

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.396.67.01

ЭФФЕКТИВНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ РАССЕЯНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫЙ ИМПЕДАНС РЕЗОНАТОРА СО СВОЙСТВАМИ ИСКУССТВЕННОГО МАГНИТНОГО ПРОВОДНИКА

© 2014 г. Ю. Н. Казанцев, В. С. Солосин

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Российская Федерация, 141190, Фрязино, Московской обл., пл. Введенского, 1
E-mail: yukazantsev@mail.ru*

Поступила в редакцию 31.01.2014 г.

Рассмотрен плоский резонатор, имеющий свойства искусственного магнитного проводника. Измерены на СВЧ и рассчитаны частотные зависимости эффективных поверхностей рассеяния (ЭПР) таких резонаторов. Численно рассчитаны величины поверхностных импедансов $|Z|$ резонаторов различной толщины. Показано, что при увеличении толщины резонатора максимумы локальных ЭПР и усредненного по поверхности импеданса $|Z_{cp}|$ сдвигаются в сторону более низких частот. Получено, что величины максимумов $|Z_{cp}|$ достигают 3000 Ом. Это во много раз превышает значение 120 Ом волнового сопротивления свободного пространства, причем ширина полосы частот, в которой $|Z_{cp}| > 1000$ Ом, составляет более 200 МГц.

DOI: 10.7868/S0033849414100040

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие опубликован ряд работ, посвященных поверхностям с большим электрическим сопротивлением — искусственным магнитным проводникам (ИМП) [1–4]. Коэффициент отражения от таких поверхностей равен +1, а не –1 как от поверхностей с высокой электрической проводимостью. Большой интерес к ИМП обусловлен возможностью их практического применения при создании низкопрофильных антенн и экранов электромагнитного излучения. Однако в связи с относительно большими поперечными размерами таких ИМП их применение в технике малоразмерных антенн и экранов затруднено. Это затруднение было устранено в малоразмерных резонаторах на основе ИМП, предложенных [5]. ИМП этого типа образован парой близко расположенных емкостных решеток, размещенных на прямоугольном слое диэлектрика, металлизированном с другой стороны и по двум противоположным торцам.

Малогобаритные резонаторы на основе ИМП их экранирующие свойства описаны в работах [6, 7]. ИМП-структуры на основе однопериодических и двухпериодических решеток показаны на рис. 1а и 1б соответственно. Внешний вид резонатора размером $A \times B \times D$ на основе ИМП-структуры представлен на рис. 2. На резонансной частоте и вблизи нее поверхность резонатора со стороны решеток имеет свойства ИМП. Резонансная частота f_p для резонатора с размерами, много меньшими длины волны, может быть оценена по следующей формуле [6]:

$$f_p = \frac{c}{\pi \sqrt{2\varepsilon(b-2a)bD}}, \quad (1)$$

где c — скорость света, ε — диэлектрическая проницаемость материала между решетками, размеры a , b , d и D приведены на рис. 1а и 1б. Было показано экспериментально, что добротность резонатора слабо зависит от ширины резонатора и быстро уменьшается с увеличением длины B . Соответственно, полоса частот, в которой поверхность резонатора имеет свойства ИМП, растет с увеличением размера B . Поэтому изучение свойств ИМП-резонаторов при размерах B , не малых по сравнению с длиной волны, представляет определенный интерес. В данной работе рассмотрены частотные характеристики обратного рассеяния и поверхностного импеданса для ИМП-резонаторов одной длины B , но резонансные частоты f_p которых лежат в широком интервале 2–7 ГГц. При этом были использованы экспериментальные методы и численный расчет.

