

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА  
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

ИСКУССТВЕННЫЙ МАГНИТНЫЙ ПРОВОДНИК  
НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА  
С АНИЗОТРОПНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ  
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ КАК МАЛОГАБАРИТНОГО ЭКРАНА

© 2022 г. Ю. Н. Казанцев<sup>а, \*</sup>, Г. А. Крафтмахер<sup>а</sup>, В. П. Мальцев<sup>а</sup>, В. С. Солосин<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники, им. В.А. Котельникова РАН,  
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

<sup>б</sup> Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН,  
ул. Ижорская, 13, Москва, 125412 Российская Федерация

\*E-mail: yukazantsev@mail.ru

Поступила в редакцию 18.05.2021 г.

После доработки 25.04.2022 г.

Принята к публикации 05.05.2022 г.

Представлена структура искусственного магнитного проводника (ИМП) из чередующихся слоев диэлектрика с большой и малой диэлектрической проницаемостью. Путем численного расчета частотной зависимости коэффициента отражения от ИМП с конечным числом слоев керамики, разделенных воздушными промежутками, показано, что при уменьшении числа слоев с пяти до одного и при сохранении общей толщины полоса частот ИМП сужается с 14 до 11%. Показана эффективность применения структуры ИМП в качестве малогабаритного экрана электромагнитного излучения при расположении дипольного излучателя на его поверхности.

DOI: 10.31857/S0033849422090078

## ВВЕДЕНИЕ

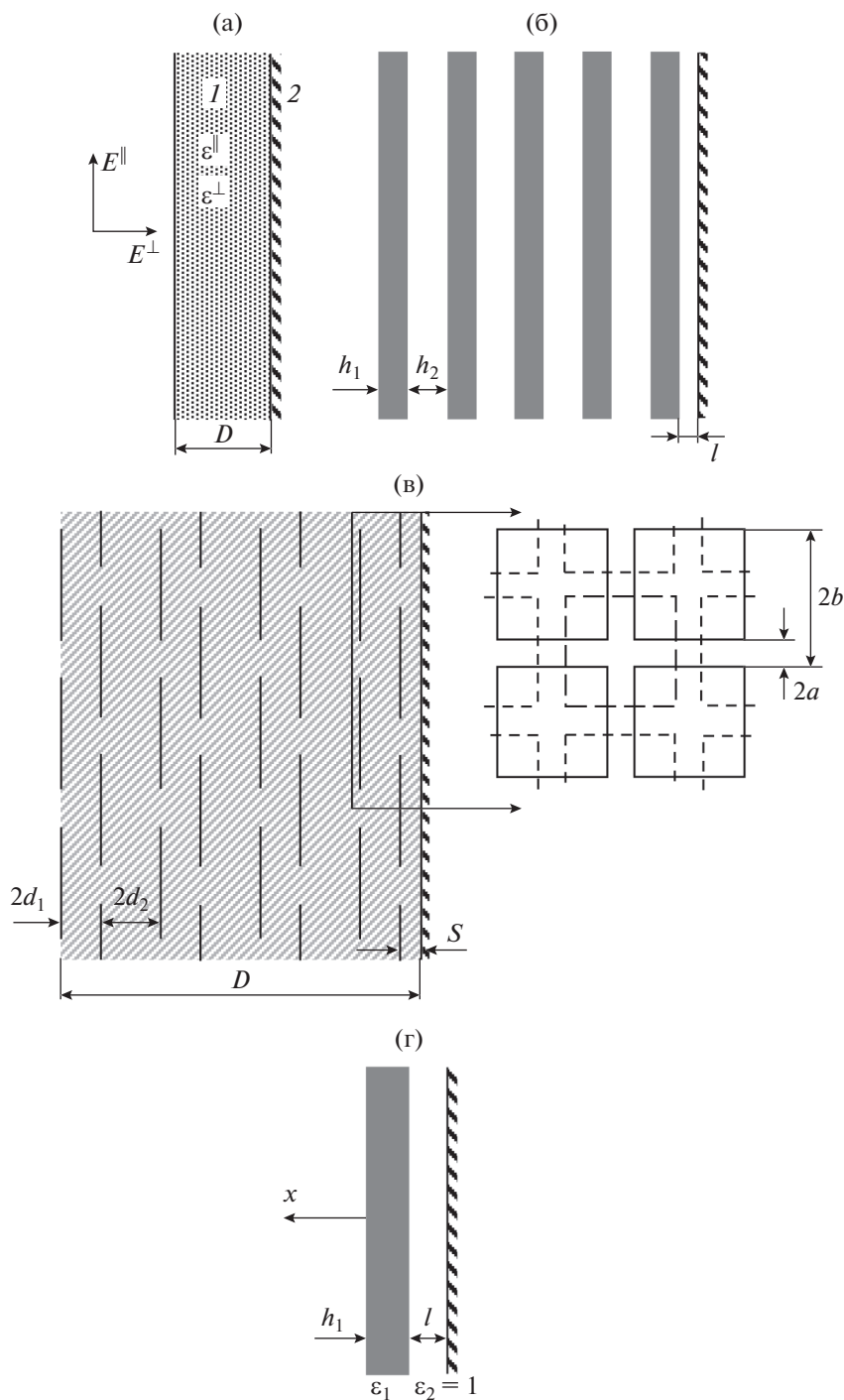
Определенный интерес, который вызывают искусственные магнитные проводники или поверхности с высоким импедансом, обусловлен возможностью их эффективного применения в технике СВЧ и, в частности, в антенной технике. Классической формой ИМП является структура в виде емкостной решетки из квадратных металлических элементов, расположенной на слое диэлектрика, металлизированном с противоположной стороны. Для устранения поверхностных волн элементы решетки могут быть электрически соединены с металлической поверхностью [1, 2]. Это соединение существенно усложняет конструкцию, но является необходимым при использовании ИМП в качестве наземной плоскости (ground plane – GP) малоразмерных и низкопрофильных антенн, поскольку поверхностные волны искажают диаграмму направленности и создают нежелательную связь между соседними антеннами [3–5]. Поэтому поиск и исследование структур ИМП не поддерживающих либо слабо поддерживающих поверхностные волны остается достаточно актуальным. В работе [6] была рассмотрена такая структура на основе композиционного материала с анизотропной диэлектрической проницаемостью, характеризу-

