

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Введение

Для моделирования распространения электромагнитных волн через фотонный кристалл рассмотрено распространение поперечной составляющей излучения (ТЕ-волны). Рассматриваемая структура фотонного кристалла представляет собой треугольную периодическую структуру, состоящую из стержней, окруженных воздухом (рис. 1). Диаметр стержней выбран $d=125$ нм, расстояние между центрами стержней – $\Lambda=380$ нм. Таким образом, соотношение $d/\Lambda=0,33$. Моделирование распространения ТЕ-волн (E_z) проводилось в пределах видимой и инфракрасной области спектра в диапазоне длин волн от 0,2 до 2 мкм, был проведен расчет для 300 значений длин волн. Для моделирования распространения электромагнитных волн через рассматриваемую структуру мы возбуждали плоскую волну E_z , которая распространяется вдоль оси ОХ, и производили расчет плотности потока мощности излучения, исходящего через правую границу с использованием метода конечных элементов. Поскольку структура фотонного кристалла, изображенная на рис. 1, не имеет физических границ, мы использовали граничное условие рассеяния на всех границах структуры.

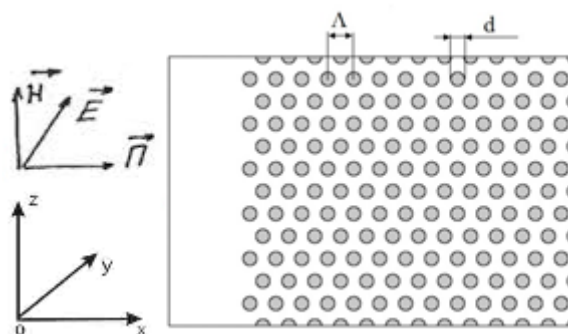


Рис. 1. Геометрическая структура рассматриваемого фотонного кристалла

Амплитуда возбуждаемой плоской волны $E_z=1$ В/м. Плотность потока мощности излучения рассчитывалась для всех 300 длин волн в пределах рассматриваемого диапазона.

В качестве материалов, применяемых для изготовления фотонных кристаллов, в оптическом диапазоне выбраны следующие материалы: GaAs, политетрафторэтилен (фторопласт-4, Teflon FEP), полиимиды (Kapton HN, Kapton E), кварц. Коэффициент преломления представленных материалов практически не изменяется в рассматриваемом диапазоне длин волн. В таблице представлены значения показателей преломления выбранных материалов в ближнем инфракрасном диапазоне:

	Фторопласт-4	Kapton® HN	Kapton® E	Кварц	GaAs
n	1,36	1,7	1,9	1,46	3,4

На рис. 2 показана зависимость коэффициента преломления от длины волны ЭМ излучения для некоторых видов политетрафторэтилена и полиимидов. Как видно из представленных зависимостей, тефлон имеет нормальную дисперсию, поскольку коэффициент преломления увеличивается с уменьшением длины волны излучения. Нормальная дисперсия отмечается длиной волны света, приближающейся к краю фундаментального поглощения [2].