1. ОБРАЗЦЫ ИМП-РЕЗОНАТОРОВ

Изготовлены четыре образца резонаторов на основе однопериодических решеток из алюминия толщиной 0.02 мм, различающихся только толщиной D . Размеры образцов: $A = 10$ мм, $B = 40$ мм, $2b = 6$ мм, $2a = 0.3$ мм, $2d = 0.17$ мм, $D = 1$ мм (образец 1), 2 мм (образец 2), 3 мм (образец 3), 4 мм (образец 4). Материал между решетками — полиэтилен ($\varepsilon = 2.25$), материал между парой решеток и металлической поверхностью — полистирол ($\varepsilon = 2.55$).

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Частотные характеристики эффективных поверхностей (ЭПР) измеряли двухрупорным мето-

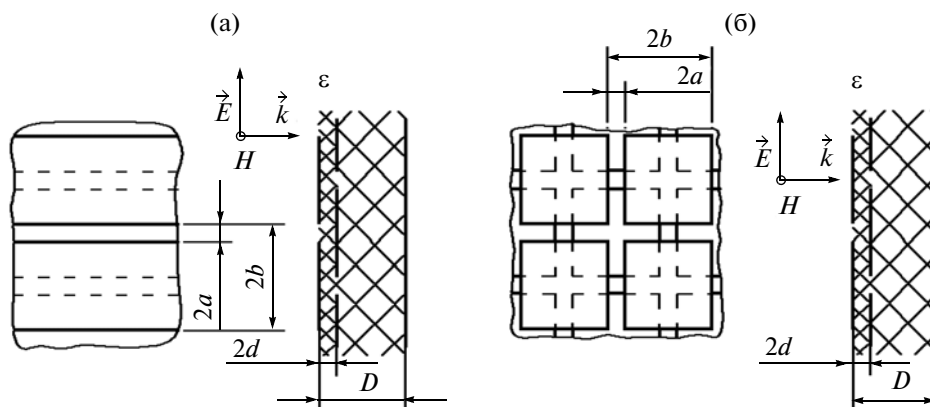


Рис. 1. ИМП-структуры.

дом при помощи векторного анализатора цепей по схеме, приведенной на рис. 3.

Результаты измерений образцов в диапазоне частот 1–5 ГГц даны на рис. 4а–4г сплошными линиями. Пунктирными линиями представлены результаты численного расчета, выполненного при использовании программы FEKO. Особенности конструкций резонаторов, содержащих элементы с размерами, очень малыми по сравнению с длиной волны, потребовали использовать при расчете не стандартную сетку, а более мелкую. Критериями правильного выбора сетки являлись, во-первых, неизменность решения при дальнейшем уменьшении ячейки сетки и, во-вторых, приближение к экспериментальным результатам. Этим критериям удовлетворял размер ячейки сетки, равный 0.5 мм, в то время как стандартный для данного диапазона частот размер ячейки составил 5 мм.

Как видно из рис. 4, при увеличении толщины образца низкочастотный пик ЭПР сдвигается в область более низких частот, причем ширина пика существенно уменьшается.

В таблице приведены частоты максимумов ЭПР в соответствии с рис. 4а–4г и результаты оценки резонансной частоты f_p по формуле (1). Из таблицы видно, что с уменьшением частоты максимума ЭПР уменьшается и резонансная частота f_p , причем обе эти частоты сближаются.

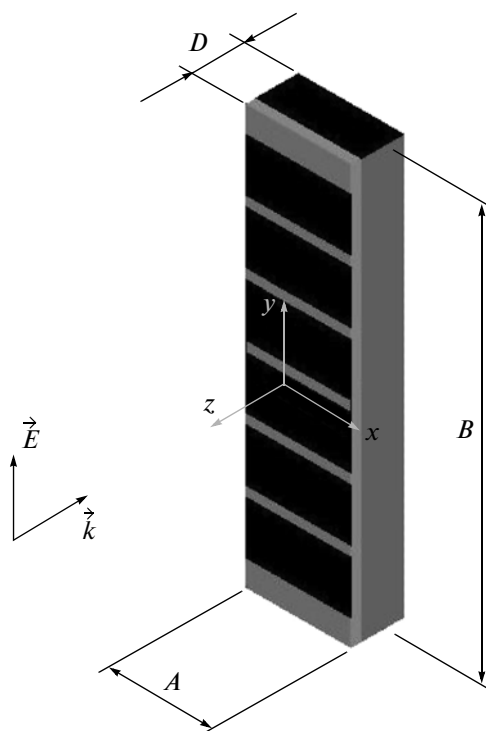


Рис. 2. ИМП-резонатор.

