

## Выводы

Анализ результатов моделирования, представленных в таблице, позволяет сделать вывод о том, что для адаптивного выравнивания частотной характеристики измерительного канала более предпочтительными являются случайный и частотно-модулированный калибровочные сигналы, поскольку они обеспечивают лучшее качество выравнивания по сравнению с периодическими сигналами. Кроме того, для случайного и ЛЧМ-сигнала действие помех приводит лишь к незначительному увеличению максимальной и среднеквадратической погрешностей, в то время как для импульсных сигналов эти погрешности возрастают в несколько раз.

В целом результаты имитационного моделирования полностью подтверждают работоспособность рассмотренной адаптивной системы выравнивания частотной характеристики и согласуются с теоретическими выкладками.

*Научная новизна* полученных результатов заключается в том, что разработана обобщенная структура адаптивной системы выравнивания частотной характеристики измерительного канала и исследовано влияние вида входного калибровочного сигнала и внутренних шумов измерительного канала на качество выравнивания частотной характеристики, выполнен анализ результатов моделирования.

*Практическая значимость* работы состоит в том, что использование предлагаемого адаптивного корректора позволит существенно уменьшить систематическую погрешность динамических измерений, вызванную неравномерностью частотной характеристики измерительного канала.

**Список литературы:** 1. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. К.: Выща шк., 1983. 455 с. 2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с. 3. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М: Радио и связь, 1989. 440 с. 4. Льюнг Л. Идентификация систем: Теория для пользователя. М: Наука, 1991. 431 с. 5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб: Питер, 2006. 751 с.

*Поступила в редколлегию 20.12.2007*

**Запорожец Олег Васильевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры метрологии и измерительной техники ХНУРЭ. Научные интересы: адаптивные системы управления, искусственные нейронные сети, адаптивная цифровая обработка сигналов. Увлечения и хобби: рыбалка. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-331 (раб.), e-mail: oleg\_zaporozhets@rambler.ru

---

УДК 621.373.826

*А.В. ДЁГТЕВ*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОННЫХ ЗАПРЕЩЕННЫХ ЗОН ДВУМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

---

Исследуются параметры фотонных запрещенных зон фотонных кристаллов на основе материалов AlGaAs и GaAs. Фотонные кристаллы получены группированием отверстий в названных материалах (либо же стержней из этих же материалов в воздухе) с постоянной величиной решетки и размерами отверстий (стержней). Изучается дисперсия показателя преломления в GaAs в телекоммуникационном диапазоне длин волн. Предлагается метод расчета фотонных запрещенных зон фотонных кристаллов. Описываются геометрические области существования фотонных запрещенных зон, а также анализируется влияние геометрических параметров на параметры фотонной запрещенной зоны – ее ширину и центральную величину.

### 1. Введение

Фотонные кристаллы (ФК) являются одним из наиболее важных и перспективных строительных блоков для полностью оптических коммуникационных технологий. Прямое применение концепции фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) в общем требует использования трехмерных ФК, однако наибольший интерес в настоящее время представляют двумерные ФК, так как они являются более простыми в изготовлении и потенциально более

близкими к практическому применению. Вопросы стандартизации элементной базы на основе ФК еще далеки от совершенства, и разные методы изготовления, архитектуры и стратегий интеграции для двумерных ФК находятся в состоянии исследования для получения первого устройства, готового для производства и продажи [1].

Величина ФЗЗ ФК структур обусловлена показателями преломления двух материалов, из которых состоит структура ФК, а также геометрическими параметрами ФК [2, 4]. До сих пор имеется мало информации о влиянии ФК параметров на свойства двумерных ФК на основе AlGaAs и GaAs в диапазоне длин волн 0.85–1.55 мкм. Например, в [4, 5] было исследовано влияние геометрических параметров на ФК только одномерной периодической структуры.

Таким образом, цель данной работы – исследование влияния геометрических и физических параметров на ФЗЗ двумерного ФК. Изменялись следующие геометрические параметры: диаметр стержней и расстояние между ними. Также варьировался один физический параметр – это показатель преломления стержня (с расчетами, основанными на двух разных величинах).