мой двумя главными значениями для случаев, когда электрическое поле либо параллельно, либо перпендикулярно поверхности ИМП. При этом первое значение много больше второго. Там же была предложена реализация композиционного материала с высокой анизотропией диэлектрической проницаемости, выполненного из емкостных решеток, каждая из которых сдвинута на полпериода по отношению к соседним. В работе [7] была показана возможность экранирования электромагнитного излучения малоразмерным ИМП на основе такого материала.

Цель данной работы – разработать ИМП на основе анизотропного композита из чередующихся слоев диэлектрика с большим и малым значениями диэлектрической проницаемости.

## 1. ИМП НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТА С АНИЗОТРОПНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

На рис. 1а представлена структура ИМП на основе композита с электромагнитными свойствами одноосного кристалла и осью перпендикулярной поверхности ИМП. Эта структура состоит из слоя композиционного материала 1 и металлического экрана 2. Диэлектрическая проницаемость ком-



**Рис. 1.** Структуры ИМП: а – ИМП на основе композиционного материала (1 – композит, 2 – металлический экран), б – ИМП на основе мелкослойной диэлектрической структуры, в – ИМП на основе слоистой структуры из емкостных решеток, г – двухслойная структура ИМП.

позита характеризуется двумя значениями  $\epsilon^{\parallel}$  и  $\epsilon^{\perp}$  для случаев, когда электрическое поле параллельно и перпендикулярно поверхности ИМП соответственно. Для того чтобы такая структура могла поддерживать лишь слабозамедленные поверхностные

волны, необходимо выполнение условия  $\epsilon^{\parallel} \gg \epsilon^{\perp}$  [6]. На рис. 1б и 1в показаны ИМП с двумя конкретными типами композитов – на основе мелкослойной диэлектрической структуры и на основе слоистой структуры из емкостных решеток [7].

Мелкослоистая структура (см. рис. 1б) состоит из чередующихся слоев диэлектрика толщиной  $h_1$  и  $h_2$  с диэлектрической проницаемостью слоев  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  соответственно, причем  $\epsilon_1 \gg \epsilon_2$ . Главные значения диэлектрической проницаемости композита определяются следующими формулами [8, 9]:

$$\epsilon^{\parallel} = \frac{\epsilon_1 h_1 + \epsilon_2 h_2}{h_1 + h_2}, \quad \epsilon^{\perp} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 (h_1 + h_2)}{\epsilon_2 h_1 + \epsilon_1 h_2}. \quad (1)$$

Формулы (1) справедливы при толщинах слоев малых по сравнению с длиной волны в соответствующих диэлектриках.

Для сравнения приведем здесь формулы для главных значений диэлектрической проницаемости слоистой структуры из емкостных решеток (см. рис. 1в) при одинаковых расстояниях между решетками  $d$  [7]:

$$\epsilon^{\parallel} = \frac{\epsilon b(b - 2a)}{4d^2}, \quad \epsilon^{\perp} = \epsilon, \quad (2)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала между решетками,  $a$ ,  $b$  и  $d = d_1 = d_2$  показаны на рис. 1в.