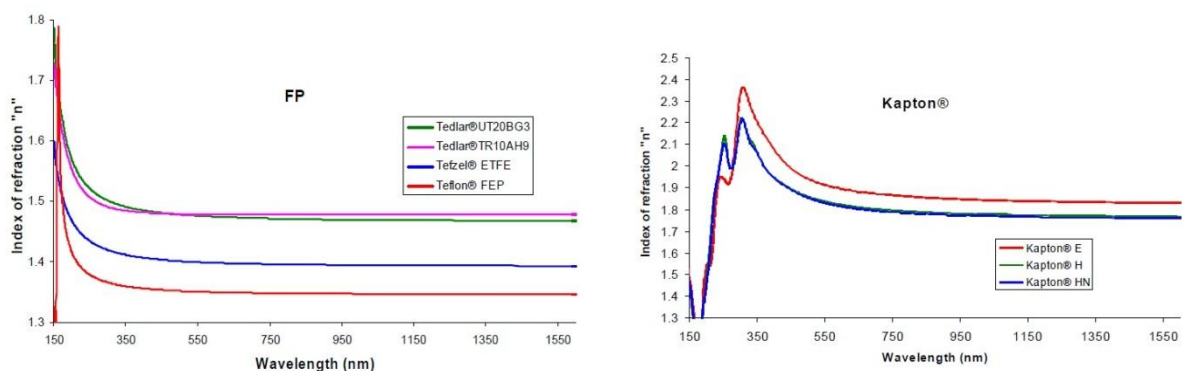


Рис. 2. Зависимость коэффициента преломления от длины волны ЭМ излучения для Teflon FEP и Kapton HN [1]

Также отметим, что показатель преломления у полиимидов значительно выше показателя преломления других видов полимеров. На рис. 2 представлена как нормальная дисперсия (показатель преломления увеличивается с уменьшением длины волны), так и аномальная, которая наблюдается при длине волны ниже края фундаментального поглощения. При этом наблюдается уменьшение значения показателя преломления с уменьшением длины волны. Учитывая представленные особенности, не будем проводить моделирование распространения излучения на длинах волн менее 500 нм.

На рис. 3 представлена зависимость нормированного значения плотности потока мощности, проходящего через исследуемую структуру (рис. 1), от длины волны излучения. Полученные результаты показывают, что рассматриваемая структура обладает свойствами фотонного кристалла и обладает ярковыраженной запрещенной зоной.

Как видно из рис. 3, в видимой области при длине волны порядка 640 нм оптическое излучение практически не проходит через данную структуру.

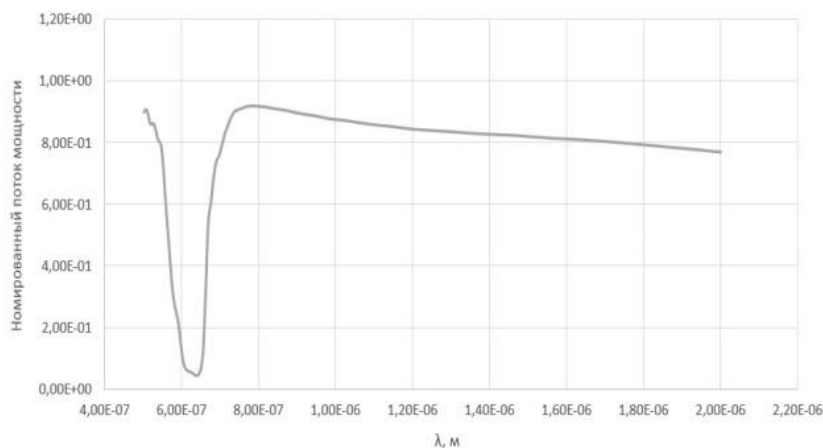
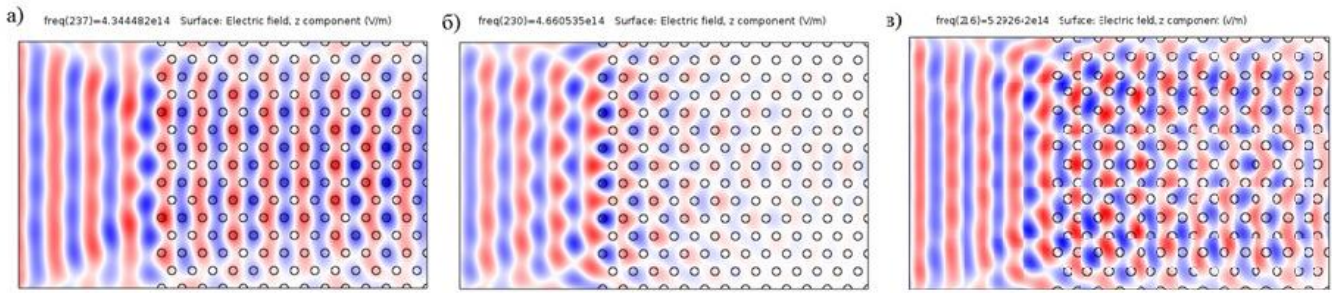


Рис. 3. Зависимость нормированного потока мощности излучения от длины волны

Представленный фотонный кристалл обладает узкой запрещенной зоной, ширина которой составляет около 50 нм.