Похожий случай был рассмотрен Янопулосом [6], где были рассчитаны ФЗЗ карты ТМ мод для ФК с двумерными стержнями из GaAs ( $n=3.52$ ) в воздухе. Однако логично исследовать случай, когда ФЗЗ устройства следует конструировать для конкретных применений, другими словами, когда длина волны зафиксирована и необходимо найти точные величины ФК параметров, чтобы существовала ФЗЗ для этой длины волны. Поэтому основная задача, решаемая в данной работе, это расчет ФЗЗ карт для ФК, которые работают на телекоммуникационной длине волны  $\lambda \sim 1.55$  мкм.

## 2. Исследование дисперсии показателя преломления

Для исследования устройств на ФК необходимо знать точный показатель преломления материалов, так как он влияет на длину волны входящего сигнала. Поскольку материалы обладают дисперсией показателя преломления света, то необходимо знать, как показатель преломления будет меняться для телекоммуникационных длин волн. Эта информация может быть получена при использовании аналитического уравнения дисперсии показателя преломления света. Как было показано Пихтиным и Яськовым в [7], это приводит к полуэмпирическому методу для расчета спектральной зависимости показателя преломления света  $n(\hbar\omega)$  в полупроводниках, который учитывает особенности зонных структур материалов. Это простое аналитическое уравнение, которое описывает зависимость  $n(\hbar\omega)$  в широком спектральном диапазоне. Оно имеет следующий вид:

$$n^2(\hbar\omega) = 1 + \frac{A}{\pi} \ln \frac{E_1^2 - (\hbar\omega)^2}{E_0^2 - (\hbar\omega)^2} + \frac{G_1}{E_1^2 - (\hbar\omega)^2} + \frac{G_2}{E_2^2 - (\hbar\omega)^2} + \frac{G_3}{E_3^2 - (\hbar\omega)^2}, \quad (1)$$

где  $n$  – показатель преломления света;  $\hbar$  – постоянная Планка;  $\omega$  – круговая частота света;  $A$  – амплитудный коэффициент;  $E_0$  – ширина ФЗЗ в центре зоны Брюллиена;  $E_1, E_2$  – энергия фотонов;  $E_3$  – энергия поперечного фотона;  $G_1, G_2$  – экспериментальные коэффициенты;  $G_3$  – коэффициент, учитывающий влияние поляризации решетки на показатель преломления.

В данном исследовании показаны результаты для длины волны 1.55 мкм, полученные для материала GaAs. В выбранной области длин волн показатель преломления GaAs меняется незначительно, так что было возможно использовать усредненное значение показателя преломления GaAs  $n = 3.5$ .

## 3. Расчет ФЗЗ

Для расчета ФЗЗ был выбран стандартный метод анализа структур с определенной периодичностью (ФК), основанный на решении уравнения Максвелла для собственных значений. Сначала необходимо получить векторное уравнение Гельмгольца [8].

Начиная построение модели с уравнений Максвелла:

$$\nabla \times E(x, t) = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad \nabla \times H(x, t) = \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (2)$$

принимая, что все материалы линейны, не имеют потерь и изотропны. Таким образом:

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon(x) E, \quad B = \mu_0 H, \quad (3)$$

где диэлектрическая функция  $\varepsilon(x)$  – это квадрат показателя преломления.

Рассматривая стационарное решение в виде

$$E(x) = E(x) \exp(-i\omega t), \quad H(x) = H(x) \exp(-i\omega t), \quad (4)$$

можно скомбинировать уравнение Максвелла для получения векторного уравнения Гельмгольца:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\varepsilon(x)} \nabla \times \right) H(x) = \frac{\omega^2}{c^2} H(x). \quad (5)$$

Согласно теореме Блоха [9] можно записать  $H(x) = \exp(ik \cdot x) u_k(x)$ , где  $u_k(x)$  – функция с периодичностью решетки. Подставив это выражение в уравнение Гельмгольца (5), получим:

$$\hat{L} u_k = (ik + \nabla) \times \left( \frac{1}{\varepsilon(x)} (ik + \nabla) \right) \times u_k = \bar{\omega}^2 u_k, \quad (6)$$

где необходимо найти оператор  $\hat{L}$  и нормированную частоту  $\bar{\omega} = \omega/c$ . Это фундаментальное уравнение, являющееся уравнением собственных значений для неизвестных собственных величин  $\bar{\omega}$  и собственного вектора  $u_k$ , с волновым вектором  $k$  в качестве свободного параметра. Здесь волновой вектор – это независимая переменная. Необходимо подчеркнуть, что частота – это независимая переменная и волновой вектор или постоянная распространения – это собственная величина.