Для мелкослоистой структуры из формул (1) легко получить выражение для отношения  $\epsilon^{\parallel}/\epsilon^{\perp}$ :

$$\frac{\epsilon^{\parallel}}{\epsilon^{\perp}} = \frac{[(\epsilon_1/\epsilon_2)(h_1/h_2) + 1][(\epsilon_2/\epsilon_1)(h_1/h_2) + 1]}{(h_1/h_2 + 1)^2}. \quad (3)$$

На рис. 2 представлены зависимости  $\epsilon^{\parallel}/\epsilon^{\perp}$  от  $h_1/h_2$  для нескольких значений  $\epsilon_1/\epsilon_2$ . Из этих зависимостей следует, что отношение диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_1/\epsilon_2$  материалов в мелкослоистой структуре должно быть достаточно велико. Поэтому в качестве слоев одного типа целесообразно использовать пластины из высокочастотной керамики, а в качестве другого типа – либо полимерные пленки, либо полимерные сетки.

Как пример, в табл. 1 приведены диэлектрические проницаемости и тангенсы углов потерь высокочастотных керамик, выпускаемых в России и

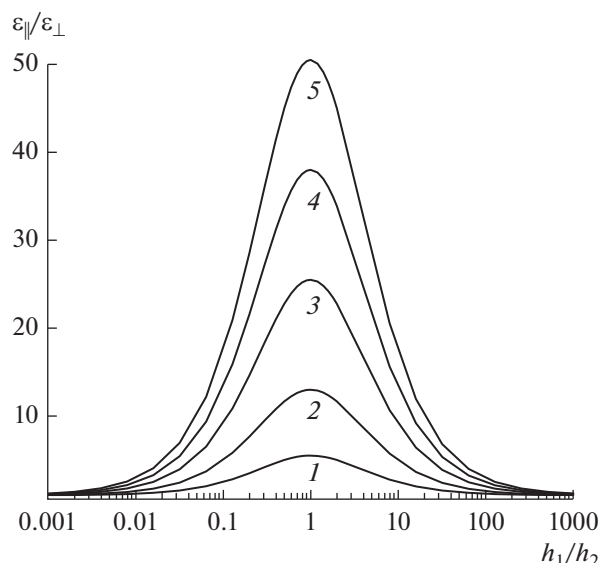


Рис. 2. Зависимости  $\epsilon^{\parallel}/\epsilon^{\perp}$  от  $h_1/h_2$  для мелкослоистой структуры при  $\epsilon_1/\epsilon_2 = 20$  (1), 50 (2), 100 (3), 150 (4) и 200 (5).

за рубежом. Из данных таблицы видно, что увеличению диэлектрической проницаемости высокочастотных керамик свыше 130...140 сопутствует существенный рост тангенса угла потерь, что ограничивает их применение в структурах ИМП.

Для того чтобы структура ИМП могла поддерживать лишь слабозамедленные поверхностные волны, количество чередующихся диэлектрических слоев необязательно должно быть большим. Так, предельным случаем здесь является двухслойная структура из пары слоев с большой и малой диэлектрической проницаемостями, расположенная на металлической поверхности (см. рис. 1г). Двухслойная структура, так же как и многослойная, в принципе может поддерживать слабозамедленные поверхностные волны. Степень замедления этих волн может быть охарактеризована величиной поперечного волнового числа  $\alpha$ , опре-

Таблица 1. Характеристики высокочастотных керамик

Фирма-изготовитель	Марка материала	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла потерь
ЦКБ специальных радиоматериалов, Россия	МТ-60	60	0.0004
	МТ-90	70	0.0003
	СТП-130	130	0.0004
National Magnetics Group Inc., USA	К-80	80	<0.001
	К-100	100	<0.001
	К-140	140	<0.0015
	К-250	250	<0.005

**Таблица 2.** Значения  $k_0, f_0, |\alpha|, |\alpha|/k_0$  для низшей поверхностной  $TM$ -волны в двухслойной структуре при разной толщине слоев  $h_1$  и  $l$

$h_1$ , см	$l$ , см	$k_0$ , 1/см	$f_0$ , ГГц	$ \alpha $ , 1/см	$ \alpha /k_0$
0.25	0.15	0.36	1.72	0.05	0.14
0.20	0.20	0.38	1.82	0.04	0.10
0.15	0.25	0.41	1.96	0.03	0.07

деляющей спад поля в поперечном направлении  $x$  над внешней границей структуры:

$$\exp(-|\alpha|x). \quad (4)$$

Отношение  $|\alpha|/k$  ( $k$  – волновое число) было вычислено для случая  $\epsilon_1 \gg 1$  и  $\epsilon_2 = 1$  из решения дисперсионного уравнения, полученного путем сшивания тангенциальных компонент электрического и магнитного полей на границах диэлектрических слоев. При выполнении условий

$$|\alpha|l \ll 1, \quad \frac{|\alpha|}{k\sqrt{\epsilon_1}} \ll 1 \quad (5)$$

отношение  $|\alpha|/k$  определяется следующими формулами:

для  $TM$ -волн –

$$\frac{|\alpha|}{k} = \frac{\operatorname{tg}(k\sqrt{\epsilon_1}h_1)}{\sqrt{\epsilon_1}}, \quad (6)$$

и для  $TE$ -волн –

$$\frac{|\alpha|}{k} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_1}} \frac{k\sqrt{\epsilon_1}l \operatorname{tg}(k\sqrt{\epsilon_1}h_1) - 1}{k\sqrt{\epsilon_1}l + \operatorname{tg}(k\sqrt{\epsilon_1}h_1)}. \quad (7)$$

Отношение  $|\alpha|/k$  в формуле (7) равно нулю при  $k = k_{\text{кр}}$ , где критическое значение  $k_{\text{кр}}$  удовлетворяет уравнению

$$k_{\text{кр}}\sqrt{\epsilon_1}l \operatorname{tg}(k_{\text{кр}}\sqrt{\epsilon_1}h_1) - 1 = 0. \quad (8)$$

При  $k < k_{\text{кр}}$  поверхностная  $TE$ -волна в структуре не существует. При  $k$  немного больше  $k_{\text{кр}}$  поверхностная  $TE$ -волна является слабозамедленной, так как  $|\alpha|/k \ll 1$ .

Волновое число  $k_0$ , при котором в рассматриваемой двухслойной структуре выполняются условия ИМП, удовлетворяет следующему уравнению:

$$\sqrt{\epsilon_1} \operatorname{tg}(k_0l) \operatorname{tg}(k_0\sqrt{\epsilon_1}h_1) - 1 = 0, \quad (9)$$

полученному с помощью теории длинных линий. При условии  $k_0l \ll 1$  уравнение (9) идентично уравнению (8):

$$k_0\sqrt{\epsilon_1}l \operatorname{tg}(k_0\sqrt{\epsilon_1}h_1) - 1 = 0. \quad (10)$$

Это означает, что частота  $f_0$ , на которой выполняются условия ИМП, и критическая частота  $k_{\text{кр}}$   $TE$ -волны, при которой  $|\alpha| = 0$ , практически совпадают.

Низшая поверхностная  $TM$ -волна существует при любой частоте, но при частоте, близкой к  $f_0$ , является слабозамедленной. В табл. 2 приведены результаты расчета  $k_0, f_0, |\alpha|, |\alpha|/k_0$  для низшей поверхностной  $TM$ -волны, из которых следует, что при уменьшении отношения  $h_1/h_2$  уменьшается и отношение  $|\alpha|/k_0$ , т.е. поверхностная волна становится все менее замедленной. Однако при этом увеличиваются значения  $k_0$  и  $f_0$ , соответствующие условиям ИМП.

Таким образом, как в многослойных, так и в двухслойных ИМП-структурах из чередующихся слоев с большой и малой диэлектрической проницаемостью могут распространяться лишь слабозамедленные поверхностные волны, эффективность возбуждения которых малоразмерными источниками мала.

## 2. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ИМП С БЕСКОНЕЧНЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ РАЗМЕРАМИ

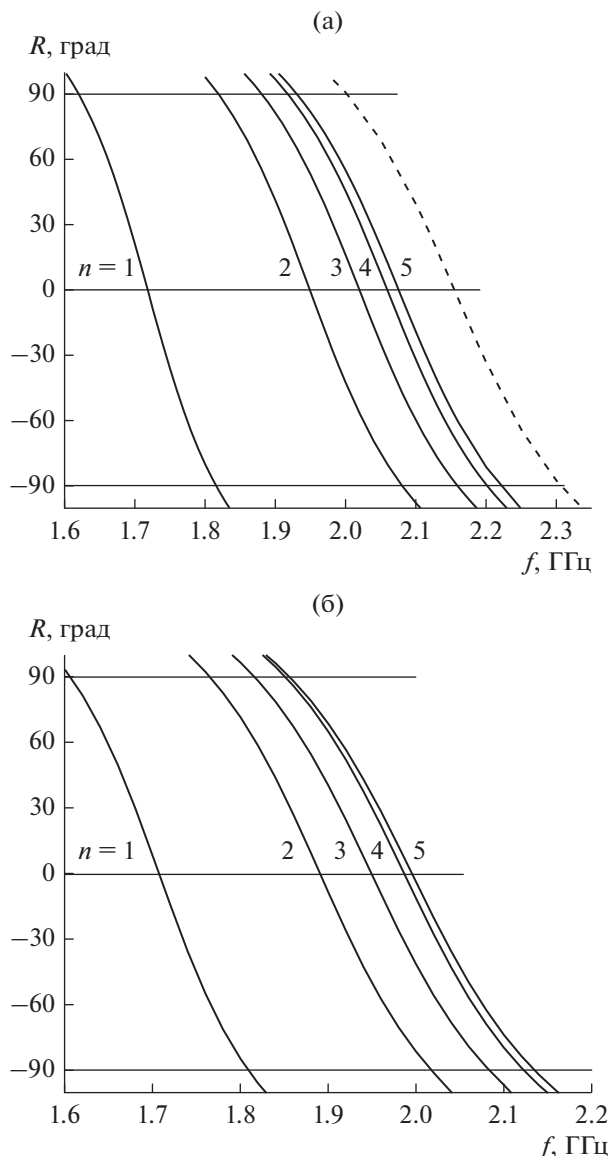
Были рассчитаны частотные зависимости фазы коэффициента отражения при нормальном падении плоской электромагнитной волны на ИМП толщиной  $D$ , который выполнен из керамических пластин ( $\epsilon = 130$ ) толщиной  $h_1$ , разделенных воздушными промежутками ( $\epsilon = 1$ ) толщиной  $h_2$ . Эти зависимости были получены для двух серий ИМП-структур (I и II) с числом пластин  $n = 1 \dots 5$ . Размеры этих структур удовлетворяют следующим условиям серии I и II соответственно:

$$D = h_1(1+t)n - th_1/2, \quad (11)$$

$$D = h_1(1+t)n, \quad (12)$$

где  $t = h_2/h_1$ . Для серий I и II значения  $t = 0.6$  были одинаковы, а значения  $D$  несколько различались: 3.85 и 4 мм. Отметим, что расстояние  $l$  между металлическим экраном и ближайшей пластиной также различались:  $l = h_2/2$  в серии I и  $l = h_2$  в серии II.

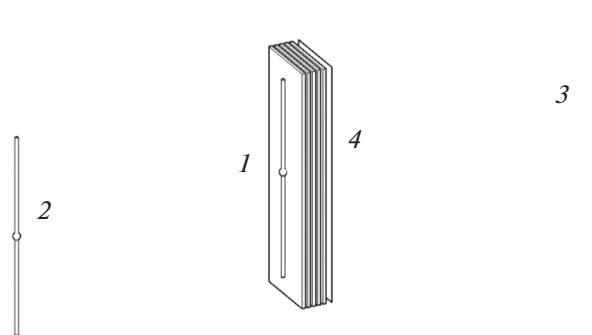
На рис. 3 представлены частотные зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП серии I и II, а также зависимость отражения от слоя однородного диэлектрика толщиной 4 мм с диэлектрической проницаемостью 81.6 на металлической плоскости. Диэлектрическая проницаемость была рассчитана по формуле (6) для  $\epsilon^{\parallel}$  при



**Рис. 3.** Частотные зависимости фазы  $R$  коэффициента отражения от ИМП серии I (а) и II (б) при числе пластин керамики  $n = 1, 2, 3, 4$  и  $5$ ; штриховая кривая – зависимость отражения от слоя однородного диэлектрика толщиной  $4$  мм с диэлектрической проницаемостью  $81.6$ .

$h_1 = 0.5$  мм,  $h_2 = 0.3$  мм,  $\epsilon_1 = 130$ ,  $\epsilon_2 = 1$ . Некоторое различие между этой зависимостью и зависимостью для  $n = 5$  связано с конечным числом слоев в ИМП в численном расчете.

Обозначим частоты, соответствующие значениям фазы  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $-90^\circ$ ,  $f_0$ ,  $f_{90}$ ,  $f_{-90}$  соответственно. В табл. 3 даны эти частоты и отношения  $(f_{-90} - f_{90})/f_0$  для соответствующих значений параметров  $n$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ . Из данных табл. 3 следует, что при уменьшении числа слоев керамики в структуре ИМП с  $5$  до  $1$  частота  $f_0$  также уменьшается и



**Рис. 4.** Схема для определения полосы экранирования малогабаритного экрана:  $1$  – передающая антенна,  $2$  и  $3$  – приемные антенны,  $4$  – экран.

при этом полоса частот ИМП сужается с  $14$  до  $11.5\%$ .

### 3. ИМП-ЭКРАН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЛОИСТОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Возможность использования ИМП-структур в качестве малогабаритных экранов для малоразмерных антенн определяется двумя основными требованиями:

- 1) малой эффективностью возбуждения собственных поверхностных волн (если они существуют),
- 2) сохранением ИМП-характеристик в экранах малой площади.

Для грибообразной структуры ИМП выполняются оба этих требования. В то же время для аналогичных структур, но без электропроводящих “ножек”, соединяющих элементы решеток с электропроводящей плоскостью, эти требования не выполняются, что не позволяет их использовать как экраны.

Малая эффективность возбуждения поверхностных волн в слоистых диэлектрических структурах указывает на возможность применения таких структур в качестве экранов электромагнитного излучения.

Схема определения (расчета) характеристик экранирования показана на рис. 4, где передающий диполь  $1$  расположен на поверхности экрана  $4$ , а приемные диполи  $2$  и  $3$  на расстоянии  $70$  мм от металлической грани экрана. Длина передающего и приемных диполей равна  $30$  мм, диаметр  $0.1$  мм.

