

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФК ВОЛНОВОДОВ

### Введение

В физике твердого тела существует два фундаментальных типа решеток: квадратная и гексагональная решетки [1]. Также существует три фундаментальных формы отверстий – цилиндрическая, квадратная и гексагональная. Квадратная и гексагональная типы решеток и устройства на их основе были исследованы достаточно хорошо. Но, например, не были сравнены между собой и проанализированы характеристики всех типов фундаментальных ФК решеток при различном сочетании возможных фундаментальных форм отверстий. В работах [2, 3] показаны и сравнены зонные состояния треугольной и квадратной решеток цилиндрических отверстий в GaAs, в работе [4] аналогичное исследование было проведено для кварца, а также частично были исследованы некоторые другие свойства фотонных запрещенных зон (ФЗЗ). Поскольку в настоящее время именно GaAs является базовым и наиболее распространенным материалом для изготовления ФК устройств, внимание в данной работе будет уделено исследованию фотонных кристаллов на основе GaAs.

Таким образом, цель данной работы – исследовать и сравнить характеристики всех фундаментальных ФК волноводов на основе GaAs с точки зрения определения среди них наиболее эффективного волновода.

### Спектры пропускания ФК волноводов

В данной работе были исследованы ФК волноводы на основе следующих фундаментальных типов ФК решеток: квадратной и треугольной с круглыми, квадратными и гексагональными отверстиями. В нашем случае ФК – это группа отверстий в материале, образующем планарный двумерный ФК. В качестве базового материала выбран GaAs.

Планарный ФК волновод был получен пропуском одного ряда отверстий, что соответствует случаю, когда диаметр отверстий в сердцевине равен нулю. Пример геометрической модели ФК волновода на основе квадратной решетки круглых отверстий показан на рис. 1 (вид сверху). Черные области – это вытравленные области, т.е. области отверстий, например. Перечислим основные особенности и параметры рассматриваемой модели ФК волновода. Длина волновода составляет 20 периодов ФК решетки. Дополнительные входной и выходной планарные гребенчатые волноводы, введенные в модель для обеспечения более корректного представления процесса распространения оптического сигнала в структуре, что обеспечивается тем, что точки снятия характеристик находятся в начале входного и в конце выходного гребенчатых волноводов (серые области). При этом ширины сердцевины входного и выходного гребенчатых волноводов равны длине между краями ближайших к сердцевине отверстий (другими словами – постоянная решетки минус диаметр отверстия). Оба гребенчатых волновода пересекаются с первым рядом отверстий, и край волновода находится точно в центре отверстий. На вход входного волновода подается основная мода данного волновода. Рабочая длина волны 1.55 микрон.

На рис. 2 – 7 представлены спектры пропускания исследуемых ФК волноводов для ТЕ мод. Параметры ФК области данных волноводов выбраны таким образом, чтобы рабочая длина волны попадала в самый центр ФЗЗ карты данного ФК для устойчивости характеристик волноводов при незначительном изменении его параметров.