Для каждого значения  $k$  уравнение (6) имеет бесконечное число решений  $\bar{\omega}_{k,n}$ , обозначенных с помощью номера зоны  $n$  в порядке возрастания частоты. Самая низкая зона обозначается как  $n = 0$ . Так как изменение величины  $k$  возможно в любых пределах, набор решений  $\bar{\omega}_{k,n}$  для фиксированной величины  $n$  образует зону, и зонная структура кристалла состоит из всех возможных для данного кристалла зон. Необходимо и достаточно рассматривать величины  $k$  внутри первой зоны Брюллиена обратной решетки. Таким образом, полное описание зонной структуры состоит в нахождении всех решений  $\bar{\omega}_{k,n}$  для всех величин  $k$  в первой зоне Брюллиена.

Для любых разумных распределений показателей преломления значения частоты в определенных зонах ( $\bar{\omega}_{k,n}$ ) меняются плавно при изменении волнового вектора, формируя поверхность.

Концепция ФЗЗ возникает при рассмотрении отношения соседних зон, например  $n$  и  $n+1$ . В большинстве случаев существует хотя бы одна или больше точек в  $k$  пространстве, где соседние зоны соприкасаются. Однако если распределение показателей преломления выбрано правильно, то могут существовать такие соседние зоны, которые не соприкасаются ни в одной точке. В этом случае существует диапазон частот между этими двумя зонами, для которых не существует решений вообще. Такой диапазон и составляет ФЗЗ и излучение с частотой внутри такого диапазона не может распространяться в кристалле.

Далее будет рассмотрена численная схема расчета мод периодической системы.

Задачей является решение проблемы собственных значений в уравнении (6) для частоты  $\bar{\omega}$  и функции мод  $u_k$ , для каждой необходимой величины волнового вектора  $k$ . Метод использует вариационную формулировку уравнений Максвелла. Так как оператор  $\hat{L}$  является эрмитовым, то функция

$$E[u_k(x)] = \frac{\int dx^3 u_k^* [\hat{L} u_k]}{\int dx^3 u_k^* u_k} \quad (7)$$

будет гарантировано действительной и положительной для любой функции магнитного поля  $u_k$ . Более того, можно показать, что функция, которая минимизирует  $E[u_k]$ , является собственным вектором  $\hat{L}$  минимальной частоты  $\bar{\omega}$ . Следующая наименьшая мода – это функция, которая минимизирует  $E[u_k]$  и является одновременно ортогональной к наименьшей моде. Поэтому можно найти много мод (зон) при необходимости для последовательного минимизирования  $E[u_k]$ , каждый раз ортогонализируя новую моду ко всем найденным ранее модам.

Для обеспечения минимизации неизвестная модовая функция представляется в виде разложения Фурье на плоские волны обратной решетки:

$$u_k = \sum_{G,\sigma} c_{G,\sigma} e_{G,\sigma} \exp(iG \cdot x), \quad (8)$$

где суммирование производится по всем векторам обратной решетки  $G$  и поляризационным состояниям  $\sigma$ , а  $e_{G,\sigma}$  – это единичный поляризационный вектор. В численном выражении суммирование ограничивается корректным решением, и расчет  $E[u_k]$  становится матричной задачей, которая решается с помощью итерационного метода, известного как метод разложения по плоским волнам.

#### 4. Результаты расчетов ФЗЗ

В данной работе были исследованы 6 типов ФК структур на основе GaAs с квадратной решеткой: цилиндрические, квадратные и шестиугольные стержни из GaAs в воздухе и цилиндрические, квадратные и шестиугольные отверстия в GaAs, перпендикулярные к направлению распространения электромагнитных волн. Также были исследованы 2 типа ФК структур на основе AlGaAs с квадратной решеткой: цилиндрические стержни из AlGaAs в воздухе и цилиндрические отверстия в AlGaAs. Велось рассмотрение только первой ФЗЗ для ТМ мод. Основной материал GaAs ( $n=3.5$ ) и  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$  ( $n=3.2$ ). Выбор именно этих материалов имеет две причины. Первая – эти материалы были исследованы достаточно хорошо и широко используются в настоящее время, а целью данной работы является не открытие новых материалов для производства ФК, а тщательное исследование ФК на основе существующих материалов. Вторая причина состояла в том, что работа была ориентирована на применение полученных теоретических результатов для последующего – изготовления устройств именно на основе этих материалов и сравнения теоретических и экспериментальных результатов.