3. ИМПЕДАНС ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ИМП-РЕЗОНАТОРА

Импеданс Z на плоскости, параллельной паре решеток ИМП-резонатора, равен отношению

Измеренные и рассчитанные характеристики образцов

| № образца | Толщина образца, мм | Частота максимума ЭПР, ГГц | | Резонансная частота f_p , ГГц | Частота максимума импеданса $ Z_{cp} $, ГГц | Величина максимума импеданса $ Z_{cp} $, Ом |
|-----------|---------------------|----------------------------|--------------|---------------------------------|--|--|
| | | измеренная | рассчитанная | | | |
| 1 | 1.0 | 2.65 | 2.85 | 4.6 | 3.9 | 3000 |
| 2 | 2.0 | 2.33 | 2.5 | 3.2 | 2.85 | 2600 |
| 3 | 3.0 | 2.17 | 2.2 | 2.6 | 2.35 | 2700 |
| 4 | 4.0 | 2.05 | 2.0 | 2.3 | 2.1 | 3500 |

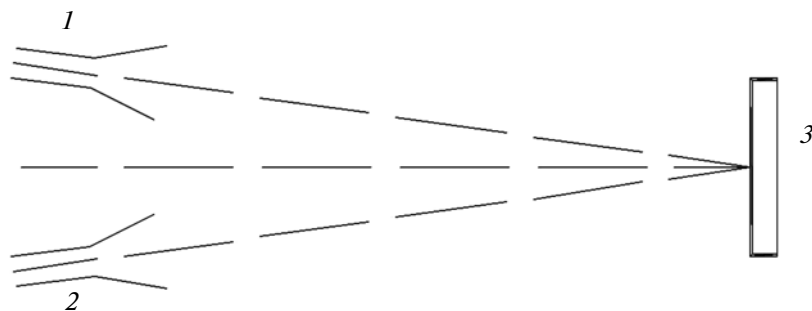


Рис. 3. Измерительная схема; 1 и 2 – передающий и приемный рупоры, 3 – исследуемый образец.