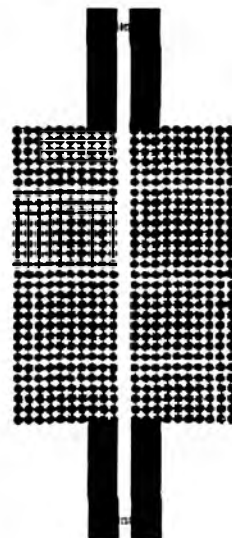


Рис. 1

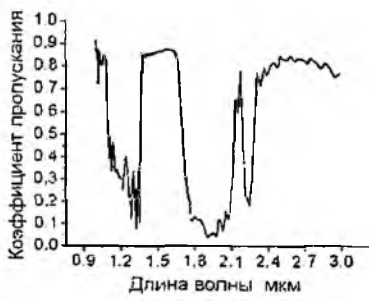


Рис. 2

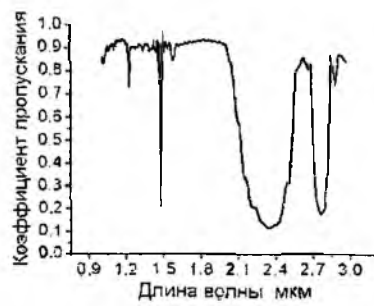


Рис. 3

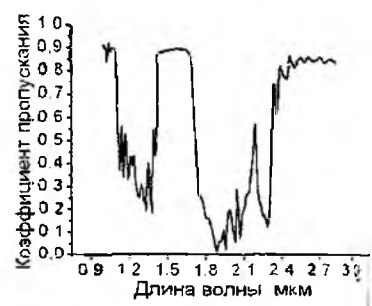


Рис. 4

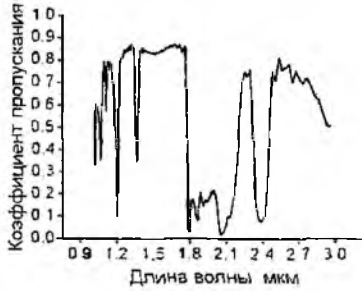


Рис. 5

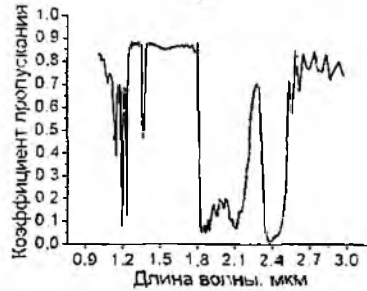


Рис. 6

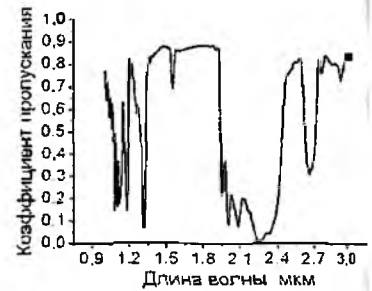


Рис. 7

На рис. 2 – 7 можно видеть, что для TE мод во всех случаях просматривается хорошо различимая полоса пропускания в районе 1.55 микрон. Это очевидно, так как область оболочки (ФК) ФК волновода имеет ФЗЗ для этой длины волны. В последующем полоса пропускания будет иметь четко различимую зону в районе 1.55 микрон с наивысшими величинами пропускания.

Для ФК волновода на основе ФК квадратной решетки круглых отверстий (рис. 2) может быть видна широкая полоса пропускания в диапазоне 1.38–1.65 микрон с довольно высокой величиной пропускания (около 0.85). Это означает, что волны с этой длиной волны проходят через волновод, не претерпевая значительных потерь. Величина пропускания для рабочей длины волны 1.55 микрон составляет около 0.87. Ширина ФЗЗ для соответствующего ФК равна 1.45 – 1.62 микрометра. Таким образом, ширина ФЗЗ соответствующего ФК немного меньше чем полоса пропускания и расположена внутри полосы пропускания.

Для ФК волновода на основе квадратной решетки квадратных отверстий (рис. 3) можно наблюдать широкую полосу пропускания в диапазоне 1.52 – 2 микрона с высокой величиной пропускания (около 0.9). Ширина ФЗЗ соответствующего ФК равна 1.35 – 1.86 микрон. Таким образом, ФЗЗ используемого ФК меньше чем полоса пропускания и лежит внутри этой полосы.

Для ФК волновода на основе квадратной решетки гексагональных отверстий (рис. 4) получена полоса пропускания в диапазоне 1.42 – 1.65 микрон с высоким пропусканием (0.9). Для длины волны 1.55 микрон величина пропускания равна 0.89. Ширина ФЗЗ для используемого ФК лежит в диапазоне 1.52 – 1.66 микрон. Таким образом, ФЗЗ меньше, чем полоса пропускания и лежит внутри полосы пропускания.

Для ФК волновода на основе треугольной решетки круглых отверстий (рис. 5) полоса пропускания получена в диапазоне 1.4 – 1.76 микрометров с величиной пропускания около 0.85. Для длины волны 1.55 микрон величина пропускания равна 0.84. Ширина ФЗЗ соответствующего ФК равна 1.18 – 1.96 микрон. Таким образом, ФЗЗ ширина больше чем полоса пропускания, которая полностью расположена внутри диапазона ФЗЗ.