Наличие части проходящего излучения может свидетельствовать о том, что данный фотонный кристалл может недостаточно хорошо отражать падающую волну и может иметь значительную глубину проникновения излучения. Для проверки этой гипотезы приведем результаты распределения E_z в фотонном кристалле. На рис. 4 представлено распределение E_z волн в фотонном кристалле при длинах волн выше ФЗЗ, в пределах ФЗЗ и ниже ФЗЗ.



Результаты при длинах волн: *a* – выше ФЗЗ, $\lambda=676$ нм; *б* – в пределах ФЗЗ, $\lambda=644$ нм; *в* – ниже ФЗЗ, $\lambda=567$ нм

Рис. 4. Распределение поля E_z через фотонный кристалл

Представленные результаты распространения ТЕ-волн через фотонный кристалл, как и предполагалось, показывают, что при длинах волн ниже и выше ФЗЗ ТЕ-волны распространяются в фотонном кристалле (рис.4, *a*, *в*), а в пределах ФЗЗ входящее оптическое излучение отражается от исследуемого фотонного кристалла. Таким образом, как видно на рис. 4, *б*, ТЕ-волны проникают в фотонный кристалл и постепенно затухают.

На рис. 5 представлено распределение амплитуды ТЕ-волны (проходящей через центральную часть ФК) от глубины проникновения в фотонном кристалле при длине волны $\lambda=644$ нм, которая входит в ФЗЗ. Как видно, на рис. 5 амплитуда ТЕ-волны затухает по экспоненциальному закону.

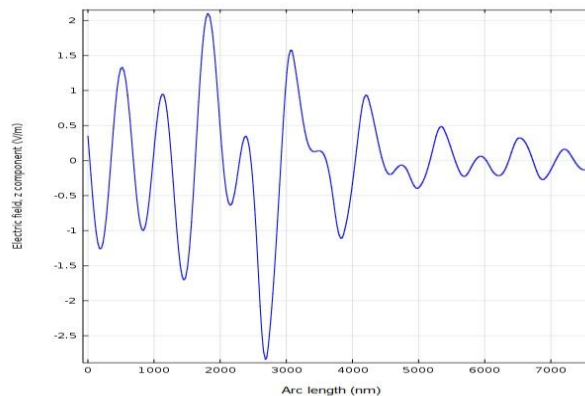


Рис. 5. Распределение амплитуды E_z в ФК от глубины проникновения в пределах ФЗЗ

Таким образом, фотонная запрещенная зона исследуемого фотонного кристалла, представленная на рис. 3, не достигает нулевого порога в связи с тем, что фотонный кристалл имеет конечные размеры. Исходя из этого для улучшения характеристик ФЗЗ можно увеличить размеры фотонного кристалла, уменьшив таким образом исходящее излучение.

Моделирование распространения ТЕ-волн через GaAs фотонный кристалл

Для моделирования использовался образец с такими же геометрическими характеристиками, как и представленный на рис. 1 ($d=125$ нм, $\Lambda=380$ нм). В качестве материала выбран GaAs, поскольку этот полупроводниковый материал обладает наибольшим показателем преломления из материалов (см. таблицу, $n=3,4$). Результаты моделирования распространения ТЕ-волн через рассматриваемый фотонный кристалл представлены на рис. 6. Также на рисунке представлена зависимость для образца с идентичной структурой, представленной на рис. 4. Как видно из рисунка, фотонный кристалл, изготовленный из GaAs, обладает намного более широкой запрещенной зоной, которая к тому же смещена в область более длинных волн.