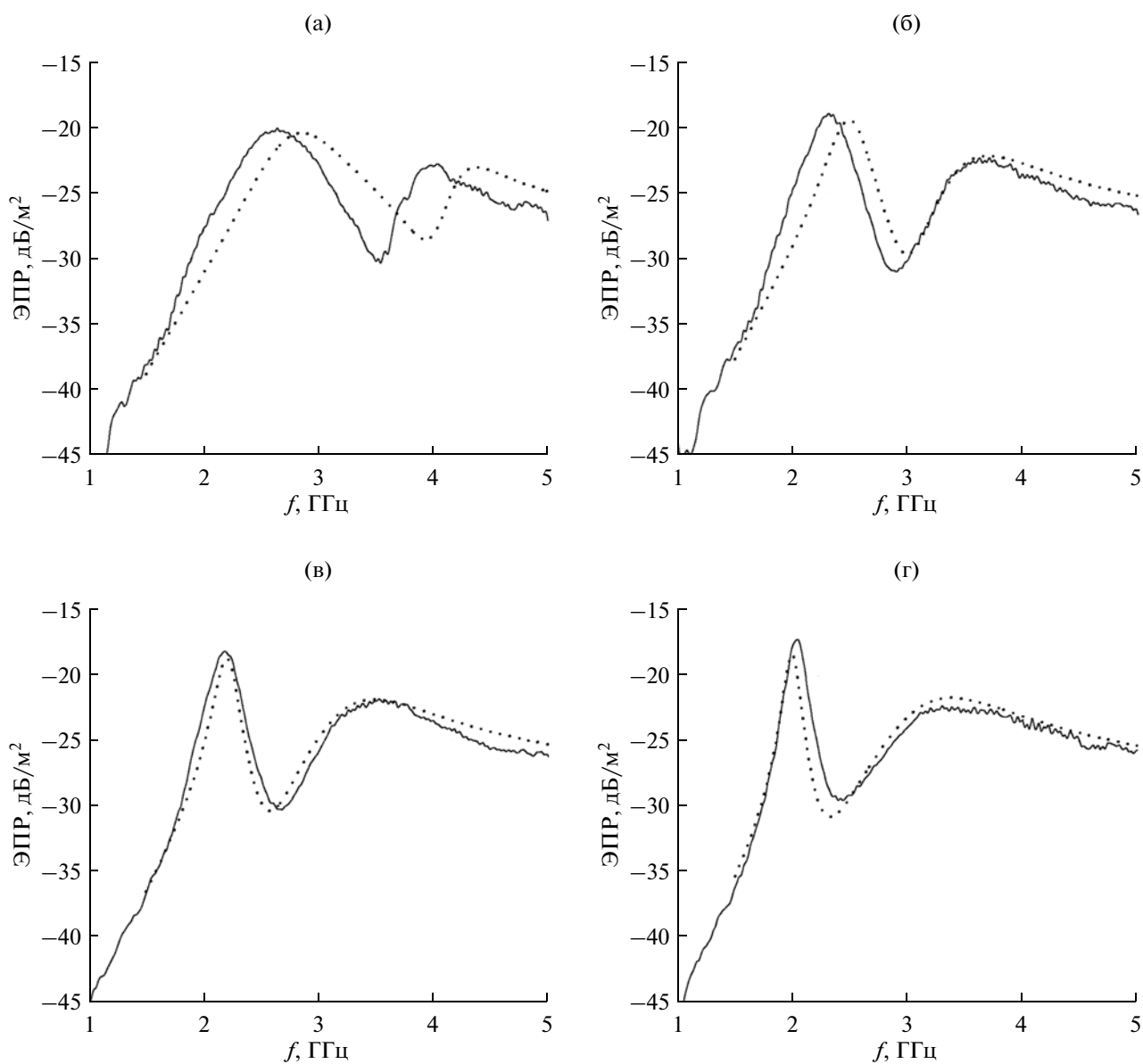


Рис. 4. ЭПР образцов: а, б, в, г соответствуют образцам 1, 2, 3, 4. Пунктирные линии – расчет, сплошные линии – измерение.