ФК волновод на основе треугольной решетки квадратных отверстий (рис. 6) показал четкую полосу пропускания в диапазоне 1.4 – 1.8 микрометров с величиной пропускания около 0.85. Для длины волны 1.55 микрон величина пропускания получена равной 0.85. Ширина ФЗЗ соответствующего ФК равна 1.27 – 2 микрон. Таким образом, ФЗЗ ширина больше чем полоса пропускания, которая полностью расположена внутри диапазона ФЗЗ.

Наконец, для ФК волновода на основе треугольной решетки гексагональных отверстий (рис. 7) видна полоса пропускания в диапазоне 1.57 – 1.92 микрон с величиной пропускания около 0.85. Для длины волны 1.55 микрон величина пропускания не такая высокая и равна 0.7. Ширина ФЗЗ соответствующего ФК равна 1.2 – 2.1 микрон. Таким образом, ФЗЗ ширина больше чем полоса пропускания, которая полностью расположена внутри диапазона ФЗЗ.

Теперь необходимо провести сравнительный анализ спектров пропускания всех случаев.

Сравнивая спектры пропускания ФК волновода с квадратной решеткой с различными отверстиями, можно прийти к выводу, что наибольшая полоса пропускания (1.52 – 2 микрон) характерна для случая с квадратными отверстиями (рис. 3) с наибольшей средней величиной пропускания около 0.9. Также наибольшая величина пропускания для длины волны 1.55 микрон около 0.92. Для всех форм отверстий ФЗЗ соответствующего ФК меньше чем полоса пропускания и расположена внутри нее.

Сравнивая спектры пропускания для треугольной решетки с различными формами отверстий можно сделать вывод, что квадратные отверстия (рис. 3) имеют также наибольшую полосу пропускания (1.4 – 1.8 микрон) при средней величине пропускания равной 0.85. Величина пропускания для длины волны 1.55 микрон около 0.85. Для всех форм отверстий ФЗЗ соответствующего ФК больше чем полоса пропускания, которая полностью расположена внутри ФЗЗ диапазона.

Также сравнивая различные типы решеток с одинаковыми отверстиями, можно заключить, что наилучший случай – это квадратная решетка с квадратными отверстиями (с точки зрения размеров полосы пропускания и величины пропускания) (рис. 3). Более точное сравнение приводит к выводу, что для треугольной решетки квадратных отверстий рабочая длина волны 1.55 микрон находится почти посередине полосы пропускания (рис. 6). И для квадратной решетки квадратных отверстий эта длина волны расположена около края полосы пропускания (рис. 3). Таким образом, если какой либо параметр ФК претерпит изменения при изготовлении, то спектр может сдвинуться и эта длина волны может сдвинуться за пределы полосы ФЗЗ, что нежелательно. Таким образом, учитывая этот факт, предпочтительно использование треугольной решетки квадратных отверстий, так как этот случай является более стабильным с точки зрения вариации параметров ФК (рис. 6).

Также интересно сравнить различные типы ФК решеток на основании двух параметров – размеров полосы пропускания и величины пропускания. С точки зрения ширины полосы пропускания наилучший случай – это треугольная решетка круглых отверстий (1.4 – 1.76) (рис. 5). Этот ФК будет наиболее устойчивым для удержания рабочей длины волны в пределах полосы пропускания при изменении каких-либо параметров при процессе изготовления. Также к этому случаю близок по ширине полосы пропускания случай треугольной решетки квадратных отверстий (1.4 – 1.8) (рис.). Также эти случаи имеют наибольшие средние величины пропускания в полосе (0.85) и для длины волны 1.55 (0.85).

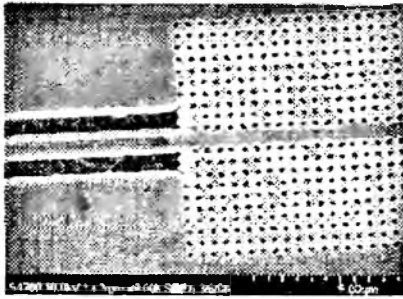
Таким образом, проведенные теоретические исследования показывают, что наиболее эффективным является ФК волновод на основе треугольной решетки круглых и квадратных отверстий.