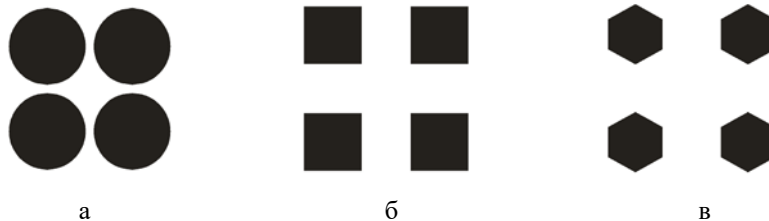


Рис. 1. Структура ФК с квадратной решеткой цилиндрических (а), квадратных (б), шестиугольных (в), отверстий (стержней)

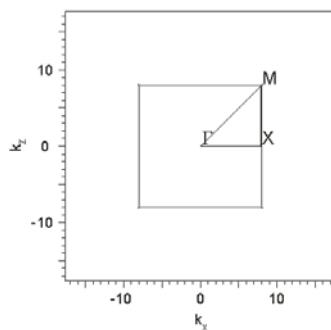


Рис. 2. Первая зона Брлюллиена и направления  $k$  вектора для ФК

На рис. 1 показаны структуры исследуемых ФК. Как было сказано выше, исследуются 6 основных случаев: квадратная решетка с цилиндрическими отверстиями (стержнями) – рис. 1, а, квадратная решетка с квадратными отверстиями (стержнями) – рис. 1, б и квадратная решетка с шестиугольными отверстиями (стержнями) – рис. 1, в. На рис. 2 показана первая зона Бриллюэна и направления  $k$  векторов, соответствующих ФК структурам (см. рис. 1). Как можно видеть, первая зона Бриллюэна имеет квадратную форму. Это очевидно, так как ФК имеет квадратную решетку, и первая зона Бриллюэна имеет ту же форму, что и обратная решетка. Было исследовано распространение электромагнитных волн вдоль трех направлений векторов  $k$  для ФК: G-X, X-M и M-G.

В отличие от [6] результаты для ФЗЗ ФК были представлены в виде характеристик, где длина волны фиксирована, что дало более удобную информацию для применения в инженерных расчетах. Карты ФЗЗ в такой форме были предложены впервые и могут быть использованы для определения диапазона геометрических параметров, которые обеспечивают существование ФЗЗ для определенной длины волны в случае ТМ поляризации (в терминах, принятых Янопулосом в [6]).

Для полученных ФК были рассчитаны ФЗЗ. Были просканированы два геометрических параметра: а) постоянная решетки и б) диаметр стержней для всего диапазона, для которого существует ФЗЗ для длин волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{м}$ . Целью расчетов было определение ФЗЗ для ФК, который работает на телекоммуникационной длине волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{м}$ .

В результате были получены ФЗЗ карты для длины волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{м}$  для обоих материалов ФК, которые показывают диапазон геометрических параметров, для которых существует ФЗЗ для фиксированной длины волны (в данном случае это  $\lambda = 1.55 \mu\text{м}$ ).

На рис. 3 и 4 показаны геометрические области существования ФЗЗ – ФЗЗ карты для длины волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{м}$ , с величиной постоянной решетки по вертикальной оси и диаметром стержней по горизонтальной оси. Если взять точку внутри этой области, то для данных геометрических параметров ФК будет иметь ФЗЗ при данной длине волны.

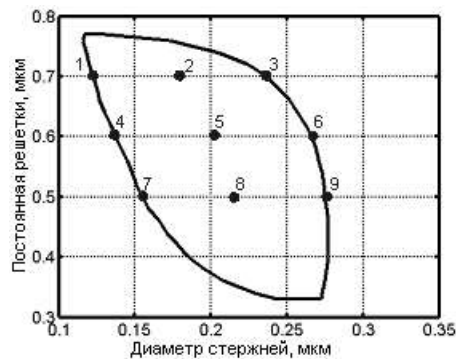


Рис. 3. Геометрическая область существования ФЗЗ ТМ моды для длины волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{м}$  для ФК с квадратной решеткой цилиндрических отверстий в GaAs

