

05;06;09;12

## Двухфазные кристаллоподобные структуры

© Е.А. Нелин

Национальный технический университет Украины „Киевский политехнический институт“,  
03056 Киев, Украина  
e-mail: ye.nelin@gmail.com

(Поступило в Редакцию 7 декабря 2010 г.)

Рассмотрены двухфазные кристаллоподобные структуры (КС), частоты запрещенных зон которых заметно ниже по сравнению с традиционными однофазными. С использованием модели импедансных  $\delta$ -неоднородностей проанализированы особенности характеристик таких КС. Рассмотрены варианты реализации двухфазных КС. Приведены экспериментальные и расчетные характеристики одно- и двухфазного электромагнитных кристаллов.

Кристаллоподобные структуры (КС) — полупроводниковые сверхрешетки, фотонные и фононные кристаллы — базовые структуры нанoeлектроники. Фотонные кристаллы на основе микрополосковых линий, называемые электромагнитными кристаллами (ЭК), позволяют существенно улучшить характеристики устройств радиодиапазона.

В настоящей работе рассмотрены двухфазные КС, частоты запрещенных зон которых заметно ниже по сравнению с традиционными однофазными, проанализированы особенности зонных диаграмм таких КС, варианты их реализации, выполнено сравнение характеристик одно- и двухфазного ЭК.

### Импедансные $h$ - и $l$ -неоднородности

Принципиальные особенности кристаллов и КС проявляются в одномерных структурах. По модели Кронига–Пенни зависимость потенциала в кристалле соответствует рис. 1, *a*. Такую зависимость имеет и квантово-механический импеданс в кристалле или волновой импеданс в КС любой природы. Зонная диаграмма кристалла формируется в результате взаимодействия полей падающей и отраженной барьерами волн. Импедансный барьер моделирует неоднородность КС. В кристаллах и в традиционных КС неоднородности идентичны с коэффициентами отражения одной фазы. Такие КС однофазные — КСs (single-phase).

Искусственная КС может иметь и более сложную импедансную зависимость, что открывает дополнительные возможности в формировании ее зонной диаграммы. Для практических приложений значительный интерес представляет снижение частот запрещенных зон (ЗЗ) при заданных габаритах КС. Покажем, что такое снижение обеспечивает КС, образованная чередующимися высоко- и низкоимпедансными неоднородностями (рис. 1, *b*). Обозначим эти неоднородности и индексы их параметров буквами  $h$  и  $l$  (high- и low-impedance). Волновые импедансы  $h$ - и  $l$ -неоднородностей, нормированные к импедансу однородной среды, отвечают условию  $Z_h > 1 > Z_l$ .

### Условия противофазности $h$ - и $l$ -неоднородностей

Поскольку коэффициент отражения от границы между однородной средой и неоднородностью с импедансом  $Z$  равен  $r_Z = (1 - Z)/(1 + Z)$ , соответствующие границы  $h$ - и  $l$ -неоднородностей как источники отраженных волн противофазны. При учете однократно отраженных волн от границ неоднородности коэффициент отражения одиночной неоднородности, приведенный к ее центру, равен  $r = 2ir_Z \sin \varphi$ , где  $\varphi = ka$  — фазовая длина неоднородности,  $k$  и  $a$  — волновое число и длина неоднородности. Из противофазности границ  $h$ - и  $l$ -неоднородностей следует и противофазность самих неоднородностей.

При выполнении амплитудных и фазовых условий

$$Z_h = Z_l^{-1} \quad \text{и} \quad \varphi_h = \varphi_l \quad (1)$$

имеем  $r_h = -r_l$ . В этом случае противофазные волны, отраженные  $h$ - и  $l$ -неоднородностями, равны по амплитуде. Поскольку брегговский набег фаз в ЗЗ с четными номерами кратен  $2\pi$ -радиан, такие волны взаимно компенсируются, и эти зоны в спектре КС отсутствуют.