Рассмотрим два варианта структуры экрана.

**Вариант 1.** Структура состоит из пяти пластин керамики ( $\epsilon = 130$ ) толщиной  $h_1 = 0.5$  мм, разделенных воздушными промежутками  $h_2 = 0.3$  мм. Воз-

**Таблица 3.** Резонансные частоты и значения ширины полосы ИМП при фиксированной толщине  $D$  и различном числе пластин керамики  $n$ 

Номер серии	$n$	$h_1$ , см	$h_2$ , см	$f_0$ , ГГц	$f_{90}$ , ГГц	$f_{-90}$ , ГГц	$(f_{-90}-f_{90})/f_0$ , %
I	1	2.96	1.78	1.718	1.621	1.816	11.4
	2	1.33	0.80	1.949	1.820	2.081	13.4
	3	0.86	0.51	2.020	1.882	2.160	13.8
	4	0.63	0.38	5.059	1.919	2.201	13.7
	5	0.50	0.30	2.075	1.932	2.222	14.0
II	1	2.5	1.5	1.707	1.605	1.810	12.0
	2	1.25	0.75	1.890	1.763	2.019	13.5
	3	0.83	0.50	1.950	1.815	2.084	13.8
	4	0.63	0.38	1.986	1.850	2.123	13.7
	5	0.50	0.30	1.996	1.856	2.136	14.0

душный промежуток между последней пластиной и металлической гранью равен  $l = h_2/2 = 0.15$  мм.

*Вариант 2.* Структура состоит из одной пластины керамики ( $\epsilon = 130$ ) толщиной 2.5 мм и металлической грани на расстоянии 1.5 мм от пластины.

Полная толщина экранов 4 мм, а поперечная форма – прямоугольник размером  $40 \times 10$  мм<sup>2</sup>.

В качестве характеристик экранирования для малогабаритных экранов обычно используют диаграммы направленности излучателя с экраном и частотные зависимости отношения  $S_{1,3}/S_{1,2}$  коэффициентов передачи от передающей антенны  $I$  к приемным антеннам 3 и 2, расположенным за экраном и перед ним соответственно.

На рис. 5а и 5б представлены частотные зависимости  $S_{1,3}/S_{1,2}$  для вариантов структуры 1 и 2 (сплошные кривые), а также коэффициенты отражения  $S_{1,1}$  в линиях с волновым сопротивлением 50 Ом, питающих передающий диполь (штриховые кривые).

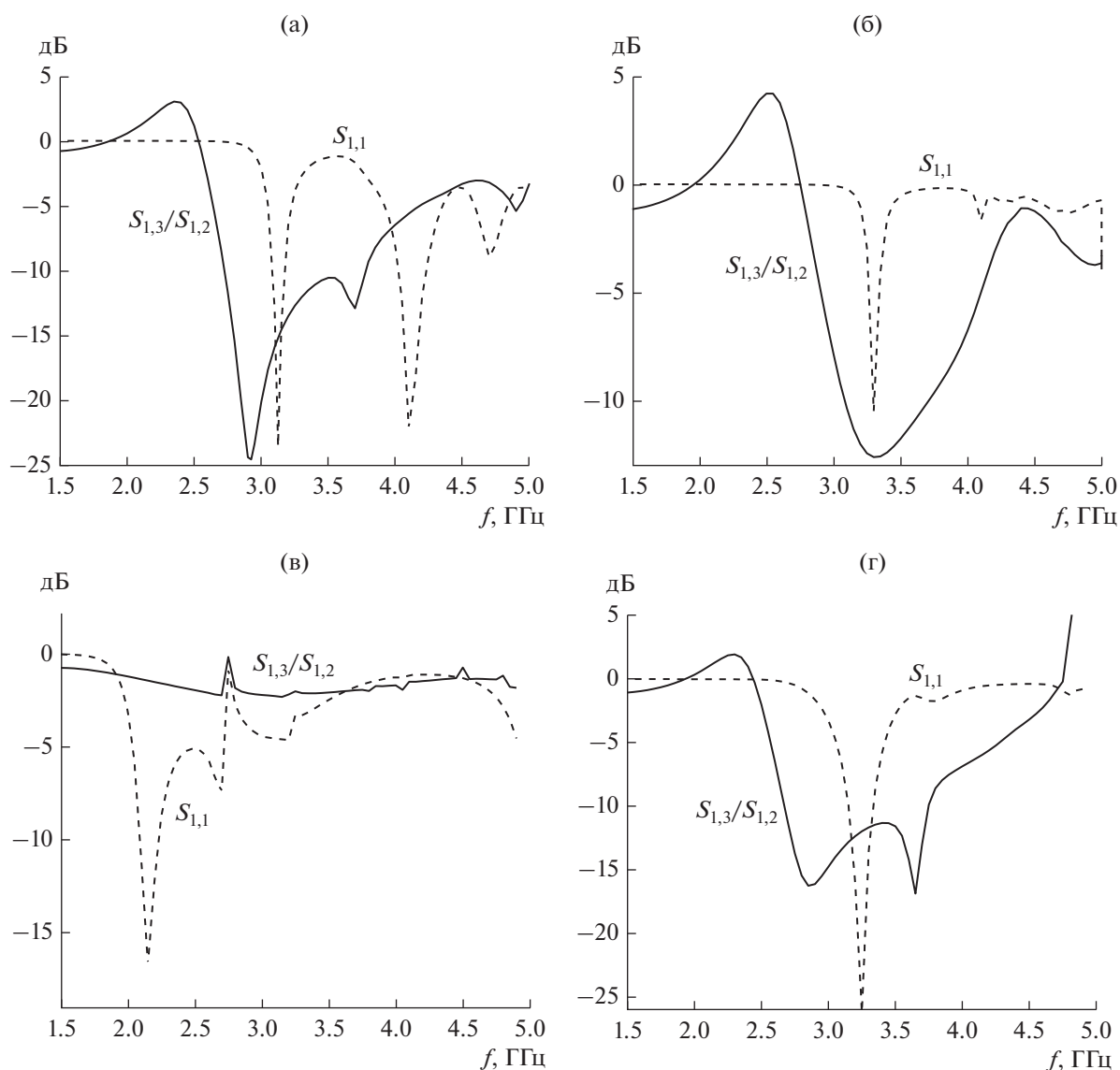
Сравнение частотных зависимостей, представленных на рис. 5а и 5б показывает преимущество пятислойной структуры по варианту 1 и, особенно, по полосе согласования передающей антенны с линией, ширина которой по уровню отражения –10 дБ составляет 0.1 ГГц. При этом значение  $S_{1,3}/S_{1,2}$  на частоте 3.125 ГГц наилучшего согласования равно –15 дБ.

