

05;06;12

Высокоизбирательный электромагнитный кристалл

© А.И. Назарько, Е.А. Нелин, В.И. Попсуй, Ю.Ф. Тимофеева

Национальный технический университет „Киевский политехнический институт“,

03056 Киев, Украина

e-mail: ye.nelin@gmail.com

(Поступило в Редакцию 23 июня 2009 г.)

Выполнена оценка зонной избирательности кристаллоподобных структур. Предложен и исследован высокоизбирательный электромагнитный кристалл.

Искусственные кристаллоподобные структуры (КС) составляют основу новых разнообразных устройств обработки сигналов. Значительное развитие получили фотонные кристаллы. При моделировании сложных в конструктивно-технологическом отношении оптических фотонных кристаллов используют их микрополосковые аналоги — электромагнитные кристаллы (ЭК). ЭК интенсивно исследуют и с целью повышения эффективности устройств радиодиапазона.

Для высокоэффективных устройств необходимы КС с высокой зонной избирательностью. В настоящей работе выполнена оценка зонной избирательности КС, предложен и исследован высокоизбирательный ЭК.

Зонную избирательность КС характеризуют подавление сигнала в запрещенной зоне и ее ширина. Подавление сигнала определим отношением $K = T_a/T_f$, где $T_{a,f}$ — максимальное и минимальное значение модуля амплитудного коэффициента прохождения соответственно в разрешенной и запрещенной зонах.

Оценим избирательность модельной КС, образованной четвертьволновыми слоями. Импедансы слоев нормированы к импедансу внешней среды и равны единице и $Z > 1$. Значение T_f достигается на средней частоте запрещенной зоны и определяется выражением $T_f = 2\sqrt{Z_{in}}/(Z_{in} + 1)$, где $Z_{in} = Z^{2N}$ — входной импеданс КС, N — число слоев с импедансом Z . Поскольку $T_a \approx 1$, а $Z_{in} \gg 1$, то $K \approx T_f^{-1} \approx Z^N/2$. Импеданс Z соответствует эффективному импедансу Z_{eff} неоднородностей КС.

Исходя из [1] в результате преобразований для относительной ширины ΔF первой запрещенной зоны неограниченной модельной КС получим

$$\Delta F = \frac{4}{\pi} \arcsin \frac{Z-1}{Z+1}. \quad (1)$$

Обратим внимание, что аргумент функции (1) равен амплитудному коэффициенту отражения от границы сред с отношением импедансов Z . Непосредственная взаимосвязь ширины запрещенной зоны и коэффициента отражения иллюстрирует ключевую роль отраженных волн в формировании зонных свойств КС. Границы слоев как вторичные излучатели волны настолько сильно взаимодействуют, что свойства искусственной среды — КС —

изменяются от полностью прозрачной в разрешенных зонах до полностью непрозрачной в запрещенных.

На рис. 1 приведены зависимости K при $N = 5, 10$ и 15 (соответственно кривые 1–3) и ΔF (4) модельной КС. Как видно из зависимостей 1–3, при небольших значениях Z и N достижимо существенное подавление сигнала в запрещенной зоне. Значения $T_f \lesssim 10^{-3}$ характерны для туннельных квантово-механических барьеров. В запрещенной зоне ограниченная КС представляет собой туннельный барьер с чрезвычайно низкой прозрачностью. При резонансном туннелировании коэффициент прохождения равен единице. Эти свойства КС обеспечивают предельно высокую избирательность: полоса пропускания формируется резонансным туннелированием, а полоса подавления — обычным [2].

При $N \gtrsim 5$ ширина запрещенных зон ограниченной и неограниченной модельной КС практически одинакова. Как видно из зависимости 4 на рис. 1, КС обеспечивают широкополосное и сверхширокополосное подавление сигналов.

ЭК — несимметричная микрополосковая линия передачи с периодически расположенными неоднородностями обычно лишь на металлизированной поверхности под полосковым проводником. Для максимизации Z_{eff} необ-

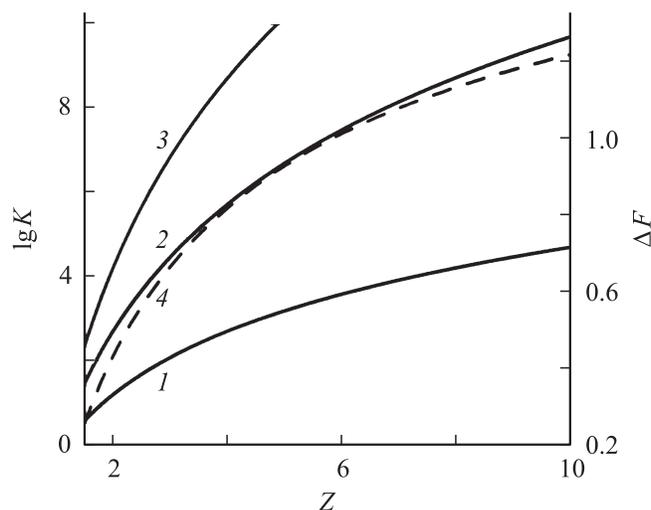


Рис. 1. Зависимости подавления сигнала и относительной ширины запрещенной зоны модельной КС.