С учетом многократных отражений коэффициент отражения одиночной неоднородности определяется выражением [1]

$$r = \frac{1 - Z_i}{1 + Z_i}, \quad (2)$$

$$Z_i = \frac{1 - iZ \operatorname{tg} \varphi}{1 - iZ^{-1} \operatorname{tg} \varphi}, \quad (3)$$

где  $Z_i$  — входной импеданс неоднородности. Исходя из (2), фаза коэффициента отражения равна

$$\varphi_r = \begin{cases} \operatorname{arctg} X, & Z < 1, \\ \pi + \operatorname{arctg} X, & Z > 1, \end{cases} \quad (4)$$

где  $X = 2 \operatorname{ctg} \varphi / (Z + Z^{-1})$ . Согласно (4), разность фаз коэффициентов отражения  $h$ - и  $l$ -неоднородностей, при-

веденная к их центрам, определяется выражением

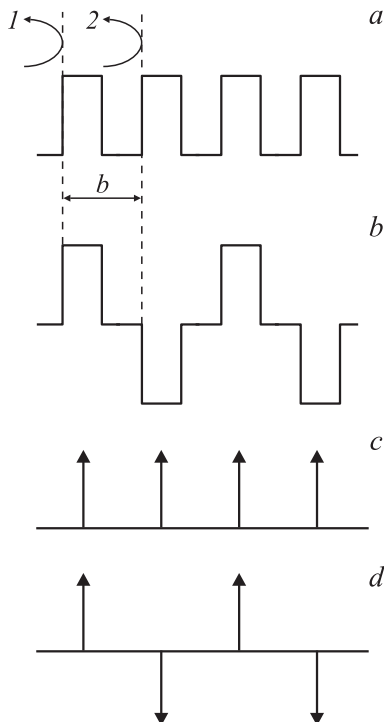
$$\Delta\varphi_r = \pi + \operatorname{arctg} \frac{X_h - X_l}{1 + X_h X_l} + \varphi_h - \varphi_l.$$

Условием (1) соответствует  $\Delta\varphi_r = \pi$ . В остальных случаях  $\Delta\varphi_r \approx \pi$ . Так, при  $Z_h = 4$ ,  $Z_l = 0.5$  и  $\varphi_h = \varphi_l = \pi/4$  имеем  $\Delta\varphi_r = 167^\circ$ . КС, образованная  $h$ - и  $l$ -неоднородностями — двухфазная — КСт (two-phase), а удовлетворяющая (1) — согласованная.

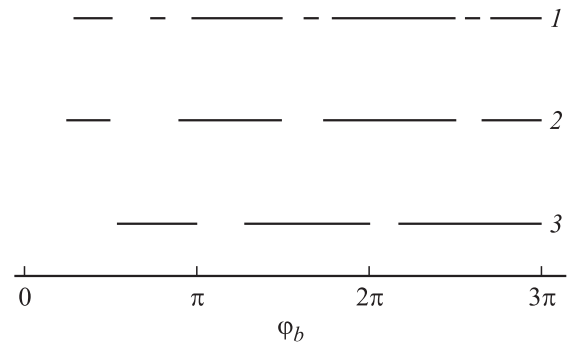
Сдвиг фаз между волнами 1 и 2, отраженными смежными неоднородностями (рис. 1, *a*), равен  $\Delta\varphi_r + 2\varphi_b$ , где  $\varphi_b$  — набег фаз на расстоянии  $b$ . Поскольку в КС  $\Delta\varphi_r = 0$ , а в КСт  $\Delta\varphi_r = \pi$ , волны 1 и 2 в первой ЗЗ синфазны соответственно при  $\varphi_b = \pi$  и  $\varphi_b = \pi/2$ . Бреговская частота первой ЗЗ КСт и габариты устройства на основе КСт в два раза меньше по сравнению с КС.

### Зонные диаграммы КСт

По аналогии с квантово-механическими потенциальными  $\delta$ -неоднородностями введем импедансные  $\delta_h$ - и  $\delta_l$ -неоднородности и рассмотрим модели КС и КСт в виде периодических решеток, образованных такими неоднородностями (рис. 1, *c, d*). В направлении распространения волны длина  $\delta$ -неоднородности  $a \rightarrow 0$ . Импедансы  $\delta_h$ - и  $\delta_l$ -неоднородностей равны  $Z_h = \alpha_h/a_h \rightarrow \infty$  и  $Z_l = a_l/\alpha_l \rightarrow 0$ , где  $\alpha$  — коэффициент. Исходя из (3),



**Рис. 1.** Импедансные зависимости КС и решетки импедансных  $\delta$ -неоднородностей: *a* — однофазная КС, *b* — период, 1 и 2 — отраженные волны; *b* — двухфазная КС; *c* и *d* — однофазная и двухфазная решетки импедансных  $\delta$ -неоднородностей.



**Рис. 2.** Взаимное расположение запрещенных зон несогласованных КСт (1), согласованной КСт (2), КСс (3) с соответствующими параметрами:  $\alpha_l = 2\alpha_h = b$ ,  $\alpha_{l,h} = b$ ,  $\alpha_h = b$ .

