личина порога пробоя возрастает, что и наблюдается в эксперименте [12]. Это же обстоятельство, по-видимому, определяет и тип разряда — быстрый стримерный пробой или медленное прорастание триинга.

Литература

[1] *Lewis T. J.* IEEE Trans. Elect. Insul., 1984, v. EI-19, N 3, p. 210—216.
[2] *Казуб В. Т., Коршунов Г. С.* ПТЭ, 1978, № 1, с. 147—148.
[3] *Воробьев А. А., Воробьев Г. А.* Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высшая школа, 1966. 224 с.
[4] *Furuta J.* et al. J. Appl. Phys., 1966, v. 37, N 4, p. 1873—1878.
[5] *Протасюк Г. Н., Уваров В. Л.* Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, № 13, с. 795—798.
[6] *Воробьев А. А., Воробьев С. А.* Деп. ВИНИТИ, 1983, № 2727-83. 238 с.
[7] *Tove P. A.* et al. LEEE Trans. Nucl. Sci., 1972, v. NS-19, N 3, p. 85—94.
[8] *Гуль В. Е.* Структура и прочность полимеров. М.: Химия, 1971. 344 с.
[9] *Златин Н. А., Пугачев Г. С., Белленди́р Э. Н., Зильбербранд Е. Л.* ЖТФ, 1984, т. 54, № 4, с. 797—802.
[10] *Sierota A.* Proc. 3rd Int. Cont. dielect. Mater. Meas. and Appl. Birmingham, 1979, p. 227—230.
[11] *Goldsmith* et al. High Velocity Deformation in Solids. Symp. Tokyo, August 24—27, 1977, p. 195—207.
[12] *Ушаков В. Я., Робежко А. Л., Важов В. Ф.* и др. ФТТ, 1985, т. 27, № 8, с. 2361—2366.

Харьковский физико-технический институт АН УССР

Поступило в Редакцию 3 сентября 1986 г.
В окончательной редакции 4 февраля 1987 г.

УДК 537.826 : 621.318.1 *Журнал технической физики, т. 57, в. 10, 1987*

ВОЗБУЖДЕНИЕ И ПРИЕМ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В НОРМАЛЬНО НАМАГНИЧЕННОЙ ПЛЕНКЕ ФЕРРИТА МИКРОПОЛОСКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Г. А. Вугальтер, А. Г. Коровин

Для возбуждения и приема магнитостатических волн широко применяются микрополосковые преобразователи (см. рисунок). В работе [1] изложена последовательная электродинамическая теория этих процессов применительно к поверхностным магнитостатическим волнам. Показано, что преобразование основной моды микрополосковой линии в поверхностные магнитостатические волны и обратный процесс описываются телеграфными уравнениями, которые содержат эдс, пропорциональную амплитуде падающей на преобразователь магнитостатической волны. Заметим, что на данной частоте существует лишь одна поверхностная магнитостатическая волна, распространяющаяся в данном направлении. В пленке феррита, намагниченной перпендикулярно поверхности, на данной частоте в данном направлении может распространяться бесконечный набор магнитостатических волн, называемых прямыми объемными (ПОМСВ). Цель нашего сообщения — получить телеграфные уравнения с учетом многомодового характера ПОМСВ и рассмотреть связанные с ним особенности передачи мощности в системе, содержащей излучающий и приемный преобразователи. Ферритовую пленку считаем достаточно толстой, чтобы не учитывать влияние обменного взаимодействия на спектр и возбуждение ПОМСВ.

Предположим сначала, что на отрезок микрополосковой линии в положительном направлении x (см. рисунок) падает одна мода ПОМСВ с частотой ω, номером n и волновым числом $k_n(\omega)$. Обозначим z-компоненту ее магнитной индукции на поверхности $z=0$

$$a_n(y)\exp(ik_n(\omega)x - i\omega t).$$

Такая запись подразумевает, что характерный масштаб изменения функции $a_n(y)$ значительно больше длины падающей ПОМСВ. Как обычно, при выводе телеграфных уравнений будем исходить из уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = \frac{i\omega}{c}\mathbf{B}$$

(множитель $e^{-i\omega t}$ в дальнейшем опускаем) и уравнения непрерывности для поверхностного тока на полоске (которую рассматриваем как идеальную и бесконечно тонкую). Считаем выполненными условия w, $d_2 \ll d_1$, $d_3 \ll \lambda/2\pi$, где λ — длина электромагнитной волны в диэлектрике с наибольшей диэлектрической проницаемостью. При этом x-, z-компоненты электрического и магнитного полей микрополосковой линии с ферритом имеют квазистатический характер и удовлетворяют двумерным уравнениям соответственно электро- и магнитостатики. Кроме того, однозначный смысл приобретает понятие напряжения $V(y)$ между полоской и металлическим основанием. Выполняя преобразования, аналогичные приведенным в [1], получим

