

имел от кристалла толщиной 6 мм. Этот результат не согласуется с теоретическими оценками [1], согласно которым амплитуда электромагнитной волны должна зависеть от освещаемого объема кристалла.

В заключение необходимо отметить, что продолжение данной работы может привести к появлению новых методов исследования динамики пирозффекта и фотогальванического эффекта в диапазоне 10^{-9} - 10^{-10} с.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Колесов В.В. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 4. С. 118-124.
- [2] Канаев И.Ф., Малиновский В.К., Пугачев А.М. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 3. С. 692-701.
- [3] Канаев И.Ф., Малиновский В.К. // ФТТ. 1982. Т. 24. № 7. С. 2149-2157.

Московский институт
радиотехники, электроники
и автоматики

Поступило в Редакцию
14 января 1990 г.
В окончательной редакции
19 мая 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 13

12 июля 1990 г.

05.2; 05.3

© 1990

ИСКУССТВЕННЫЙ ДИАМАГНЕТИК С МАГНИТНЫМИ ПОТЕРЯМИ

М.В. К о с т и н, Ю.Н. К а з а н ц е в,
Г.А. К р а ф т м а х е р, В.В. Ш е в ч е н к о

В работах [1, 2] была предложена и теоретически исследована модель структурной среды, которая в переменном электромагнитном поле характеризуется комплексной магнитной проницаемостью. Рассматриваемая структурная среда представляет собой кубическую решетку (или несколько таких решеток, вставленных одна в другую), в узлах которой расположены элементы, выполненные из немагнитных металлов. Размеры элементов решетки и расстояния между ними существенно меньше длины волны электромагнитного поля. В качестве элементов рассматривались кольцевые металлические структуры. В работе [1] элемент решетки представлял собой кольцевой цилиндрический провод (тороид), а в [2] - плоское (пленочное) кольцо (рис. 1). В обоих случаях радиус кольца существенно превышает поперечные размеры сечения кольца. Во втором случае элементы более просты при технологическом изготовлении. Пленоч-

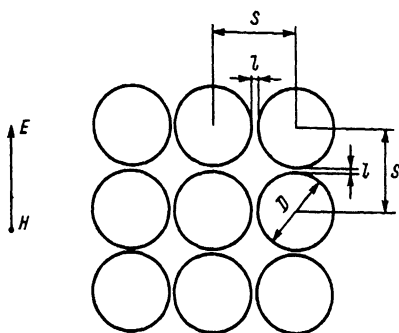


Рис. 1. Фрагмент кольцевой структуры, расположенной на пленочной подложке: $D = 190$ мкм, $S = 220$ мкм, $l = 10$ мкм.

ные кольца могут быть получены методом фотолитографии из металлической пленки, напыленной на пленочную же диэлектрическую подложку. Стопа таких пленок образует объемную диэлектрическую среду с металлическими включениями в виде элементов рассматриваемой решетки. В целом среда обладает свойствами магнетодиэлектрика.

В переменном электромагнитном поле магнитная составляющая поля должна быть перпендикулярна плоскостям, в которых лежат кольца. Индуцированный в кольце ток приводит к возникновению дипольного момента кольца m . Таким образом, кольцевому току сопоставляется магнитный диполь с моментом m . При этом поведение рассматриваемой структурной среды в квазистационарном электромагнитном поле в целом можно считать аналогичным поведению неполярных диэлектриков, электрический дипольный момент молекул которых также возникает под действием внешнего поля [1].

В случае больших концентраций включений, и в особенности близких к предельным [1, 2], локальное поле, действующее на элемент включения (диполь) заметно отличается от среднего поля в среде. Поэтому для нахождения эффективной комплексной магнитной проницаемости была использована формула Онзагера [1, 2], которая была выведена в предположении сильной связи между диполями [3].

На рис. 1 схематически представлен фрагмент кольцевой структуры, который был реализован методом фотолитографии из тонкой алюминиевой пленки с толщиной 0.1 мкм, напыленной на полиимидную подложку — пленку толщиной 40 мкм.