Отметим, что при замене в экране слоистого диэлектрика изотропным с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = \epsilon^{\parallel} = 81.6$  отношение  $S_{1,3}/S_{1,2} > -2.5$  дБ в диапазоне частот 1.5...5 ГГц, что практически означает отсутствие экранирования. Это следует из частотной зависимости  $S_{1,3}/S_{1,2}$  для такой изотропной структуры, представленной на рис. 5в.

На рис. 5г представлены частотные зависимости  $S_{1,3}/S_{1,2}$  и  $S_{1,1}$  для широкого передающего диполя в виде тонкой ленты размером  $30 \times 8$  мм, расположенной на расстоянии 0.5 мм от поверхности экрана по варианту 1 при волновом сопротивлении питающей линии 150 Ом. Из зависимости  $S_{1,1}$  на этом рисунке следует, что увеличение ширины передающего диполя позволило увеличить ширину полосы согласования до 0.16 ГГц.

На рис. 6а и 6б представлены диаграммы направленности в сферической системе координат антенны  $I$  с экраном по варианту 1 на частоте 3.125 ГГц в  $E$ - и  $H$ -плоскостях соответственно, подтверждающие эффект экранирования также и в дальней зоне. Для сравнения здесь же приведены диаграммы направленности экрана, в котором слоистый диэлектрик заменен изотропным с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = \epsilon^{\parallel} = 81.6$ .

Численные расчеты проведены методом моментов в программе FEKO.