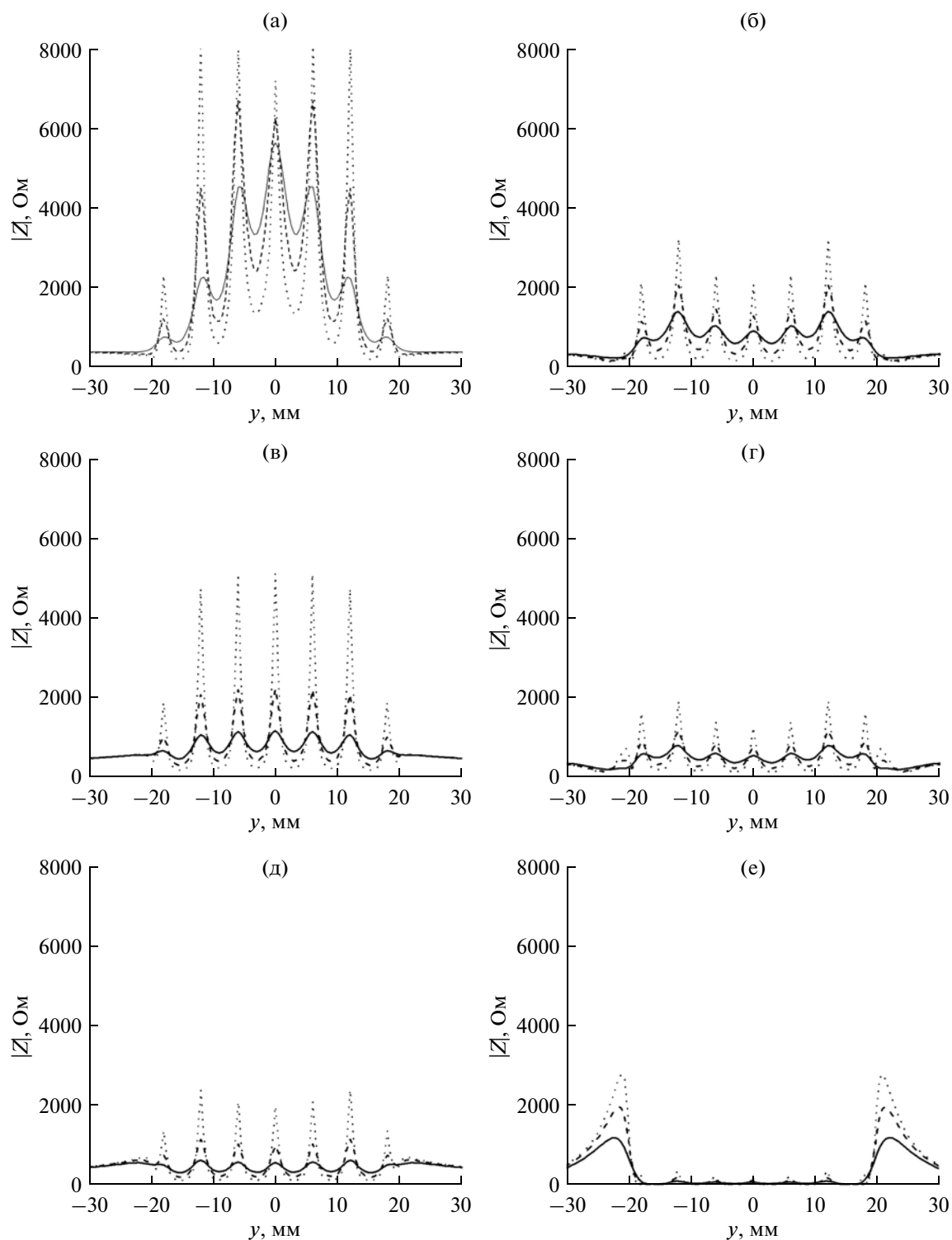


Рис. 5. Расчетные зависимости $|Z(z, y)|$ для образца 1 на частотах $f = 3.9$ (а), 3.8 (б), 4 (в), 3.7 (г), 4.1 (д), 2.9 ГГц (е). Пунктирные линии — $z = 0.5$ мм, штриховые линии — $z = 1$ мм, сплошные линии — $z = 2$ мм.

тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей. Как известно, в плоской волне это отношение равно 120π Ом, а на металлической поверхности — нулю. Импеданс на плоскости, совпадающей с поверхностью наружной ре-

шетки, является существенно неоднородным в направлении, перпендикулярном щелям решетки. Так, на металлических промежутках между щелями импеданс равен нулю, в то время как на щелях он может сильно отличаться от нуля и быть

