

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.16>

УДК 535.323, 537.874.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ В СВЧ И ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНАХ

А. Ю. Ветлужский

Институт физического материаловедения СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6

Статья поступила в редакцию 17 ноября 2020 г., после доработки – 16 декабря 2020 г.

Аннотация. Рассматриваются оригинальные методы определения эффективных электрофизических параметров двумерных металлических фотонных кристаллов, применимые в широкой полосе частот – от радио- до видимого диапазонов. В отличие от распространенных в настоящее время аналитических подходов к описанию таких параметров, предметом обсуждения в данной статье являются методы, которые могут быть использованы как для строгого численного анализа, так и для непосредственного практического применения. Показано, что в радио- и инфракрасном диапазонах в первой разрешенной зоне фотонных кристаллов определение их эффективной диэлектрической проницаемости может проводиться либо на основе изучения собственных резонансных свойств пространственно ограниченных структур, либо путем исследования процессов отражения и преломления на их границах. В видимом диапазоне металлические фотонные кристаллы проявляют свойства, во многом сходные со свойствами сплошных металлов. При этом они обладают значительно меньшими тепловыми потерями и положительной, меньшей единицы эффективной диэлектрической проницаемостью, что делает их перспективными для создания различных устройств преобразования оптического излучения. Определение эффективных электрофизических параметров на этих частотах возможно на основе прямого сопоставления амплитудно-фазовых распределений поля в фотонных кристаллах и сплошных средах.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, показатель преломления, дисперсия, спектр пропускания.

Abstract. Original methods for determining the effective electrophysical parameters of two-dimensional metallic photonic crystals, applicable in a wide frequency range from radio to visible ranges are researched. In contrast to the currently widespread analytical approaches to describing such parameters, the subject of this article is the methods that can be used both for the rigorous numerical analysis and for the direct practical application. It is shown that in the radio and infrared ranges in the first allowed zone of photonic crystals the determination of their effective dielectric constant can be carried out either on the basis of studying the intrinsic resonance properties of spatially limited structures or by studying the processes of reflection and refraction at their boundaries. In the visible range metallic photonic crystals exhibit properties that are largely similar to those of solid metals. However, photonic crystals have significantly lower heat losses and a positive effective dielectric constant <1 . This makes them promising for creating various devices for converting optical radiation. Determination of the effective electrophysical parameters at these frequencies is possible on the basis of a direct comparison of the amplitude-phase distributions of the field in photonic crystals and continuous media.

Key words: photonic crystals, refractive index, dispersion, transmission spectrum.

Введение

Среди искусственных оптических материалов, которые активно изучаются в последние годы, особое место занимают металлические фотонные кристаллы (ФК) – двумерно-периодические решетки, образованные цилиндрическими элементами, имеющими высокую проводимость в радио- и инфракрасном диапазонах [1-4]. Обладая всеми свойствами ФК, в частности, имея спектр пропускания в виде чередующихся запрещенных и разрешенных зон, такие структуры могут выступать и в роли своеобразных метаматериалов. А именно, в диапазоне частот, охватывающем первые запрещенную и разрешенную зоны, длина волны излучения превышает период расположения элементов в

металлических ФК. В этом диапазоне такие структуры проявляют плазмopodobные свойства, т.е. могут рассматриваться как сплошные, сильно диспергирующие среды, диэлектрическая проницаемость которых на частотах ниже пороговой отрицательна, а выше – имеет значение меньше единицы [5, 6].

В настоящей статье рассматривается ряд оригинальных методов определения эффективных электрофизических параметров материалов на основе металлических ФК, применимых в радио- и оптическом диапазонах.

1. СВЧ и инфракрасный диапазоны

В указанных диапазонах тепловые потери, обусловленные конечной проводимостью образующих ФК элементов, весьма невелики и не оказывают существенного влияния на дисперсионные характеристики и спектры пропускания таких структур.

Одним из методов определения их эффективных электрофизических параметров может служить анализ собственных резонансных свойств металлических ФК. Известно, что в диапазоне частот первой разрешенной зоны, где такие структуры можно рассматривать как однородные метаматериалы с показателем преломления меньшим единицы, их спектр пропускания представляет собой последовательность пиков [7] (рис.1 а).