входные импедансы  $\delta_h$ - и  $\delta_l$ -неоднородностей определяются выражениями  $Z_{ih} = 1 + 2i\eta_h$  и  $Z_{il}^{-1} = 1 + 2i\eta_l$ , где  $\eta_{h,l} = -\alpha_{h,l}k_{h,l}/2$ .

Связав импедансы на границах  $\delta$ -неоднородностей [1], или из условия для собственных значений КС [2] имеем

$$Z_+ = \sqrt{\psi} + i\eta_h,$$

$$\psi = \frac{(B - \eta_h)[1 - \eta_h\eta_l + B(\eta_h + \eta_l)]}{B - \eta_l}, \quad (5)$$

где  $Z_+$  — входной импеданс КСт в положительном направлении на левой границе  $\delta_h$ -неоднородности;  $B = \operatorname{tg} \varphi_b$ ,  $\varphi_b = k_b b$ ,  $k_b$  — волновое число в области между  $\delta$ -неоднородностями.

Обозначив  $\chi = (\eta_h \cos \varphi_b - \sin \varphi_b)(\eta_l \cos \varphi_b - \sin \varphi_b)$ , из условия  $\psi < 0$  получим соотношения соответственно для нечетных и четных ЗЗ КСт:

$$\chi > 1, \quad \chi < 0. \quad (6)$$

Для согласованной КСт  $\eta_h = \eta_l = \eta$  и (5) преобразуется к виду

$$\psi = 1 - \eta^2 + 2\eta B.$$

Поскольку в этом случае  $\chi > 0$ , второе из условий (6) не выполняется и четные ЗЗ отсутствуют. Соотношение для ЗЗ согласованной КСт:

$$|\eta \cos \varphi_b - \sin \varphi_b| > 1. \quad (7)$$

Согласно [1], соотношение для ЗЗ КСс, образованной решеткой  $\delta_h$ -неоднородностей, имеет вид

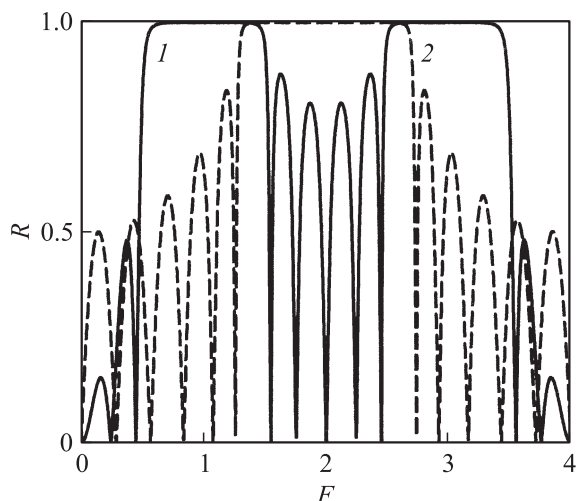
$$|\cos \varphi_b + \eta \sin \varphi_b| > 1. \quad (8)$$

Рис. 2 иллюстрирует расположение ЗЗ согласованной (6)–(8). Частоты ЗЗ несогласованной КСт приблизительно в два раза меньше по сравнению с КСс. Отношение средних частот первой ЗЗ КСс и согласованной КСт равно 2.05, а относительная ширина этой зоны — соответственно 59 и 64%.

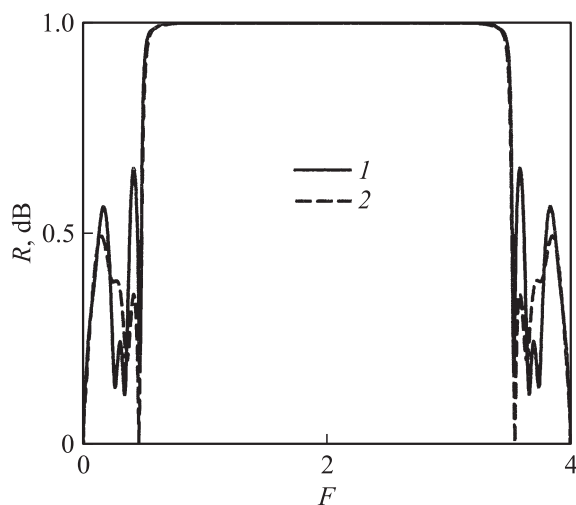
### Согласованные КСт

Если фазовая длина неоднородностей и зазоров между ними одинакова, то на средней частоте  $f_0$  первой ЗЗ  $\varphi_0 = \pi/4$  и толщина слоев КСт равна одной восьмой длины волны. Слои соответствующей КС на средней частоте ее первой ЗЗ — четвертьволновые. На рис. 3 приведены зависимости для таких КС. Относительные средние частоты ЗЗ КСт  $F_0 = 1, 3, \dots$ , а КС —  $F_0 = 2, 6, \dots$