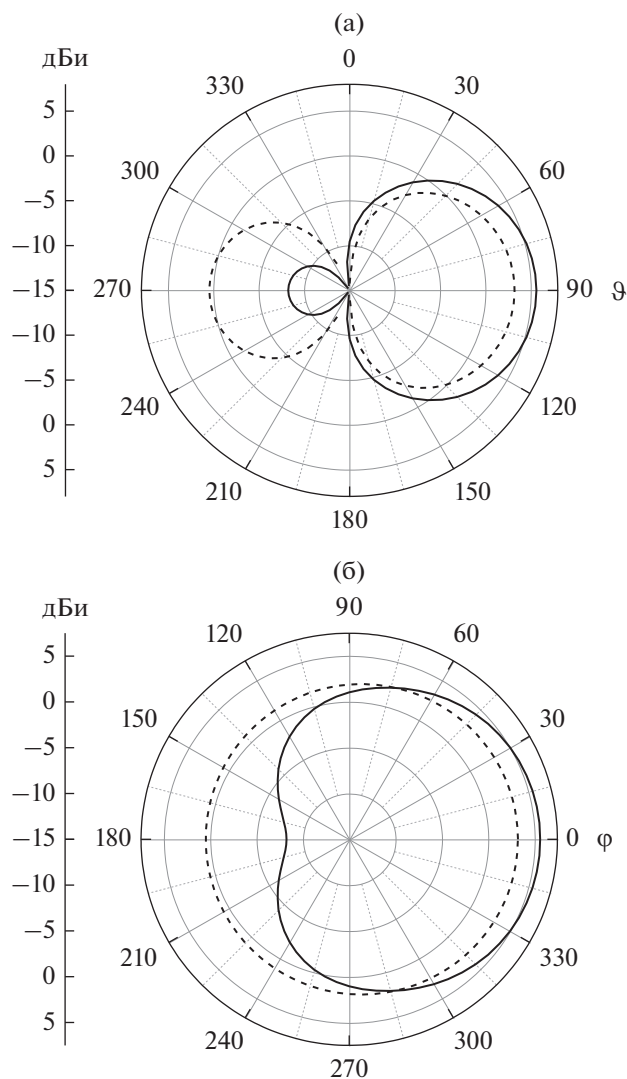
**Рис. 5.** Частотные зависимости отношения  $S_{1,3}/S_{1,2}$  коэффициентов передачи сигнала от антенны 1 к антеннам 2 и 3 (сплошные кривые) и коэффициента отражения  $S_{1,1}$  в линии, питающей передающую антенну (штриховые кривые): а – для модели со структурой по варианту 1, б – для модели со структурой по варианту 2, в – для модели с изотропной структурой, г – для модели по варианту 1 с передающим диполем в виде тонкой ленты размером  $30 \times 8$  мм при волновом сопротивлении питающей линии 150 Ом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены ИМП на основе структуры с высокой анизотропией эффективной диэлектрической проницаемости, выполненной из чередующихся слоев с большой и малой диэлектрической проницаемостью. Сформулированы условия, при которых отношение главных значений диэлектрической проницаемости анизотропной структуры велико по сравнению с единицей и показано, что для их выполнения следует использовать высокочастотную керамику в качестве материала

одного из пары чередующихся слоев. Показано, что при уменьшении числа этих чередующихся пар до одной поверхностные  $TE$ - и  $TM$ -волны в структуре остаются слабозамедленными.

Путем численных расчетов фазы коэффициента отражения от ИМП определена полоса рабочих частот ИМП и показано, что при уменьшении числа пар слоев с пяти до одной эта полоса сужается с 14 до 11%. Также путем численного расчета показаны характеристики ИМП как малогабаритного экрана при расположении дипольного излучателя вблизи или на его поверхности.



**Рис. 6.** Диаграммы направленности антенны с экраном по варианту I (сплошные кривые) и для модели с изотропной структурой (штриховые кривые) на частоте 3.125 ГГц: а – в  $E$ -плоскости (зависимость от  $\vartheta$  при  $\varphi = 0$ ), б – в  $H$ -плоскости (зависимость от  $\varphi$  при  $\vartheta = 90^\circ$ ).

В качестве характеристик экранирования были приняты диаграммы направленности излучателя с экраном и частотные зависимости отношения  $S_{1,3}/S_{1,2}$  коэффициентов передачи переда-

ющей антенны 1 к приемным антеннам 3 и 2, расположенным за экраном и перед ним. Так, в случае экрана на основе структуры из пяти пар слоев отношение  $S_{1,3}/S_{1,2}$  составило  $-15$  дБ на частоте наилучшего согласования антенны с питающей линией.

Было также показано, что при замене в экране слоистого диэлектрика изотропным с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = \epsilon^{\parallel}$  отношение  $S_{1,3}/S_{1,2}$  превышает  $-2.5$  дБ в широком диапазоне частот 1.5...5 ГГц, что свидетельствует об отсутствии сколько-либо существенного экранирования. Этот вывод подтверждается сравнением диаграмм направленности антенны с экранами на основе как слоистого, так и изотропного диэлектриков.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yablonovich E., Sievenpiper D.* // Circuit and Method Eliminating Surface Currents on Metals. US Patent. 6,262,495. Publ. July 17, 2001.
2. *Sievenpiper D., Zhang L., Broas R.F. J. et al.* // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2059.
3. *Broas R.F.J., Sievenpiper D.F., Yablonovitch E.* // IEEE Trans. 2001. V. MTT-49. № 7. P. 1262.
4. *Broas R.F.J., Sievenpiper D.F., Yablonovitch E.* // IEEE Trans. 2005. V. AP-53. № 4. P. 1377.
5. *Clavijo S., Diaz R.E., McKinzie W.E.* // IEEE Trans. 2003. V. AP-51. № 10. P. 2678.
6. *Казанцев Ю.Н., Аплеталин В.Н.* // РЭ. 2007. Т. 52. № 4. С. 415.
7. *Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П., Солосин В.С.* // РЭ. 2022. Т. 67. № 8. С. 736.
8. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
9. *Калошин В.А., Стоянов С.В.* // РЭ. 1989. Т. 35. № 12. С. 2640.