Теоретические расчеты для алюминия с проводимостью $\sigma = 3.54 \times 10^7$ (Ом·м)⁻¹ показали, что ожидаемые параметры магнитной и диэлектрической проницаемостей эффективной магнетодиэлектрической среды в диапазоне СВЧ на сантиметровых волнах составляют: $\mu' \approx 1$ и μ'' порядка 0.4–0.6; $\epsilon' \approx 3$, ϵ'' порядка 10^{-4} . Тот факт, что среда из немагнитных включений может обладать магнитными потерями, теоретически обсуждался и в других работах,

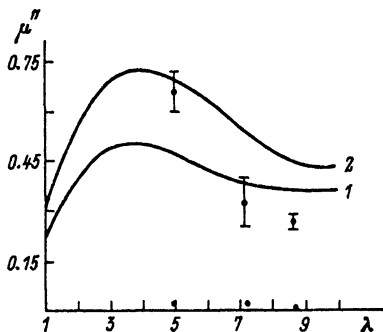


Рис. 2. Дисперсионные кривые $\mu''(\lambda)$ с экспериментальными точками. Индексы 1, 2 относятся к теоретическим кривым рассчитанным для объемных концентраций 0.025 и 0.032 % соответственно.

например [4], однако экспериментально он не был подтвержден, т.е. структура с такими свойствами, насколько нам известно, не была ранее реализована.

В [5, 6] была развита методика измерений магнитной и диэлектрической проницаемостей магнетодиэлектриков и тонких проводящих пленок на СВЧ, основанная на использовании панорамных измерителей КСВ в сочетании с набором волноводных резонаторов (метод восприимчивости с применением теории возмущений). Эта методика была использована в данной работе для обнаружения и измерения магнитной проницаемости образцов, изготовленных в виде столбиков в форме параллелепипедов с размерами $24 \times 2 \times 2 \text{ мм}^3$ из стопы узких полосок, шириной 2 мм, полиимидных пленок с напыленной кольцевой структурой. Измерения были проведены на трех образцах, отличавшихся небольшими отклонениями в концентрациях металлических включений. Концентрации для разных образцов лежали в пределах от $N_1 = 4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (0.025 %) до $N_2 = 5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (0.032 %). Экспериментально измерялись коэффициенты отражения от резонатора с образцом и без образца, а также сдвиг резонансной частоты. Средние измерения значения диэлектрической проницаемости для этих образцов в диапазоне 1–10 см составили: $\epsilon' = 6.5$, $\epsilon'' = 0.6$. Диэлектрическая проницаемость не зависела от ориентации образцов относительно поляризации падающей волны. Наблюдаемое завышенное значение диэлектрических потерь относительно ожидаемых (с учетом потерь в полиимидных пленках) связано с наличием проводящих участков между кольцами из-за технологических погрешностей при осуществлении фотолитографии. При измерениях магнитных параметров наблюдался эффект уменьшения добротности резонанса (уменьшение коэффициента отражения от резонатора) при внесении образцов в пучность магнитного СВЧ поля,

перпендикулярного плоскости расположения колец. Соответствующие средние по трем образцам значения μ'' представлены на рис. 2 и составляют в диапазоне 1–10 см величины порядка 0.2–0.6, что находится в согласии с теоретически рассчитанными (сплошные линии на рис. 2). Для случая ориентации образцов, при которой магнитное поле было параллельно плоскости колец, имеет место слабое (по сравнению с пустым резонатором) изменение добротности, что при отсутствии диэлектрических потерь дало бы значение $\mu'' = 2 \cdot 10^{-2}$ (эти точки также отмечены на рис. 2). На самом деле этот эффект объясняется влиянием ϵ'' , поскольку образец из-за протяженности размеров находился не строго в нуле электрического поля. В проведенных экспериментах не удалось уверенно зафиксировать сдвиг резонансной частоты, т.е. отличие μ' от 1.

Таким образом, в данной работе реализована структурная среда на основе пленок с немагнитными металлическими кольцевыми включениями, обладающая эффективными магнитными потерями. При этом получены количественные данные о диэлектрической и магнитной проницаемостях такой среды в СВЧ диапазоне.

Результаты данной работы представляют практический интерес с точки зрения создания композиционных материалов с заданными электрофизическими свойствами.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] К о с т и н М.В., Ш е в ч е н к о В.В. // РЭ. 1988. Т. 33. № 7. С. 1526–1531.
- [2] К о с т и н М.В. // РЭ. 1990. Т. 35. № 2. С. 424–426.
- [3] А х и е з е р А.И. Общая физика: электрические и магнитные явления. Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1981. 472 с.
- [4] Л а г а р ь к о в А.Н., П а н и н а Л.В., С а р ы ч е в А.К. // ЖЭТФ. 1987. Т. 93. № 7. С. 215–221.
- [5] К а з а н ц е в Ю.Н., К р а ф т м а х е р Г.А. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 11. С. 649–652.
- [6] К а з а н ц е в Ю.Н., К р а ф т м а х е р Г.А. // ФММ. 1989. Т. 67. В. 5. С. 902–908.

Институт
радиотехники
и электроники
АН СССР,
Москва

Поступило в Редакцию
26 апреля 1990 г.