

УДК 537.876.46

ФОТОННЫЕ ЗАПРЕЩЕННЫЕ ЗОНЫ В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ ПОЛУПРОВОДНИК-МЕТАМАТЕРИАЛ

Головкина М.В.

ПГУТИ, г. Самара

E-mail: наука77@yandex.ru.

Исследованы дисперсионные характеристики и положение фотонных запрещенных зон в одномерной периодической структуре, содержащей чередующиеся слои полупроводника и метаматериала с отрицательным показателем преломления.

Ключевые слова: полупроводник, метаматериал,

Искусственные материалы, обладающие свойствами, которые невозможно наблюдать у природных материалов, вызывают пристальное внимание исследователей. Метаматериалы - это искусственные композитные материалы, состоящие из отдельных элементарных блоков, причем характерные размеры каждого блока меньше длины волны. Тогда композитную среду можно рассматривать как однородную и изотропную и ввести понятие эффективной диэлектрической и магнитной проницаемости [1, 2]. Новый тип материалов, обладающих отрицательным показателем преломления, был теоретически предсказан в 1967 году в работе Веселаго [3]. Отрицательным показателем преломления можно охарактеризовать среды, имеющие одновременно отрицательные значения диэлектрической и магнитной проницаемости. При этом для среды с отрицательным значением показателя преломления вектор Пойнтинга $\mathbf{S} = [\mathbf{E}\mathbf{H}]$, определяющий поток энергии, переносимый волной,

образует с векторами E и H левую тройку векторов. Следовательно, для сред с отрицательным показателем преломления векторы S и волновой вектор k направлены в противоположные стороны.

Одним из интересных направлений анализа необычных свойств метаматериалов является изучение свойств периодических структур, содержащих слои материалов с отрицательным значением показателя преломления. Такие структуры обладают частичной фотонной запрещенной зоной для некоторых направлений распространения. В работе [4] изучено распространение электромагнитных волн в одномерных периодических структурах, содержащих слои материала с отрицательным показателем преломления и показано, что слоистая структура, состоящая из слоев материала с отрицательным показателем преломления и обычного диэлектрика, обладает полной двумерной фотонной запрещенной зоной. Менее изученными являются периодические структуры, содержащие чередующиеся слои полупроводника и метаматериала с отрицательным показателем преломления. Мы рассмотрим распространение электромагнитных волн в одномерной периодической среде, содержащей чередующиеся слои полупроводника и метаматериала с отрицательным значением показателя преломления.

Рассмотрим бесконечную одномерную периодическую среду, содержащую чередующиеся слои полупроводника толщиной d_1 и слои метаматериала с отрицательным показателем преломления толщиной d_2 . Ось Oz направим перпендикулярно границам раздела слоев, ось Ox - параллельно границам раздела слоев. Вследствие однородности среды в направлении y будем предполагать, что $\partial/\partial y = 0$. Пусть ϵ_1 и μ_1 - диэлектрическая и магнитная проницаемости

слоев полупроводника, $\epsilon_2 < 0$ и $\mu_2 < 0$ - диэлектрическая и магнитная проницаемости слоев метаматериала, $d = d_1 + d_2$ - период рассматриваемой структуры. Дисперсионные соотношения для ТЕ и ТМ - волн, которые могут распространяться в исследуемой структуре, известны. Дисперсионное соотношение для ТЕ-волн имеет вид

$$\cos Kd = \cos k_{z1}d_1 \cos k_{z2}d_2 - \left(\frac{k_{z1}\mu_1}{k_{z2}\mu_2} + \frac{k_{z1}\mu_2}{k_{z2}\mu_1} \right) \sin k_{z1}d_1 \sin k_{z2}d_2. \quad (1)$$

где K – блоховское волновое число для периодической структуры, 1,2 - номера слоев, $k_{z1,2} = \pm \sqrt{n_{1,2}^2 - k_x^2}$, n_1 и n_2 - показатели преломления слоев, k_z и k_x нормированы относительно ω/c . Дисперсионное уравнение для ТМ-волн имеет вид

$$\cos Kd = \cos k_{z1}d_1 \cos k_{z2}d_2 - \frac{1}{2} \left(\frac{k_{z1}\epsilon_2}{k_{z2}\epsilon_1} + \frac{k_{z2}\epsilon_1}{k_{z1}\epsilon_2} \right) \sin k_{z1}d_1 \sin k_{z2}d_2. \quad (2)$$

В данной работе нами рассмотрена динамика поведения фотонных запрещенных зон в зависимости от соотношения толщины слоев полупроводника и метаматериала, а, следовательно, от величины потоков энергии, протекающих по слоям. Слои полупроводника рассматриваются в гидродинамическом приближении. При численном исследовании разрешенных и запрещенных зон учитывается частотная зависимость диэлектрической и магнитной проницаемости слоев метаматериала. Показано, что направление распространения энергии и положение запрещенной зоны зависит соотношения между потоками энергии в слое полупроводника и метаматериала. Такое поведение возможно вследствие того, что потоки энергии в слое полупроводника с положительными значениями диэлектрической и магнитной

проницаемости и слое метаматериала с отрицательными ϵ и μ имеют разное направление.

Таким образом, в представленной работе рассмотрено распространение электромагнитных волн в одномерной периодической структуре, содержащей чередующиеся слои полупроводника и метаматериала, обладающего отрицательным значением показателя преломления. Теоретически изучено образование фотонных запрещенных зон, проведено исследование положения фотонных запрещенных зон в зависимости от параметров полупроводника и соотношения толщин слоев полупроводника и метаматериала. Полученные данные могут быть использованы при конструировании селективных интегральных устройств (фильтров), работающих в области ИК и оптического диапазона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Engheta N., Ziolkowski R. W. *Metamaterials: Physics and engineering explorations*. –Wiley, 2006. –414 p.
2. Sihvola A.H., Lindell I.V. Effective permeability of mixtures // *Progress in electromagnetic research*. –1982. –№. 6. –P. 153-180.
3. Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // *УФН*. –1967. –Т. 92. –№ 3. –С. 517–526.
4. Cubukcu E., Aydin K., Ozbay E., Foteinopolou S., Soukoulis C. M. Subwavelength resolution in a two-dimensional photonic-crystal-based superlens. // *Phys. Rev. Lett.* –2003. –Vol. 91. –P. 207401-1-4.