P = \frac{p\,abc}{3} . \qquad (10)$$

3. Заключение

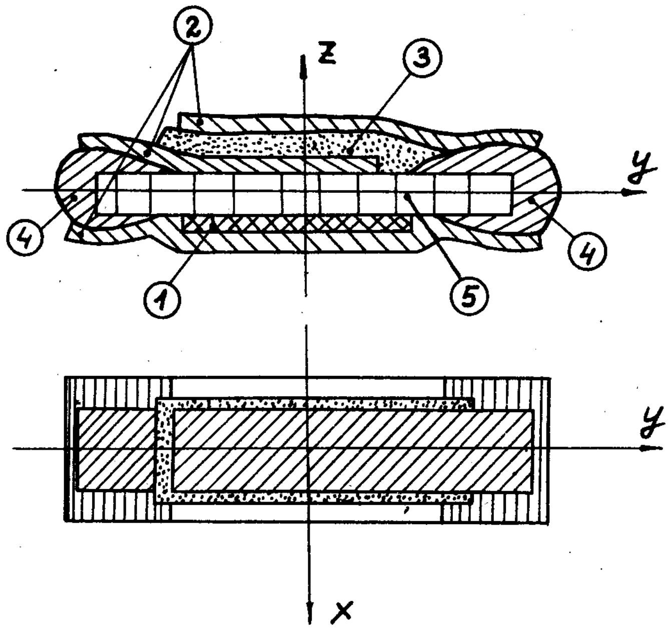
Полученные выше соотношения позволяют сделать оценки основных характеристик параметрона.

Например, о габаритах параметрона можно судить по следующим данным параметрона, удовлетворяющим формуле (8):
$b'' = 1$ см; $b' = 0{,}8$ см; $b = 0{,}8$ см; $a'' = 10^{-2}$ см;
$a' = 2.10^{-5}$ см; $a = 2{,}6 \div 2{,}3 \cdot 10^{-5}$ см; $\varepsilon_1 = 4$;
$M = 6 \cdot 10^3\,a\,\text{см}^{-1}$; $H_k = 3\,a\,\text{см}^{-1}$; $\omega = 2\pi.50.10^6$ сек$^{-1}$.
Можно принять, например, $c = 2.10^{-1}$ см. При этом параметрон будет занимать объем $1 \times 0{,}2 \times 0{,}01$ см^3 $= 2.10^{-3}$ см^3.

Для этих условий мощность, выделяющаяся в параметроне, будет $P \cong 12.10^{-3}\,вт$, при $\varphi_m \cong 0{,}8$, и $P \cong 1{,}1 \cdot 10^{-3}\,вт$ при $\varphi_m = 0{,}3$.

Напряжение на емкости будет $U_m \cong 0{,}8$ при $\varphi_m \cong 0{,}8$, и $U_m = 0{,}26$ при $\varphi_m \cong 0{,}3$.

При этих же условиях емкость конденсатора параметрона будет $C = 2400\,pF$.



Р и с.I. Конструкция пленочного параметрона

ЛИТЕРАТУРА

I. Поливанов К.М. Ферромагнетики, Госэнергоиздат, 1957.
2. Стреттон. Теория электромагнетизма, ГИТТЛ, 1948.
3. Smith, J.Appl.Phys., 1958, 29, 3.