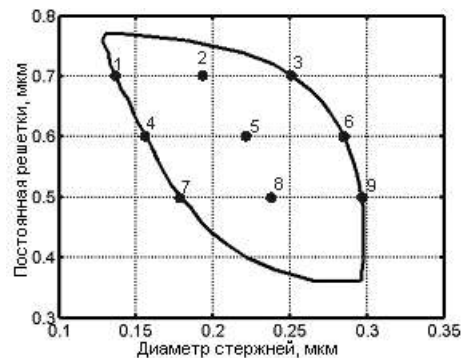


Рис. 4. Геометрическая область существования ФЗЗ ТМ моды для длины волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{м}$  для ФК с квадратной решеткой цилиндрических отверстий в AlGaAs

На рис. 5 и 6 показаны графы для ширины и центральной точки ФЗЗ. Ширина ФЗЗ отмечена белым цветом, а центральная точка ФЗЗ – черным. Проанализировав рис. 7 и 8, можно сделать вывод, что для фиксированной величины постоянной решетки возрастает ширина ФЗЗ и центральная точка ФЗЗ сдвигается в область длинных волн, т.е. ширина и центральная величина ФЗЗ возрастают при уменьшении коэффициента заполнения. Но ФЗЗ все еще существует для необходимой длины волны, так как центральная величина ФЗЗ возрастает, но в то же время также возрастает и ширина ФЗЗ.