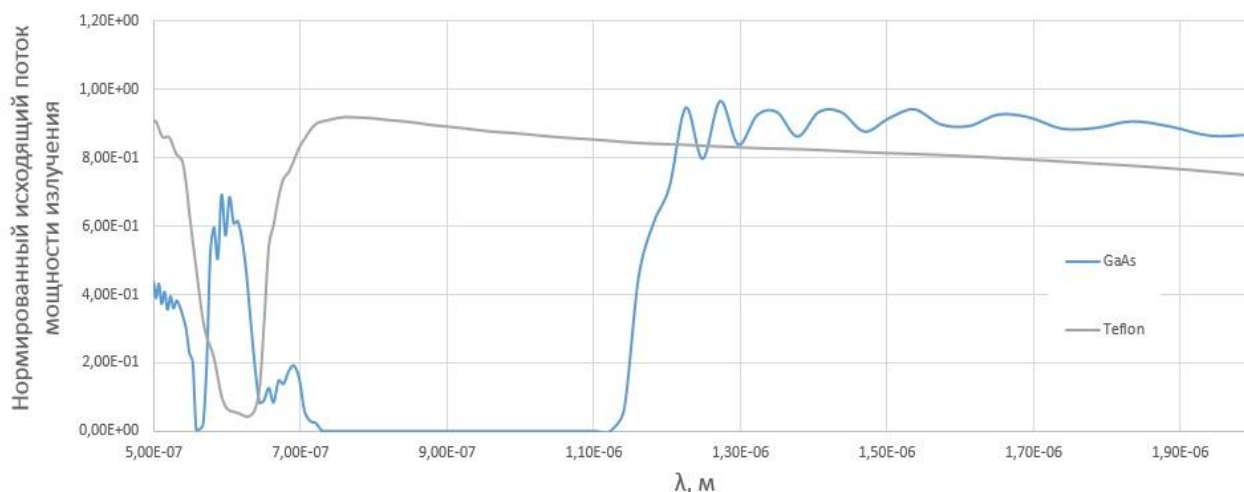


Рис. 6. Зависимость нормированного исходящего потока мощности излучения от длины волны в фотонном кристалле, состоящем из стержней GaAs

На рис. 7 представлено распространение ТЕ-волн через данный фотонный кристалл. Полученные результаты показывают, что образец, изготовленный из тефлона, имеет ширину запрещенной зоны $\Delta\lambda \approx 30$ нм, а изготовленный из GaAs – 370 нм. Кроме того, из рис. 7 очевидно, что образец, изготовленный из арсенида галлия, имеет значительно меньшую глубину проникновения излучения и намного более эффективно отражает падающую волну, чем образец, изготовленный из тефлона (см. рис. 4, б).

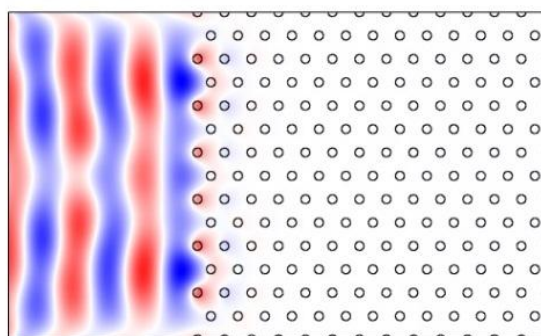


Рис. 7. Распределение ТЕ-поля через фотонный кристалл при $\lambda=900$ нм (в области ФЗЗ)

Определение зависимости характеристик ФЗЗ от показателя преломления материала

Как известно, в оптике и фотонике наиболее широкое применение нашли устройства и линии передачи, работающие в инфракрасном диапазоне при длинах волн в области 1,5 мкм. Очевидно, что эта область инфракрасного спектра является наиболее перспективной для новых устройств и интегральной оптики. Поэтому целесообразно дальнейшее рассмотрение фотонных кристаллов, запрещенные зоны которых будут располагаться в этой области спектра.