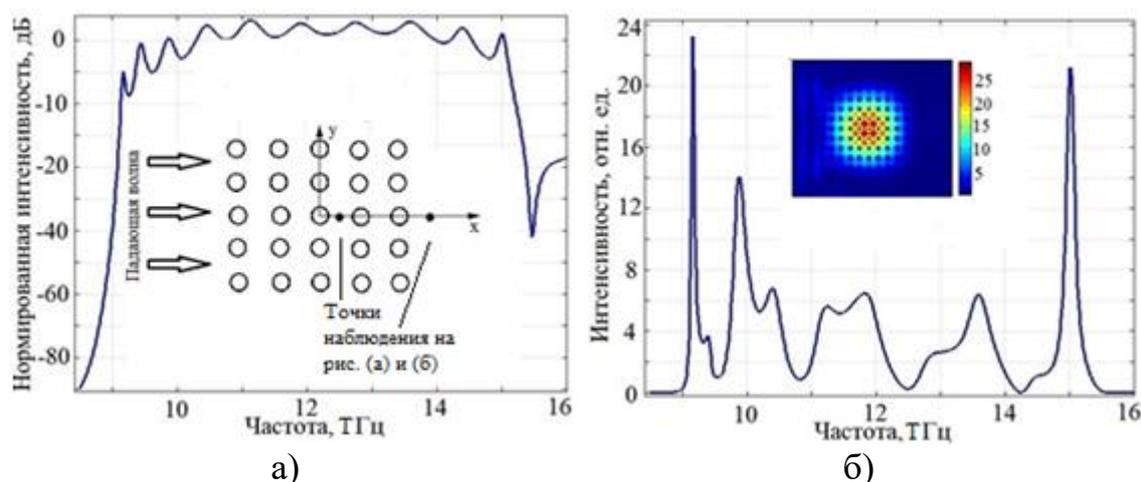


Рис. 1. Спектр пропускания 121 – элементного (11 на 11) ФК (период $d = 10$ мкм, радиус элементов $a = 0.5$ мкм) в диапазоне частот, соответствующем первой разрешенной зоне – (а); спектральное представление интенсивности внутри ФК – (б). На вставках – концептуальная схема численных экспериментов и пространственное распределение поля в ФК на частоте 9.16 ТГц. Расчеты выполнены методом самосогласованных уравнений [8].

Каждому из них соответствует локализация поля во внутренних областях ФК, возникающая, когда линейная протяженность структуры оказывается кратна половине длины волны в ФК, который выступает в данном случае в роли объемного резонатора типа Фабри-Перо. Как следствие, спектральное распределение интенсивности поля в центральной области ФК представляет собой чередование максимумов и минимумов (рис.1 б), соответствующих нечетному и четному количеству областей локализации излучения внутри ФК.

Сопоставление резонансной частоты возбуждения структуры с ее пространственной протяженностью позволяет корректно определить ее эффективные электрофизические параметры как теоретически, так и экспериментально. В частности, в рассматриваемом случае на частоте 9.16 ТГц имеет место единственный максимум локализации поля в центре ФК (см. вставку на рис. 1 б), что, очевидно, соответствует ситуации, когда половина длины волны в ФК совпадает с его размерами в направлении распространения падающей волны. Элементарная оценка показывает, что ФК в данном случае можно рассматривать как метаматериал с показателем преломления $n_{эф} = 0.16$ (в отсутствие вихревых токов полагаем магнитную проницаемость $\mu = 1$).

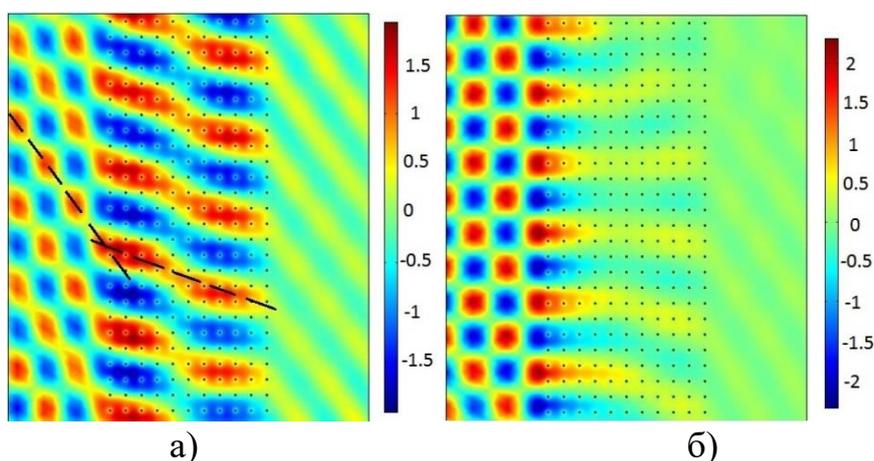


Рис. 2. Пространственные картины преломления и отражения электромагнитной волны при взаимодействии с границами ФК на частоте 11.2 ТГц. Углы падения – 35° (а) и 41° (б). Пунктирными линиями обозначены поверхности волновых фронтов падающей и прошедшей в ФК волн. Направление прихода волны – слева направо. Параметры ФК соответствуют описанию к рис. 1.