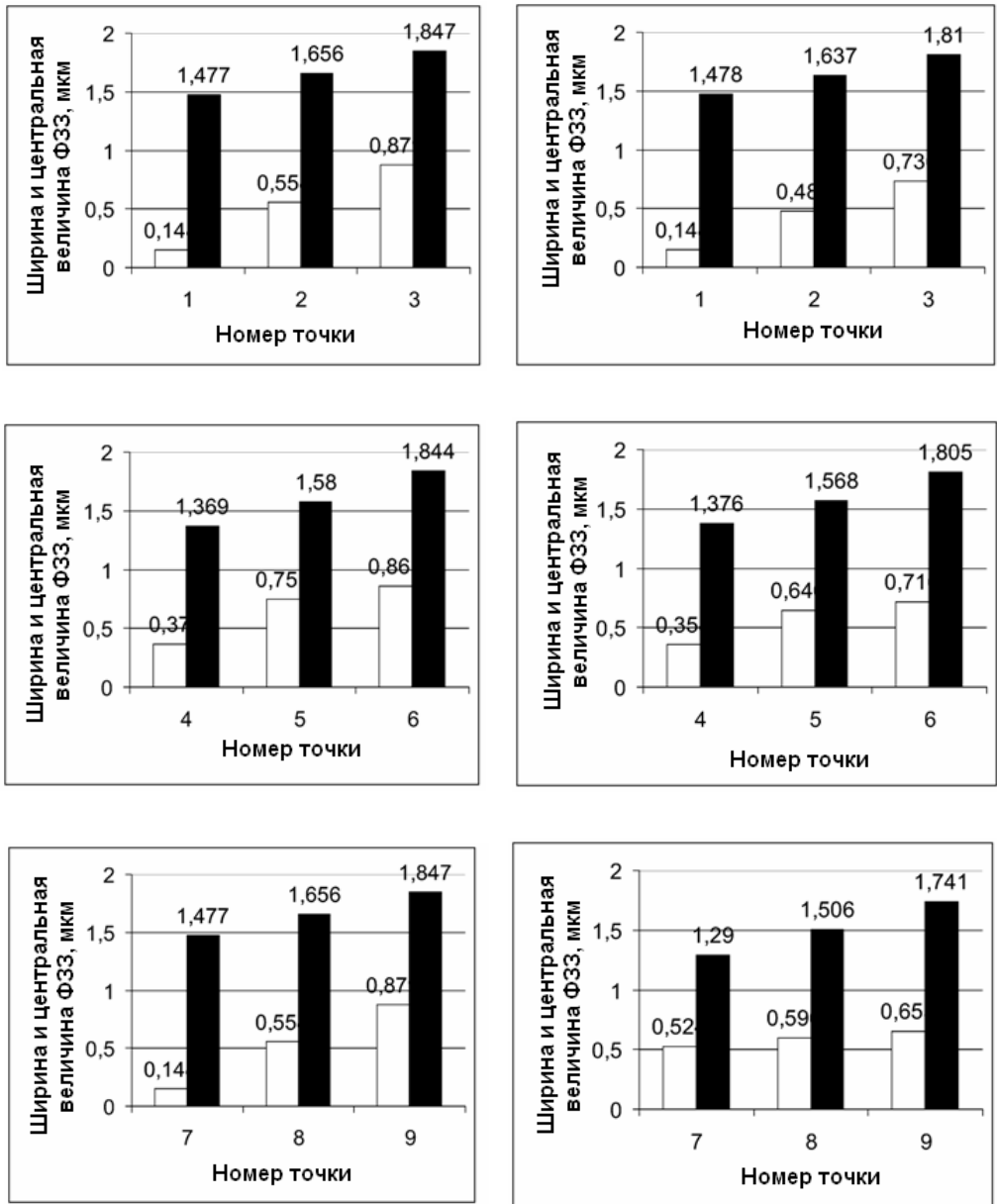


Рис. 5. Ширина и центральная величина ФЗЗ для ФК на основе GaAs (белый цвет – ширина ФЗЗ, черный – центральная точка ФЗЗ)      Рис. 6. Ширина и центральная величина ФЗЗ для ФК на основе AlGaAs (белый цвет – ширина ФЗЗ, черный – центральная точка ФЗЗ)

Эта информация очень важна, так как во время процесса изготовления возможны флуктуации, и необходимо знать, как изменится ширина ФЗЗ и ее центральная величина относительно флуктуаций. Без этой информации границы существования ФЗЗ могут быть нарушены для необходимой длины волны.

Необходимо объяснить, почему для фиксированной величины постоянной решетки ширина ФЗЗ возрастает и центральная точка ФЗЗ сдвигается в длинноволновую область. Причина состоит в том, что в этом случае коэффициент заполнения воздухом уменьшается, и размеры диэлектрических стержней растут. Это означает, что более длинные волны отражаются от этого ФК и диэлектрическая зона (нижняя граница ФЗЗ) [6] сдвигается к меньшим частотам, таким образом увеличивая ширину ФЗЗ. И так как нижняя граница ФЗЗ опускается, то это и есть причина сдвига центральной точки ФЗЗ в длинноволновую область (низкочастотная область).

Теперь необходимо сравнить ФЗЗ карты для ФК на основе квадратной решетки отверстий и стержней. Как можно видеть на рис. 7-10, форма и величина ФЗЗ решеток из стержней и отверстий отличается, но не намного. Это объясняется тем, что во всех этих случаях сохраняется тип решетки, а именно исследуется квадратная решетка.



Рис. 7. Область геометрического существования ФЗЗ для длины волны 1.55 мкм для ФК с квадратной решеткой цилиндрических стержней (полученный результат)



Рис. 8. Область геометрического существования ФЗЗ для длины волны 1.55 мкм для ФК с квадратной решеткой цилиндрических стержней (результат Янопулоса и соавторов)

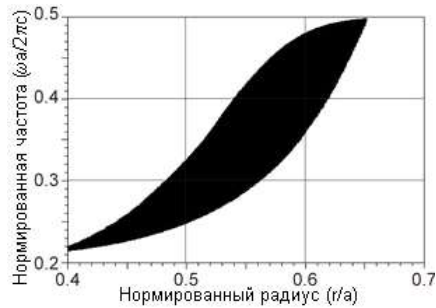


Рис. 9. Область геометрического существования ФЗЗ для длины волны 1.55 мкм для ФК с квадратной решеткой цилиндрических отверстий (полученный результат)



Рис. 10. Область геометрического существования ФЗЗ для длины волны 1.55 мкм для ФК с квадратной решеткой цилиндрических отверстий (результат Янопулоса и соавторов)

И наконец, были сравнены полученные результаты (рис. 7 и 9) с результатами работы [6] (рис. 8 и 10). Для начала результаты были представлены в привычном виде ФЗЗ карт – с нормализованной частотой и нормализованными радиусами стержней по осям. Можно видеть, что ФЗЗ карты одинаковы с небольшой разницей в расположении зон из-за разницы показателей преломления, имеющей место в обоих случаях. На этих рисунках:  $\omega$  - круговая частота,  $a$  - постоянная решетки и  $r$  - радиус стержней. Но в отличие от [6] получены величины ширин ФЗЗ и центральных частот ФЗЗ как важные дополнительные параметры. Сравнение приведенных характеристик указывает на хорошее совпадение полученных результатов с результатами [6].