Ранее мы определили, какими соотношениями d/Λ должен обладать фотонный кристалл, чтобы его ФЗЗ имела наилучшие характеристики. Учитывая, что показатель преломления материалов, представленных в таблице, практически не изменяется в рассматриваемой области длин волн, можно сделать предположение, что при сохранении соотношения d/Λ в рассматриваемом фотонном кристалле можно сместить расположение ФЗЗ в область более длинных волн увеличивая диаметр стержней и шаг.

Для определения зависимости характеристик ФЗЗ от показателя преломления создана структура, соответствующая структуре, представленной на рис. 1, с $d=395$ нм, $\Lambda=750$ нм. В полученном образце соотношение $d/\Lambda=0,53$. Такое же соотношение d/Λ имел образец из тефлона с $d=200$, центр запрещенной зоны которого (как видно из рисунка) располагался на длине волны около 660 нм. Таким образом, мы увеличили шаг между стержнями практически в два раза. Учитывая, что показатель преломления тефлона практически не изменится при переходе в ближнюю инфракрасную область, можно предположить, что центральная часть фотонной запрещенной зоны нового образца будет находиться на длине волны $\lambda=1,33$ мкм. На рис. 8 можно наблюдать ФЗЗ двух структур, изготовленных из тефлона с $\Lambda=380$ и $\Lambda=750$. Для упрощения вычислений рассчитывали плотность потока мощности излучения нового образца в диапазоне длин волн 0,8 – 2 мкм.

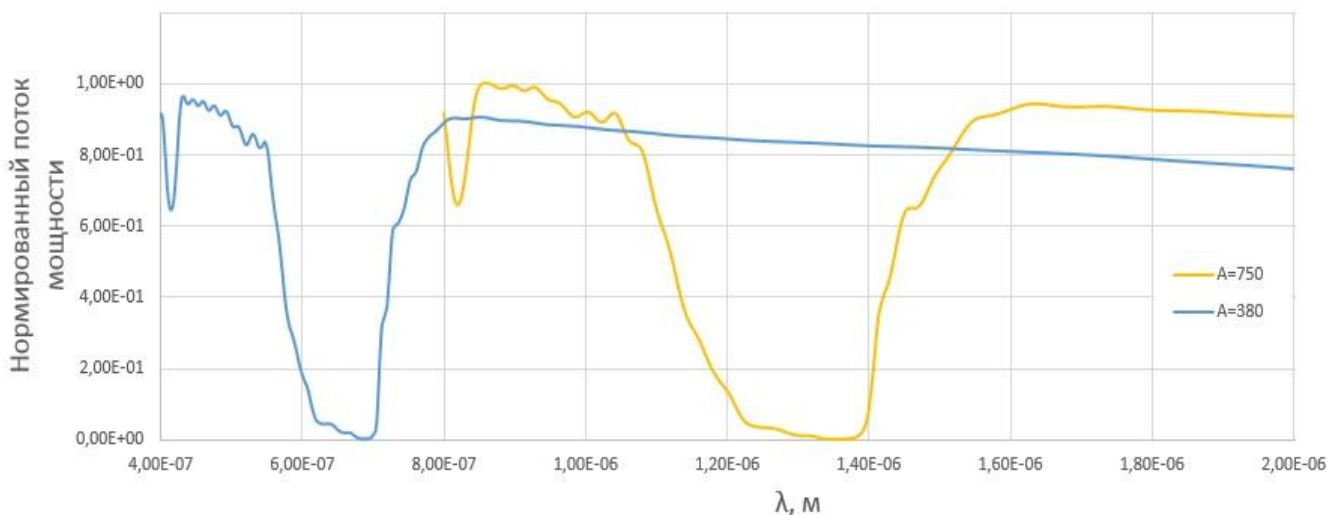


Рис. 8. Расположение ФЗЗ образцов с $\Lambda=380$ и $\Lambda=750$

Как видно из рис. 8, ФЗЗ исследуемого образца располагается точно в пределах $\lambda=1,3 - 1,36$ мкм, как и ожидалось. Кроме того, при увеличении диаметра стержней и расстояния между их центрами в два раза мы наблюдаем увеличение ширины запрещенной зоны также в два раза. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при сохранении соотношения d/Λ можно смещать ФЗЗ в область коротких или длинных волн при сохранении характеристик самой ФЗЗ.