### **Микрофотографии полученных структур**

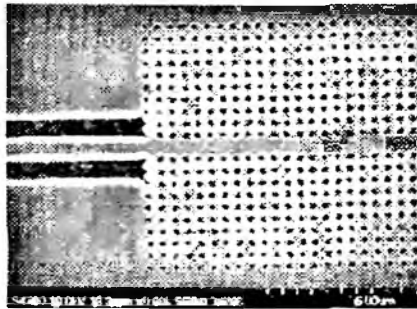
Рассмотренные типы волноводов были изготовлены и исследованы экспериментально. Фотографии некоторых образцов, сделанные на электронном сканирующем микроскопе (ЭСМ), приведены на рис. 8 – 12. На данных фотографиях можно видеть увеличение порядка 10 тыс. раз.

На рис. 8 – 12 показаны фотографии исследуемых ФК волноводов с входным гребенчатым волноводом. Можно отметить наличие некоторых неровностей изготовления, которые являются следствием неточностей при травлении. По той же причине можно наблюдать в некоторых случаях и нечеткое выжигание отверстий. Все же большинство отверстий было изготовлено достаточно точно. На увеличенных фотографиях отверстий (рис. 11 и 12, вставки) можно наблюдать, что профиль отверстий имеет не идеально цилиндрическую, а конусообразную форму, что так-

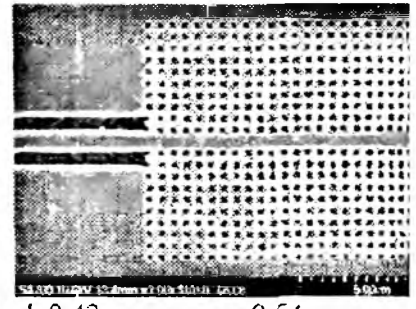
же является характерной чертой процесса травления газом. В некоторых случаях наблюдается уменьшение размера отверстий также из-за неточностей при процессе травления.



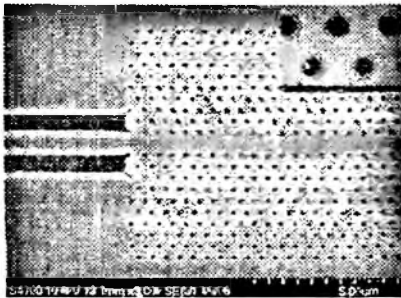
$d=0.35$  микрон,  $a=0.39$  микрон  
Рис. 8



$d=0.31$  микрон,  $a=0.42$  микрон  
Рис. 9

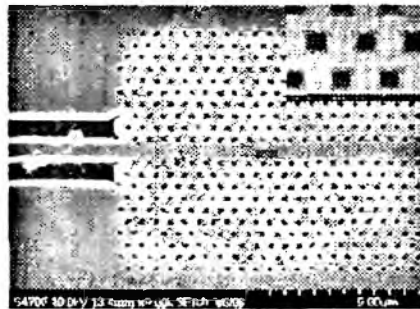


$d=0.43$  микрон,  $a=0.54$  микрон  
Рис. 10



$d=0.33$  микрон,  $a=0.47$  микрон

Рис. 11



$d=0.31$  микрон,  $a=0.47$  микрон

Рис. 12

Были изготовлены два типа решеток: квадратная и треугольная. Оба типа решеток не имеют отклонений от идеальной формы решетки. Также три формы отверстий были изготовлены: круглая, гексагональная и квадратная. Как видно из рис. 9, гексагональные отверстия имеют форму очень близкую к цилиндрической, т.е. при процессе травления они приобретают почти круглую форму. В то же время квадратные отверстия (рис. 10 и 12) имеют достаточно четкие, хотя и со сглаженными углами, квадратные формы. Ну и конечно цилиндрические отверстия имеют форму сечения, наиболее близкую к идеальной круглой форме (рис. 8 и 11).