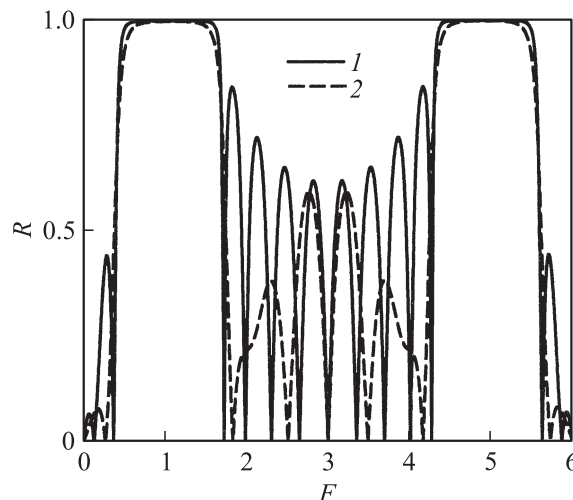
Поскольку ЗЗ КСт и КС перекрываются, сочетание КСт и КС в одной комбинированной КС позволяет сформировать широкие ЗЗ (рис. 4, зависимость 1). По уровню 0.5 относительная ширина ЗЗ равна 152%.



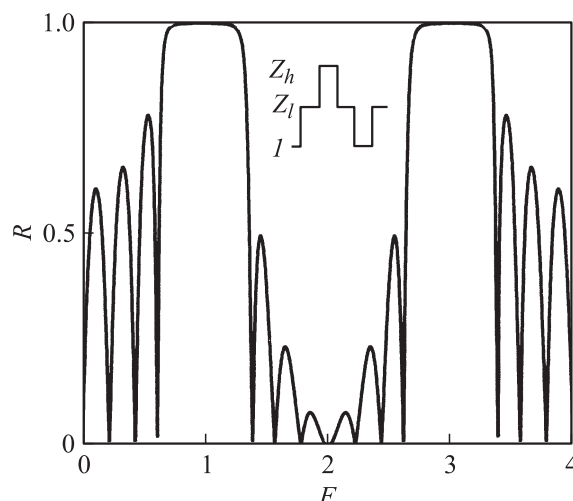
**Рис. 3.** Частотные зависимости коэффициента отражения (по модулю) КСт (1) и КС (2). Число слоев  $N = 11$ ,  $Z_h = Z = 3$ ;  $F = f/f_0$ .



**Рис. 4.** Частотные зависимости коэффициента отражения комбинированной КС без аподизации (1) и с краевой аподизацией (2).  $N = 22$ ,  $Z = 3$ .



**Рис. 5.** Частотные зависимости коэффициента отражения КСт без аподизации (1) и с краевой аподизацией (2).  $N = 9$ ,  $Z = 3$ .



**Рис. 6.** Частотная зависимость коэффициента отражения КСт при  $Z_l > 1$ .  $N = 15$ ,  $Z_l = 2$ ,  $Z_h = 4$ .

В случае КС, образованной четвертьволновыми слоями, такая полоса достигается лишь при  $Z = 27$  [1].

Для уменьшения уровня пульсаций характеристик КС необходимо использовать аподизацию, например краевую [3] (рис. 4, зависимость 2). В зависимости от того  $h$ - или  $l$ -слои крайние, импеданс крайних слоев аподизованной КС равен  $Z_h/2$  или  $2Z_l$ .

Если  $\varphi_0 = \pi/3$ , толщина  $h$ - и  $l$ -слоев на частоте  $f_0$  равна одной шестой длины волны. При этом волны, отраженные границами неоднородности, взаимно компенсируются в ЗЗ со значениями  $F_0 = 3, 9, \dots$ , и эти зоны в спектре КС отсутствуют. Ближайшей к первой ЗЗ будет лишь пятая зона (рис. 5).

Вследствие физических или технических ограничений соотношение  $Z_l < 1$  может не выполняться. Импедансная зависимость КСт для такого случая приведена на вставке рис. 6. При этом  $Z_h > Z_l > 1$ , и амплитудное

условие согласованной КС имеет вид  $Z_h = Z_l^2$ . Характеристика на рис. 6 соответствует такой КС при  $\varphi_0 = \pi/4$ .