Другим методом оценки показателя преломления таких структур является непосредственный анализ процессов отражения и преломления волн на границах ФК на частотах первой разрешенной зоны. Поскольку ФК в данном случае выступает в роли среды с малыми значениями диэлектрической проницаемости, при возбуждении его границы возможно выполнение условий полного внутреннего отражения, что также дает возможность однозначного определения искомых параметров. На рисунке 2 представлены интерференционные картины, сформировавшиеся в результате падения E -поляризованной плоской волны под различными углами на металлический ФК на частотах разрешенной зоны.

Отсюда следует несколько выводов. Во-первых, наблюдаемое отсутствие локальных неоднородностей поля внутри ФК, связанных с рассеянием на отдельных элементах, подтверждает возможность описания свойств таких структур на частотах разрешенной зоны как гомогенных метадиелектриков. Во-вторых, очевидно (рисунок 2 а), что диэлектрическая проницаемость такого материала меньше проницаемости окружающего его воздуха, т.е. в среде распространяются быстрые по отношению к окружающему пространству волны. Об этом свидетельствует превышение угла падения углом преломления ($\sim 62^\circ$) волны, а также характер пространственного распределения пучностей поля, возникающих вследствие отражения от границ структуры вне ФК и внутри него. При увеличении угла падения появляются условия для возникновения явления полного внутреннего отражения волн (рисунок 2 б). Здесь поведение прошедшего в среду поля меняется, оно приобретает затухающий по мере погружения вглубь среды характер, локализуясь вблизи границы ФК в форме распространяющихся вдоль нее поверхностных волн. Анализ углов, при которых возникает полное внутреннее отражение на различных частотах, а также процессов преломления волны на границе сред на углах, меньших критических, позволяют определить эффективный показатель преломления проволоочной среды в микроволновом и инфракрасном диапазонах. В частности, исходя из второго закона Снеллиуса и соотношения

углов падения и преломления на рис. 2 а, получаем $n_{эф} = 0.65$. К тому же результату можно прийти, проанализировав резонансные свойства ФК в окрестности пятого пика спектра пропускания на рис. 1 а.

Важно, что на частотах первой разрешенной зоны металлические ФК являются сильно диспергирующими средами, и описанные методы позволяют не только определить одночастотные значения их эффективных параметров, но и установить законы дисперсии, характеризующие свойства таких метаматериалов во всем указанном диапазоне.

2. Видимый диапазон

С ростом частоты растут потери в материале элементов металлических ФК, поэтому в оптическом, в частности, видимом диапазоне описанные методы становятся менее эффективными. На этих частотах методика определения параметров метаматериала на основе ФК должна учитывать не только характер пространственного распределения поля, но и его амплитудные характеристики.

Этого можно достичь прямым сопоставлением результатов численного моделирования процессов отражения и прохождения волн при взаимодействии с границами сплошного диэлектрика и металлического ФК, эффективные электрофизические свойства которого следует описывать в данном случае комплексной величиной показателя преломления. Элементы ФК полагались состоящими из серебра, для описания диэлектрических свойств которого использовалась дисперсионная модель Друдэ:

$$\varepsilon'(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}, \quad \varepsilon''(\omega) = \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega^3 + \omega \gamma^2},$$

где $\varepsilon'(\omega)$ и $\varepsilon''(\omega)$ - действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости, ω_p - плазменная частота, γ - фактор затухания, равные для серебра соответственно 2175 ТГц и 4.35 ТГц [9].

На рис. 3 (а) представлен пример такого сопоставления, выполненный методом конечных разностей во временной области для частоты 400 ТГц и демонстрирующий хорошее согласие результатов моделирования поля в присутствии однородной и дискретной ($d = 0.2$ мкм, $a = 0.02$ мкм) структур.