Таким образом, можно сделать вывод, что периодичность решетки при процессе изготовления не меняется, меняются формы отверстий. В настоящее время нецелесообразно использовать гексагональную форму отверстий, так они теряют свою форму почти полностью. И поэтому с точки зрения изготовления эффективнее всего использование круглых отверстий (независимо от типа решетки), так они могут быть произведены с наибольшей точностью.

### Результаты экспериментальных измерений

Результаты экспериментального исследования полученных образцов приведены на рис. 13 и 14. На них показаны как экспериментальные кривые (жирные линии), так и результаты расчетов (тонкие линии).

Во всех случаях можно заметить, что экспериментальные значения пропускания имеют величины меньшие, чем расчетные, и экспериментальные сдвинуты в область более длинных длин волн по сравнению с расчетными кривыми (рис. 13 и 14). Более низкие величины пропускания могут быть объяснены тем, что расчетная модель не включает, и не может включить все виды потерь и все виды нерегулярностей, которые возникают в реальных устройствах. Поэтому экспериментальные результаты могут иметь величины меньшие, нежели расчетные. Сдвиг экспериментальных кривых может быть объяснен тем, что в реальных устройствах размеры отверстий получаются меньше, чем были приняты в расчетных устройствах и, соответственно, пространство между отверстиями становится больше. Поэтому только более длинные волны могут распростра-

няться в таких ФК волноводах. Более короткие длины волн проникают в область оболочки ФК волновода (ФК область). Данный эффект будет доказан ниже.

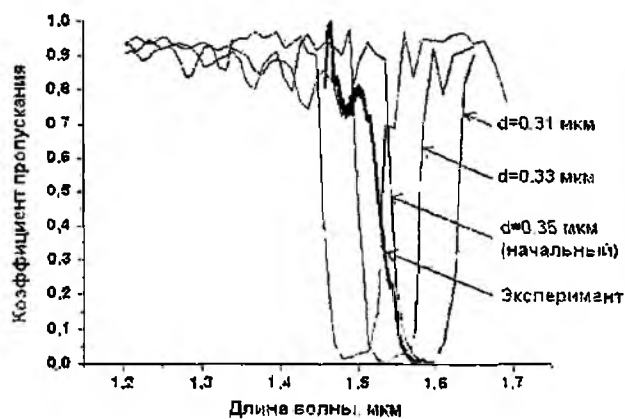


Рис. 13

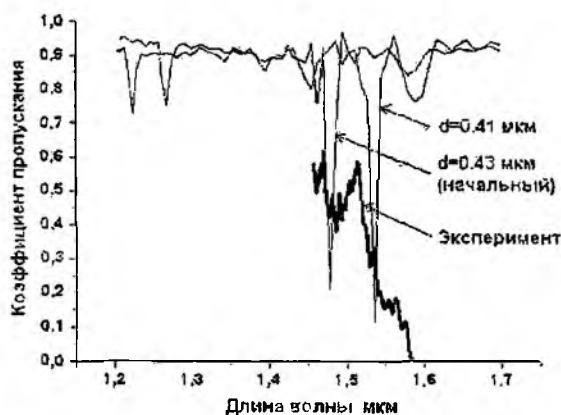


Рис. 14

Отмеченное расхождение формы экспериментальных и расчетных кривых может быть обусловлено нестабильностью и в некоторых случаях неперIODичностью в реальных структурах. Также экспериментальные кривые имеют более узкий диапазон длин волн, чем расчетные, что обусловлено пределами перестройки лазера, используемого при измерениях.

Как было сказано выше, экспериментальные кривые сдвинуты в область более длинных волн. На рис. 13 и 14 видно, что если уменьшать размеры отверстий при расчетах, расчетные кривые приближаются вплотную к экспериментальным, что происходит вследствие того, что в эксперименте размеры отверстий меньше, чем в расчетах.