## Двухфазный ЭК

Рассмотрим реализацию ЭКт. В первом приближении ЭК можно моделировать линией передачи с импедансной зависимостью, приведенной на рис. 1, *a*. Традиционная ЭК-неоднородность в виде отверстия на металлизированной поверхности под полосковым проводником — *h*-неоднородность с  $Z_h > 1$ . Комбинированные неоднородности, сочетающие неоднородности на металлизированной поверхности, в диэлектрической подложке и на сигнальной поверхности, имеют  $Z_h \gg 1$  [4].

Поскольку характеристический импеданс микрополосковой линии уменьшается с уменьшением толщины диэлектрика и с увеличением его диэлектрической проницаемости, *l*-неоднородность можно сформировать такими решениями: 1) несквозное металлизированное отверстие в подложке, гальванически соединенное с металлизированной поверхностью; 2) отверстие в подложке, заполненное диэлектриком более высокой диэлектрической проницаемости, чем подложка.

На рис. 7 приведены частотные характеристики ЭКт и ЭКс в первой ЗС. *h*- и *l*-неоднородности ЭКт сформированы под сигнальным проводником несквозными круглыми неметаллизированными и металлизированными отверстиями в диэлектрике. Параметры ЭКт и ЭКс: ширина полоскового проводника 2.5 mm, диаметр отверстий 8.6 mm,  $b = 20$  mm, число отверстий 5, относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика 7, толщина диэлектрика 2.1 mm, глубина отверстий 1.7 mm. В ЭКт металлизированы три отверстия с чередованием металлизированных и неметаллизированных отверстий. Расчет проведен в программном пакете Microwave Studio. Расчетные параметры: характеристический им-

педанс микрополосковой линии 50  $\Omega$ , относительная эффективная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 4.9$ ,  $Z_h = 2.6$ ,  $\epsilon_h = 1.7$ ,  $Z_l = 0.31$ ,  $\epsilon_l = 5.6$ ; на средней частоте  $\Delta\varphi_r = 186^\circ$ . Параметры неоднородностей рассчитаны по модели неоднородной линии передачи. Экспериментальные и расчетные значения  $f_0$ , определяемые минимумом коэффициента прохождения, для ЭКт и ЭКс равны соответственно 1.94, 4.19 и 1.84, 4.04 GHz. Значения  $f_0$  ЭКт в 2.2 раза меньше. Превышение значения 2 обусловлено тем, что скорость волны в ЭКт на 10% меньше, чем в ЭКс, поскольку  $\epsilon_l > \epsilon_h$ . При расчете на заданные частоты размеры ЭКт будут в 2.2 раза меньше по сравнению с ЭКс.

Двухфазные КС позволяют заметно уменьшить габариты устройств на их основе. Двухфазные неоднородности повышают и эффективность КС за счет увеличения отношения импедансов разнородных областей структуры.

## Список литературы

- [1] Нелин Е.А. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 7. С. 27–31.
- [2] Нелин Е.А. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 1. С. 137–139.
- [3] Нелин Е.А. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 11. С. 120–121.
- [4] Назарько А.И., Нелин Е.А., Понсуй В.И., Тимофеева Ю.Ф. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 4. С. 138–139.

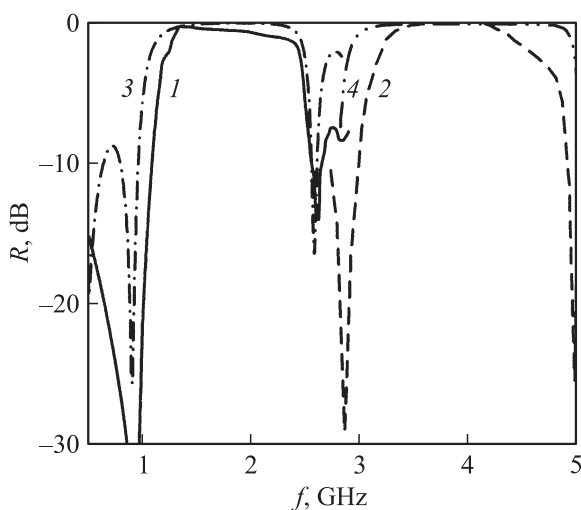


Рис. 7. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (3, 4) частотные зависимости коэффициентов отражения ЭКт (1, 3) и ЭКс (2, 4).