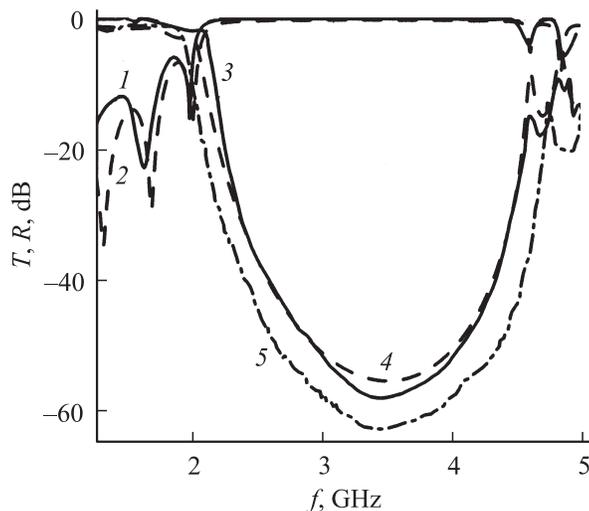


Рис. 2. Зависимости коэффициентов отражения и прохождения ЭК на основе комбинированных неоднородностей.

ходимо формировать комбинированные неоднородности, включающие такие их виды:

- 1) на металлизированной поверхности;
- 1) в диэлектрике;
- 3) на сигнальной поверхности.

Сравним эффективность каждого из этих видов неоднородностей. Неоднородности первого вида — круглые отверстия [3]. Изготовленный нами ЭК с такими неоднородностями имеет следующие параметры: ширина полоскового проводника 2.5 mm, диаметр отверстий 8 mm, период 20 mm, число отверстий 5, относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика 7, толщина диэлектрика 2.1 mm. В первой запрещенной зоне экспериментальное значение $T_f = -10.4$ dB, чему соответствует $Z_{\text{eff}} = 1.7$. Значение Z_{eff} рассчитано по одномерной модели в виде неоднородной линии передачи.

Неоднородности второго вида — цилиндрические отверстия в диэлектрике [4]. ЭК с приведенными выше параметрами и отверстиями в диэлектрике глубиной 1.6 mm имеет экспериментальное значение $T_f = -20.9$ dB, чему соответствует $Z_{\text{eff}} = 2.6$. При сквозных отверстиях $Z_{\text{eff}} = 3.8$.

На рис. 2 представлены экспериментальные (кривые 1, 3, 5) и расчетные (2, 4) частотные зависимости коэффициентов отражения (1, 2) и прохождения (3, 4, 5) ЭК со сквозными отверстиями в диэлектрике и модуляцией ширины проводника. В отличие от приведенных выше параметров диаметр отверстий равен 6 mm, модуляция ширины проводника составляет 6 mm/0.1 mm. Узкие отрезки проводника расположены над отверстиями и выполнены проволочным проводником, присоединенным к широкому полосковому отрезкам. Характеристики 1–4 — отверстия в металлизированной поверхности закрыты медной фольгой, 5 — открыты. Расчет проведен трехмерным моделированием в программном пакете Microwave Studio. Для характеристики 5 $T_f = -62$ dB,

средняя частота $f_0 = 3.49$ GHz, $\Delta F = 85\%$. Отношение импедансов разнородных областей ЭК равно 17.5 (за счет вариации ширины проводника — 4.2), $Z_{\text{eff}} = 10.9$.

ЭК на основе комбинированных неоднородностей обеспечивает формирование высокой зонной избирательности при небольшом числе неоднородностей.

Список литературы

- [1] Ярич А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987. 616 с. (Yariv A., Yeh P. Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation. NY: Wiley, 1984. 589 p.)
- [2] Нелин Е.А. // УФН. 2007. Т. 177. № 3. С. 307–313.
- [3] Radisic V. et al. // IEEE Microwave and Guided Wave Lett. 1998. Vol. 8. N 2. P. 69–72.
- [4] Radisic V., Qian Y., Itoh T. // IEEE Microwave and Guided Wave Lett. 1998. Vol. 8. N 1. P. 13–14.