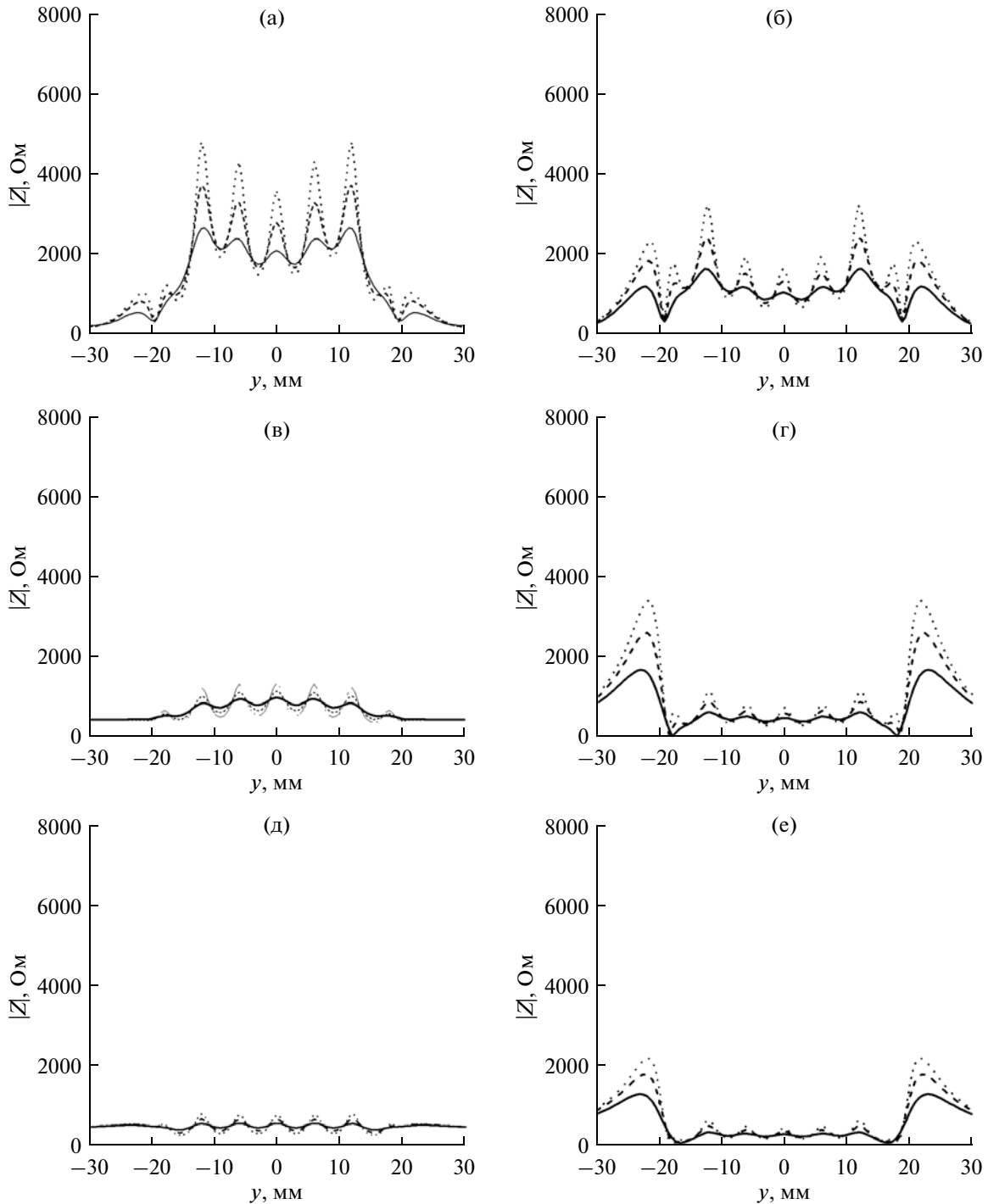


Рис. 6. Расчетные зависимости $|Z(z, y)|$ для образца 3 на частотах $f = 2.35$ (а), 2.3 (б), 2.5 (в), 2.2 (г), 2.6 (д), 2.1 ГГц (е). Пунктирные линии – $z = 0.5$ мм, штриховые линии – $z = 1$ мм, сплошные линии – $z = 2$ мм.

очень большим. Естественно, что при увеличении расстояния между плоскостью, на которой определяется импеданс, и поверхностью решетки импеданс должен становиться более однородным.