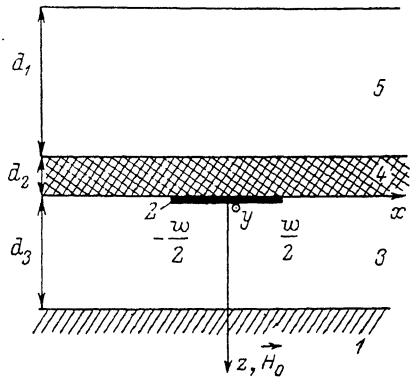
$$dV(y)/dy = -Z(\omega)\, I(y) + \mathcal{E}_n(\omega)\, a_n(y), \qquad (1)$$

$$dI(y)/dy = i\omega C V(y), \qquad (2)$$

где $I(y)$ — полный ток на полоске в сечении $y = \mathrm{const}$; C — погонная емкость, которая определяется при решении электростатической задачи [2]; $Z(\omega)$ — погонный импеданс; $\mathcal{E}_n(\omega)\, a_n(y)$ — эдс, наводимая падающей волной, причем

$$Z(\omega) = \frac{4\pi\omega}{c^2} \int\limits_D \frac{dq}{2\pi i} \frac{G(q)}{q} |f(q)|^2, \qquad (3)$$

$$\mathcal{E}_n(\omega) = \frac{\omega}{c k_n(\omega)} f(k_n(\omega)). \qquad (4)$$



Отрезок микрополосковой линии (*1* — металлическое основание, *2* — металлическая полоска, *3* — слой диэлектрика) с наложенной на него пленкой феррита *4* на диэлектрической подложке *5*.

H_0 — постоянное магнитное поле.

Здесь

$$G(q) = \frac{i\sqrt{-\mu}\,\mathrm{th}\,(q d_3)}{i\sqrt{-\mu} + \mathrm{th}\,|q|\, d_3} \frac{e^{i2|q| d_2 \sqrt{-\mu}} - e^{-i2\,\mathrm{arctg}\sqrt{-\mu}}}{e^{i2|q| d_2 \sqrt{-\mu}} - e^{-i2\,\mathrm{arctg}\sqrt{-\mu}} \dfrac{\mathrm{th}\,|q|\, d_3 - i\sqrt{-\mu}}{\mathrm{th}\,|q|\, d_3 + i\sqrt{-\mu}}}, \qquad (5)$$

μ – диагональная компонента тензора магнитной проницаемости феррита; D — контур интегрирования в комплексной плоскости q, идущий по действительной оси и обходящий полюса $q = k_m(\omega)$ $(m = 1, 2, 3, \ldots)$ функции $G(q)$ в правой полуплоскости снизу, а полюса $q = -k_m(\omega)$ $(m = 1, 2, 3, \ldots)$ в левой полуплоскости — сверху; $f(q)$ — фурье-образ функции $f(x)$, которая описывает распределение тока на полоске в задаче о возбуждении ПОМСВ единичным полным током. Она удовлетворяет интегральному уравнению

$$\int\limits_D \frac{dq}{2\pi} G(q) f(q) e^{iqx} = 0, \quad |x| < \frac{w}{2} \qquad (6)$$

и условию

$$\int\limits_{-w/2}^{w/2} f(x)\, dx = 1. \qquad (7)$$

Если на преобразователь падает несколько мод ПОМСВ, то в силу линейности рассматриваемой нами задачи вместо (1) можно написать

$$\frac{dV(y)}{dy} = -Z(\omega)\, I(y) + \sum_{n=1}^{\infty} \mathcal{E}_n(\omega)\, a_n(y). \qquad (8)$$

Уравнения (2), (8) позволяют найти распределения тока и напряжения как в приемном, так и в излучающем ($a_n(y) = 0$) преобразователе. Рассмотрим с помощью этих уравнений передачу мощности в системе, содержащей одинаковые излучающий и приемный преобразователи, оси которых находятся на расстоянии x_0. Ось первого из них совместим с осью y. Будем считать, что к концу $y = 0$ излучающего преобразователя присоединен генератор с эдс $\mathcal{E}$ и внутренним сопротивлением ρ, к концу $y = 0$ приемного преобразователя подключена нагрузка с таким же сопротивлением, а концы $y = b$ обоих преобразователей короткозамкнуты. Соответствующие граничные условия имеют вид

$$I_{\text{изл}}(0)\,\rho + V_{\text{изл}}(0) = \mathcal{E}, \qquad V_{\text{изл}}(b) = 0,$$
$$I_{\text{пр}}(0)\,\rho + V_{\text{пр}}(0) = 0, \qquad V_{\text{пр}}(b) = 0. \qquad (9)$$

Индексы «изл», «пр» относятся к излучающему и приемному преобразователям. Влияние приемного преобразователя на излучающий не учитываем.