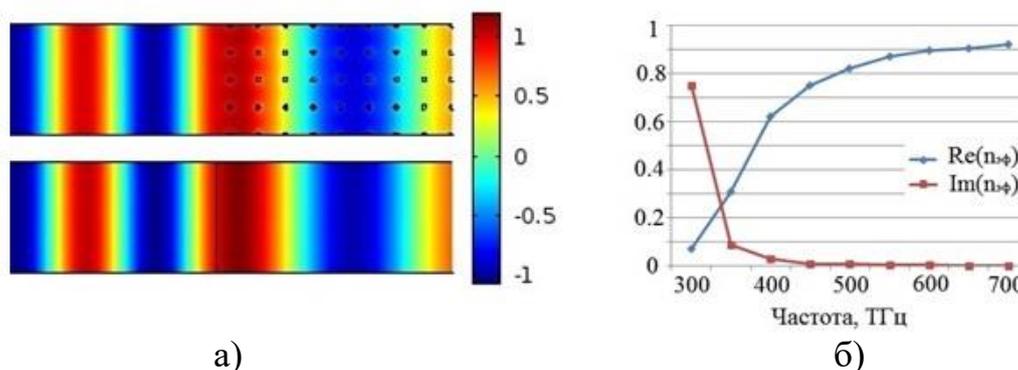


Рисунок 3. (а) Пространственные распределения поля при падении плоской волны на границы проволоочной среды (вверху) и однородного диэлектрика с показателем преломления $n = 0.617 + i 0.018$ (внизу) на частоте 400 ТГц. Направление прихода волны – слева направо. (б) Зависимости действительной и мнимой частей показателя преломления метаматериала, представляющего собой металлический ФК, в видимом диапазоне.

Показатель преломления ФК в данном случае определялся критерием минимизации различий амплитудно-фазового распределения поля в обеих возбуждаемых структурах при изменении действительной и мнимой частей показателя преломления диэлектрика в диапазоне значений от нуля до единицы.

На рисунке 3 (б) приведены частотные зависимости действительной и мнимой частей эффективного показателя преломления металлического ФК, определенные по данной методике. Отметим, что большие по величине значения мнимой части показателя преломления в низкочастотной области рассматриваемого диапазона связаны, в основном, с формированием запрещенной зоны в спектре собственных состояний такого ФК.

В целом, полученные данные говорят о том, что даже при учете потерь в элементах ФК и его дисперсионных свойств, затухание электромагнитных волн оптического диапазона в метаматериале на основе металлических ФК оказывается значительно ниже, чем в любом однородном металле. Если в металлах в оптическом диапазоне мнимая часть показателя преломления преобладает над действительной, то в металлических ФК она оказывается почти на два порядка ниже, что делает такие метаматериалы весьма перспективными для создания различных устройств преобразования излучений

оптического диапазона: разнообразных линзовых систем, включая линзы Люнеберга; коллиматоров; волноведущих систем на основе линейных дефектов в структуре ФК, в которых локализация поля достигается за счет полного внутреннего отражения, и т.д.

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрены методы определения эффективных электрофизических характеристик метаматериалов, представляющих собой двумерные металлические ФК. Показано, что данные методы могут основываться на анализе процессов отражения и преломления при нормальном либо наклонном падении электромагнитных волн на кромки пространственно ограниченных кристаллических структур или на прямом сопоставлении распределения поля в ФК и гомогенных диэлектриках.

Литература

1. Банков С.Е. Электромагнитные кристаллы. М.: Физматлит, 2010. 352 с.
2. Simovski C.R., Belov P.A., Atrashchenko A.V., Kivshar Y.S. Wire metamaterials: Physics and applications // *Advanced materials*. 2012. Vol.24. P.4229-4248.
3. Bleckmann F., Maibach E., Cordes S. et al. Photochromic switching of Fano resonances in metallic photonic crystal slabs // *Advanced Optical Materials*. 2014. Vol.2. No.9 P.861-865.
4. Palinski T.J., Hunter G.W., Tadimety A., Zhang J.X. Metallic photonic crystal-based sensor for cryogenic environments // *Optics Express*. 2019. Vol.27. No.7. P.16344-16359.
5. Brown J. Artificial dielectrics having refractive indices less than unity // *Proc. Inst. Elect. Eng.* 1953. Vol.100. Part IV. Monograph No.62R. P 51-62.
6. Silveirinha M.G., Maslovski S.I. Radiation from elementary sources in a uniaxial wire medium // *Phys. Rev. B*. 2012. Vol.85. P.155125 (1-10).
7. Ветлужский А.Ю. Эффективные электрофизические свойства металлических электромагнитных кристаллов // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2015. № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/index.pdf>.

8. Chen Y.-Y., Ye Z. Acoustic attenuation by two-dimensional arrays of rigid cylinders // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol.87. No.18. P. 184301(1-4).
9. El-Kady I., Sigalas M. M., Biswas R., Ho K. M., Soukoulis C. M. Metallic photonic crystals at optical wavelengths // Phys. Rev. B. 2000. Vol.62. No.23. P.15299-15302.

Для цитирования:

Ветлужский А.Ю. Определение электрофизических параметров металлических фотонных кристаллов в СВЧ и оптическом диапазонах. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.16>