На рис. 5а–5е и рис. 6а–6е приведены расчетные зависимости модулей импедансов $|Z(z, y)|$ для

образцов 1 и 3 соответственно на шести частотах при трех расстояниях z от поверхности решетки. Так, на рис. 5а показана зависимость $|Z(z, y)|$ для образца 1 толщиной 1 мм для частоты, на которой средняя по интервалу $-20 \text{ мм} < y < 20 \text{ мм}$ величина $|Z|_{\text{ср}}$ максимальна, на рис. 5б, 5в, 5г, 5д – для четы-

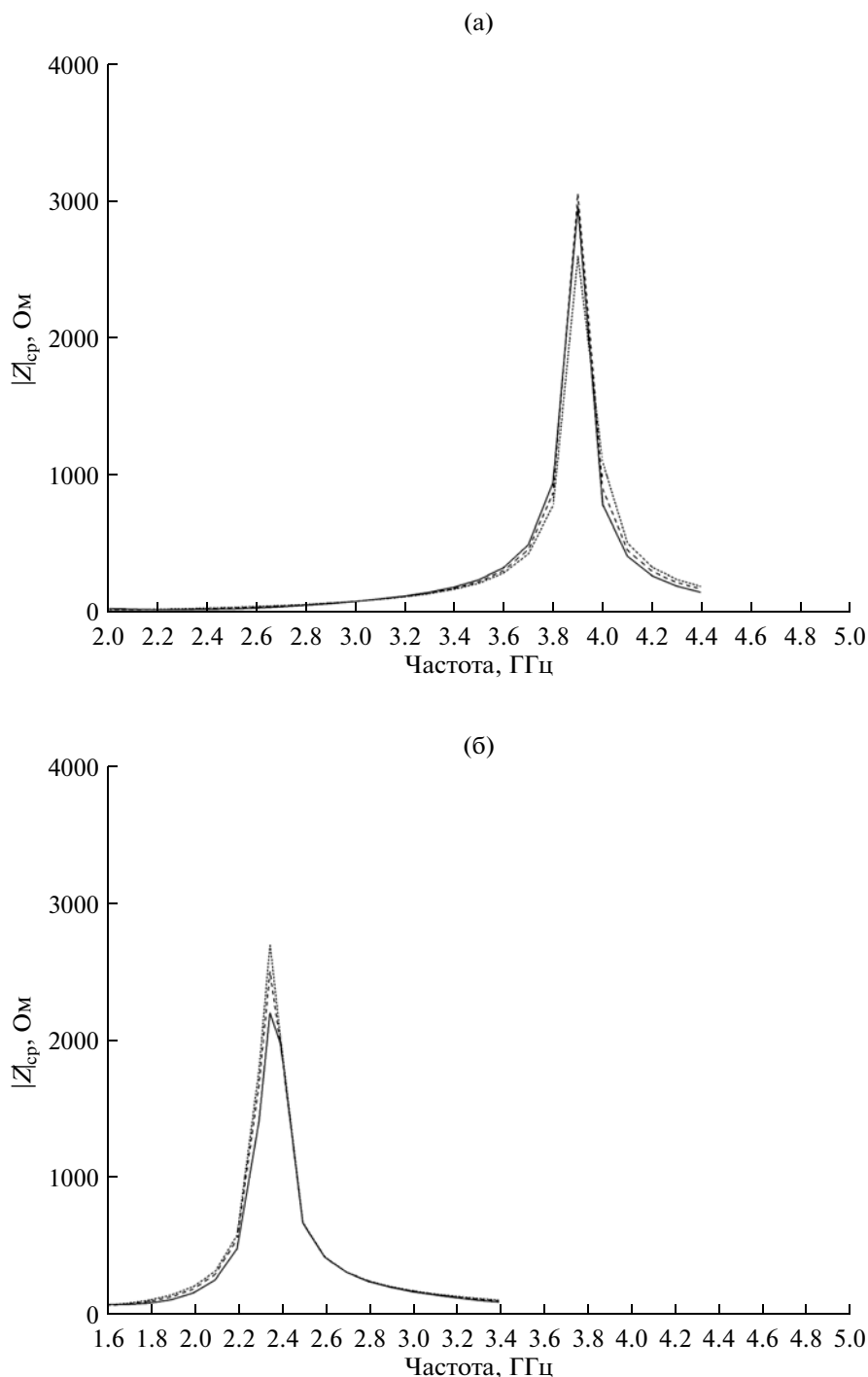


Рис. 7. Частотные зависимости $|Z_{cp}|$ для образцов: 1 (а) и 3 (б). Пунктирные линии – $z = 0.5$ мм, штриховые линии – $z = 1$ мм, сплошные линии – $z = 2$ мм.