Исходя из результатов, представленных выше, можно сделать вывод, что при сохранении соотношений d/Λ и Λ/λ возможно точно прогнозировать частоты, на которых будет располагаться ФЗЗ рассматриваемой структуры. Следовательно, возможно и обратное – задавая частоту, на которой необходимо расположение ФЗЗ, можно определить геометрические характеристики фотонного кристалла (диаметр и расстояние между центрами стержней фотонного кристалла).

Важно отметить, что данные преобразования будут выполняться только в том случае, если показатель преломления не изменяется (или изменяется в пределах несколько процентов) в пределах рассматриваемого диапазона, как в случае использования тефлона.

На рис. 9 представлены зависимости нормированного потока мощности излучения исследуемого образца, изготовленного из различных материалов (см. таблицу).

Поскольку образец из GaAs обладает самой широкой запрещенной зоной, мы провели исследование распространения TE-волн на диапазоне длин волн 0,8 – 2,65 мкм. На рис. 10 представлены результаты моделирования для образца из GaAs и тефлона.

Выводы

Результаты, представленные на рис. 9 и 10, показывают, что при увеличении показателя преломления используемого материала ФЗЗ смещается в область длинных волн, при этом увеличивается ширина ФЗЗ, а также уменьшается глубина проникновения TE-волн в фотонный кристалл. Эти особенности особенно проявляются в случае использования GaAs, показатель преломления которого более чем в 1,5 – 2 раза больше остальных материалов ($n=3,4$).

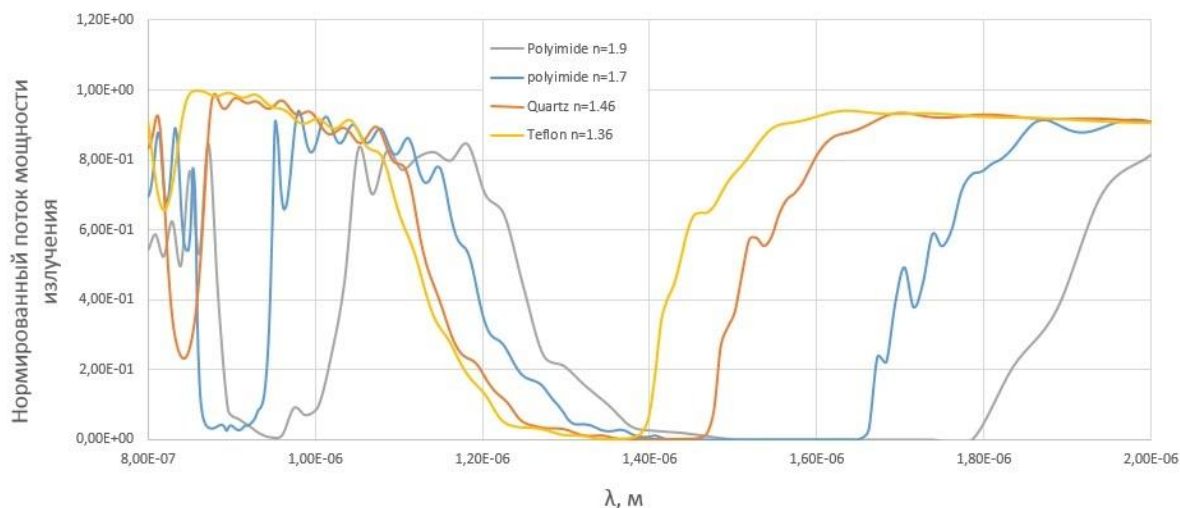


Рис. 9. Зависимости нормированного потока мощности излучения от длины волны для материалов, представленных в таблице