На основе использования предложенного типа карт ФЗЗ возможно создание ФК устройств, таких как ФК волноводы, которые будут работать в определенном волновом диапазоне.

## 5. Выводы

Использовано аналитическое решение уравнение для дисперсии показателя преломления света, что дало возможность провести исследование ФК структур на различных длинах волн.

Были исследованы ФЗЗ для ФК структур на основе GaAs и AlGaAs. В результате получены геометрические области существования ФЗЗ кристалла, работающего на длине волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{м}$ . Были представлены карты ФЗЗ в ином виде с помощью фиксации длины волны, что дало больше полезной информации для инженерных расчетов. Данный тип диаграмм был показан впервые.

Эти диаграммы могут обеспечить важную и полезную информацию для изготовления ФК устройств, которые работают на эффекте ФЗЗ, так как могут быть использованы для определения геометрических параметров, которые обеспечивают наличие ФЗЗ для необходимой длины волны. Также одновременно получена дополнительная информация о ширине и центральной частоте ФЗЗ. С помощью этих карт ФЗЗ могут быть найдены геометрические параметры, для которых ФК имеет ФЗЗ, соответствующие диапазону частоты, используемые в оптических телекоммуникационных системах.

Получены графы, отображающие влияние геометрических параметров на величины ФЗЗ.

Следует отметить хорошее согласование между полученными результатами и результатами Янопулоса [6]. ФК на основе GaAs и AlGaAs имеют небольшое различие в форме и размерах ФЗЗ карт из-за небольшой разницы показателей преломления материалов.

### Благодарности

Данная работа была выполнена при поддержке международного индивидуального аспирантского гранта на проведение проекта по теме диссертации INTAS/Belgium № 04-83-3066. Автор выражает благодарность проф. И.А.Сухоиванову за помощь и советы при выполнении работы и подготовке рукописи.

**Список литературы:** 1. *Romanato F., Businaro L., Di Fabrizio E., Passaseo A., De Vittorio M., Cingolani R., Patrini M., Galli M., Bajoni D., Andreani L. C., Giacometti F., Gentili M., Peyrade D., Chen Y.* Fabrication by means of x-ray lithography of two-dimensional GaAs/AlGaAs photonic crystals with an unconventional unit cell // *Nanotechnology*. 2002. № 13. P. 644-652. 2. *Camargo E. A., Chong H. M. H., De La Rue R. M.* 2D Photonic crystal thermo-optic switch based on AlGaAs/GaAs epitaxial structure // *Optics Express*. 2004. Vol. 12, № 4. P. 588-592. 3. *Sugimoto Y., Ikeda N., Carlsson N., Asakawa K., Kawai N., Inoue K.* AlGaAs-based two-dimensional photonic crystal slab with defect waveguides for planar lightwave circuit applications // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2002. Vol. 38, № 7. P. 760-769. 4. *Claudio Andreani L., Gerace D., Agio M.* Gap maps, diffraction losses, and exciton-polaritons in photonic crystal slabs // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. 2004. № 2. P. 103-110. 5. *Gerace D., Claudio Andreani L.* Gap maps and intrinsic diffraction losses in one-dimensional photonic crystal slabs // *Physical Review E*. 2004. Vol. 69. P. 1-9. 6. *John D. Joannopoulos, Robert D. Meade, Joshua N. Winn.* Photonic crystals: molding the flow of light. Chichester, West Sussex: Princeton University Press, 1995. 137 p. 7. *Pikhtin A.N., Yas'kov A.D.* Dispersion of the light refractive index inside a semiconductor which has both the diamond structure and the blend // *Physics and Techniques of Semiconductors*. 1978. Vol. 12, № 6. P. 1047-1053. 8. *Jackson J.D.* Classical Electrodynamics, New York: John Wiley & Sons, Inc., 3<sup>rd</sup> edition, 1999. 9. *Kittel C.* Introduction to Solid State Physics. John Wiley & Sons, Seventh Edition, 1996.

Поступила в редколлегию 02.12.2007

**Дёгтев Андрей Викторович**, м.н.с. каф. ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: фотонные кристаллы, устройства на основе фотонных кристаллов. Увлечения и хобби: английский, фотография. Адрес: Украина, 61166 Харьков, пр. Ленина, 14, тел. раб. (+380572) 70-21-384, факс: (+380)(57) 7021-117, e-mail: dyogtyev@yahoo.com