рех соседних частот, на рис. 5е – для частоты, на которой ЭПР максимальна. На рис. 6а–6е приведены аналогичные зависимости $|Z(z, y)|$ для образца 3 толщиной 3 мм.

Максимальные значения $|Z_{cp}|$ и соответствующие им частоты указаны в таблице. Видно, что с увеличением толщины образца частоты, соответ-

ствующие максимумам $|Z_{cp}|$ и ЭПР, сближаются с резонансной частотой f_p . Заметим, что в направлении, параллельном щелям, импеданс на поверхности вблизи резонатора изменяется слабо, так что значение импеданса, среднее по координате y , приблизительно равно импедансу, среднему по поверхности.

На рис. 7а и 7б приведены частотные зависимости $|Z_{\text{ср}}|$ для образцов 1 и 3 соответственно при трех расстояниях z от поверхности решетки. Из этих зависимостей видно, что для обоих образцов средняя величина импеданса $|Z_{\text{ср}}|$ существенно превышает волновое сопротивление свободного пространства в диапазонах частот 3.8–4 ГГц и 2.3–2.5 ГГц соответственно.

Были рассчитаны картины электрического поля вблизи образцов 1 и 3 на частотах максимумов ЭПР и $|Z_{\text{ср}}|$ при падении на них плоской волны. На частоте максимума ЭПР электрическое поле концентрируется вблизи концов резонатора, т.е. имеет место дипольный резонанс по длине B резонатора. На частоте максимума $|Z_{\text{ср}}|$ тангенциальная составляющая электрического поля концентрируется вблизи поверхности решетки, что обусловлено внутренним резонансом в образце и является необходимым свойством магнитного проводника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения и расчеты показали, что при увеличении толщины ИМП-резонатора резонансная частота f_p и частоты максимумов ЭПР и усредненной

величины поверхностного импеданса $|Z_{\text{ср}}|$ одновременно уменьшаются и при этом сближаются. Максимум ЭПР обусловлен дипольным резонансом ИМП-резонатора, а максимум $|Z_{\text{ср}}|$ – внутренним резонансом в области между решетками и металлическим дном резонатора. Максимальная величина $|Z_{\text{ср}}|$ достигает 3000 Ом, что во много раз превышает волновое сопротивление свободного пространства. Ширина полосы частот, в котором $|Z_{\text{ср}}| > 1000$ Ом, составляет около 200 МГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sievenpiper D., Zhang L., Broas R.F.J. et al.* // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2059.
2. *Broas R.F.J., Sievenpiper D., Yablonovich E.* // IEEE Trans. 2001. V. MTT-49. № 7. P. 1262.
3. *Zhang L., von Haden J., Younis M. et al.* // IEEE Trans. 2003. V. MTT-51. № 10. P. 2704.
4. *Simovski C.R., de Maagt P., Melchakova I.V.* // IEEE Trans. 2005. V. AP-53. № 3. P. 908.
5. *Казанцев Ю.Н., Аплеталин В.Н.* // РЭ. 2007. Т. 52. № 4. С. 415.
6. *Казанцев Ю.Н., Аплеталин В.Н., Солосин В.С.* // РЭ. 2008. Т. 53. № 3. С. 316.
7. *Казанцев Ю.Н., Аплеталин В.Н., Солосин В.С.* // РЭ. 2008. Т. 53. № 8. С. 646.