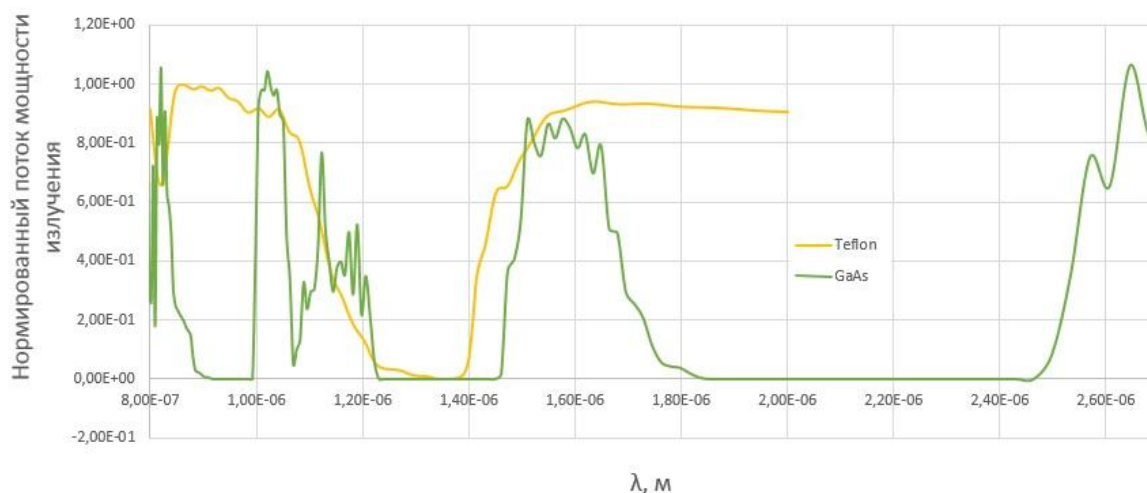


Рис. 10. Зависимости нормированного потока мощности излучения от длины волны для образцов из тефлона и GaAs

Отметим также, что исследуемые образцы, изготовленные из полиимидов, имеют еще одну ФЗЗ в области более коротких волн (900 – 950 нм), как видно из рис. 10. В образце, изготовленном из GaAs (рис. 10) кроме основной ФЗЗ наблюдаются еще две более узкие запрещенные зоны в области длин волн $\lambda=1,25 - 1,45$ мкм и $\lambda=0,9 - 1$ мкм.

Представленные выше результаты также показывают, что фотонный кристалл, изготовленный из арсенида галлия, обладает наилучшими характеристиками среди рассмотренных материалов, а именно: самой широкой запрещенной зоной (см. рис. 10), а также наименьшей глубиной проникновения излучения в фотонный кристалл.

Список литературы: 1. French, H. Optical properties of materials for concentrator photovoltaic systems / H. French, M. Rodríguez-parada, K. Yang, A. Derryberry, F. Lemon, J. Brown, R. Haeger, Samuels, C. Romano, E. Richardson // Journal of Microlithography, microfabrication and Microsystems. – 2009. – 2(3). – P.36-49. 2. French, H. Imaging of 32-nm 1:1 lines and spaces using 193-nm immersion interference lithography with second-generation immersion fluids to achieve a numerical aperture of 1.5 and a k1 of 0.25 / H. French, Sewell, K. Yang, S. Peng, D. Mccafferty, W. Oiu, C. Wheland, F. Lemon, I. Markova, K. Crawford // Journal of Microlithography, microfabrication and Microsystems, topical issue on hyper-na imaging. – 2005. – 4(3). 3. Filipenko, A. I. Investigation of the 2-D Photonic Crystal Filter / A. I. Filipenko, A. N. Donskov // International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2013). – 2013. – P. 58-59.

Харьковский национальный университет радиотехники

Поступила в редколлегию 02.04.2017