Решая телеграфные уравнения для излучающего преобразователя, рассчитаем распределение тока в нем. Затем с помощью уравнений магнитостатики найдем z-компоненту индукции излучаемых ПОМСВ $A_n(y)\,e^{ik_n(\omega)x}$ $(n=1,\ 2,\ 3,\ \ldots)$ на поверхности $z=0$ при $x>0$

$$A_n(y) = -\frac{ck_n(\omega)}{\omega f^*(k_n(\omega))}\,R_n I_{\text{изл}}(y), \tag{10}$$

где

$$R_n = \frac{4\pi\omega}{c^2 k_n}\,|f(k_n)|^2\,(d_2(1-\mu\,\mathrm{cth}^2 k_n d_3) - d_3\,\mathrm{sh}^{-2} k_n d_3)^{-1} \tag{11}$$

— погонное сопротивление излучения n-й моды, причем

$$\mathrm{Re}\,Z(\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} R_n.$$

Поскольку ось преобразователя расположена при $x=x_0$, в телеграфных уравнениях для него положим

$$a_n(y) = A_n(y)\,e^{ik_n(\omega)x_0}.$$

С помощью этих уравнений вычислим коэффициент передачи K, равный отношению мощности $1/2\cdot\rho\,|I_{\text{пр}}(0)|^2$, выделяющейся в нагрузке, к мощности $1/8\rho\cdot|\mathscr{E}|^2$, падающей от генератора на вход излучающего преобразователя

$$K\,[\text{дБ}] = 20\lg\left\{\frac{2\rho b}{|\rho+Z_{\text{вх}}|^2}\left[\sum_{n=1}^{\infty} R_n^2 e^{-2k_n'' x_0} + 2\sum\sum_{m>n} R_m R_n e^{-(k_m''+k_n'')x_0}\times\right.\right.$$

$$\left.\left.\times\cos\left((k_m-k_n)x_0 + 2\arg\frac{f(k_m)}{f(k_n)}\right)\right]^{1/2}\left|\frac{1+(2hb)^{-1}\sin 2hb}{2\cos^2 hb}\right|\right\}. \tag{12}$$

Здесь

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z}{h}\,\mathrm{tg}\,(hb)$$

— входной импеданс преобразователя; $h=\sqrt{i\omega CZ\ (\omega)}$ — постоянная распространения основной моды микрополосковой линии с ферритовой пленкой; $k_n''(\omega)$ — величина, описывающая затухание ПОМСВ с номером n при распространении (до сих пор потерями в феррите мы пренебрегали). Поскольку $k_n''(\omega)$ зависит от n, то, вообще говоря, величину (12) нельзя разбить, как это обычно принято [3], на два слагаемых, одно из которых описывает потери при преобразовании волны микрополосковой линии в ПОМСВ и обратно, другое — потери при распространении ПОМСВ. Из (12) видно, что для расчета коэффициента передачи необходимо знать не только полное погонное сопротивление излучения, но и погонные сопротивления излучения отдельных мод. Заметим, что коэффициент преобразования по мощности основной моды микрополосковой линии в ПОМСВ определяется величиной $\mathrm{Re}\,Z\ (\omega)$.

Если высшие моды затухают значительно быстрее основной ПОМСВ, то при $(k_m''-k_1'')\times\times x_0 \gg 1$ $(m=2,\ 3,\ 4,\ \ldots)$ формула (12) упрощается

$$K\,[\text{дБ}] \simeq 20\lg\left(\frac{2\rho b R_1}{|\rho+Z_{\text{вх}}|^2}\left|\frac{1+(2hb)^{-1}\sin 2hb}{2\cos^2 hb}\right|\right) - 20\,(\lg e)\,k_1'' x_0, \tag{13}$$

причем вклад потерь при распространении становится аддитивным.

Результаты, изложенные выше, нетрудно перенести на случай обратных объемных магнитостатических волн в касательно намагниченной ферритовой пленке.

Литература

[1] *Вугальтер Г. А., Гилинский И. А.* ЖТФ, 1985, т. 55, № 11, с. 2250—2252.
[2] *Гилинский И. А., Щеглов И. М.* ЖТФ, 1985, т. 55, № 12, с. 2323—2332.
[3] *Wu H. J., Smith C. V.*, Jr., *Owens J. M.* J. Appl. Phys., 1979, v. 50, N 3 (part 2), p. 2455—2457.

Поступило в Редакцию
10 сентября 1986 г.