На рис. 13 представлены три расчетные кривые, соответствующие различным диаметрам отверстий – 0.31, 0.33 и 0.35 микрон. Первоначальный диаметр составил 0.35 микрон, это тот диаметр, который имели расчетные и должны были иметь реальные устройства. Но после процесса изготовления диаметр отверстия оказался немного меньше предполагаемого, а именно, около 0.31 микрона. Теперь, если пересчитать заново спектры пропускания для расчетных устройств, имеющих размеры отверстий такие же, как реальные, то расчетные кривые тоже будут сдвинуты в стороны более длинных волн. Теперь экспериментальная и расчетная кривые расположены очень близко друг к другу. Аналогичный результат можно наблюдать и для других решеток, например для квадратной с квадратными отверстиями (рис. 14). Таким образом, сдвиги экспериментальных кривых обусловлены разницей размеров отверстий в реальных и расчетных устройствах. Что опять-таки подтверждает необходимость выбора таких параметров, чтобы рабочая длина волны была посередине полосы пропускания.

### Модовый состав

Оценка модового состава излучения в рассматриваемых устройствах показала, что во всех исследуемых волноводах существует только одна фундаментальная мода.

Как показано на рис. 15 на примере ФК волновода на основе квадратной решетки круглых отверстий, в нем, как и в остальных исследуемых волноводах, может существовать только одна фундаментальная мода. Можно видеть, что основная часть моды находится внутри

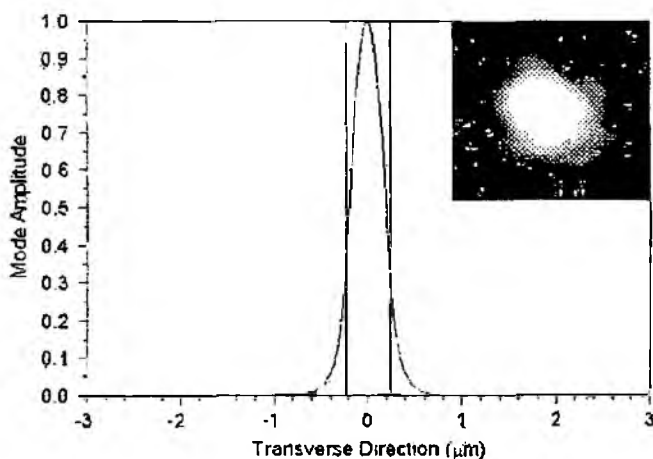


Рис. 15

волноведущей области (для данного случая ширина сердцевины волновода равна около 0.43 микрона). Прямые вертикальные линии соответствуют области сердцевины, вставка - фотография профиля фундаментальной моды – экспериментальные данные.

### **Выводы**

Впервые теоретически и экспериментально показано, что самый эффективный ФК волновод среди фундаментальных типов волноводов – ФК волновод на основе треугольной решетки круглых отверстий, так как эти волноводы имеют самые эффективные характеристики и формы этих отверстий могут быть изготовлены наиболее точно. Данный волновод имеет величину пропускания для длины волны 1.55 микрон 0.84 и достаточно широкую полосу пропускания 1.4 – 1.76 микрон, что может обеспечить его практическое применение в элементах и устройствах полностью оптических систем связи и обработки информации. По расчетным данным близок к нему случай ФК волновода на основе треугольной решетки квадратных отверстий, но, как было показано, такие отверстия не могут быть выращены с большой точностью.

**Список литературы:** 1. *Peter Meyer*. Lattice Geometries. Written during 1999 CE; last revised 2000-01-17CE, (<http://www.hermetic.ch/index.php>). 2. *Attila Mekis, Shanhui Fan, J. D. Joannopoulos*. Bound states in photonic crystal waveguides and waveguide bends. *Physical Review B*, Vol. 58, No. 8, 1998, pp. 4809-2817. 3. *Sergei F. Mingaleev, Yuri S. Kivshar*. Effective equations for photonic-crystal waveguides and circuits. *Optics Letters*, Vol. 27, No. 4, 2002, pp. 231-233. 4. *Marko Loncar, Theodor Doll, Jelena Vučkovic, Axel Scherer*. Design and Fabrication of Silicon Photonic Crystal Optical Waveguides. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 18, No. 10, 2000, pp. 1402-1411.

*Харьковский национальный  
университет радиотехники*

*Поступила в редакцию 10.05.2008*