

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра теоретической физики и астрофизики

Реферат дипломной работы
Обобщение гиперболических метаматериалов с использованием
слоистых анизотропных сред
Попов Владислав Васильевич

Научный руководитель:
д.ф.-м.н.,
А.В.Новицкий

Минск, 2016

РЕФЕРАТ

Общее число иллюстраций в работе: 9. Всего страниц в работе: 65. Число глав в работе: 3.

МЕТАМАТЕРИАЛЫ, ФОТОНИКА, СЛОИСТЫЕ СТРУКТУРЫ, СРЕДЫ С АНИЗОТРОПИЕЙ, ВОЛНЫ БЛОХА, ЭФФЕКТИВНАЯ СРЕДА, ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ.

Объектом исследования работы являются слоистые периодические структуры. Целью работы является исследование свойств структуры чередующихся слоев изотропного металла и одноосного диэлектрического кристалла, оптическая ось которого лежит в плоскости слоев, в оптическом диапазоне частот. Исследуемая структура представляет собой слоистую реализацию двуосных гиперболических метаматериалов. В качестве основного метода исследования слоистых структур в работе используются операторные ковариантные методы.

В результате работы была разработана ковариантная теория распространения блоховских электромагнитных волн в периодических слоистых структурах. Показано, что нахождение дисперсионных соотношений и поляризации волн Блоха связано с решением задачи на собственные значения и собственные векторы эволюционного оператора элементарной ячейки периодической системы. Обнаружено, что в случаях вырождения собственных значений эволюционного оператора вместе с возбуждением волн Блоха возможно возбуждение нового типа электромагнитных волн, которые соответствуют присоединенным векторам эволюционного оператора и были названы присоединенными волнами Блоха. Пространственная эволюция за период структуры поля присоединенных волн имеет линейный характер, а соответствующей плотности потока энергии квадратичный.

Показано, что присоединенные волны Блоха в двуосных слоистых гиперболических метаматериалах возбуждаются на границах зоны Бриллюэна. Проведен асимптотический и предельный анализ поведения волнового числа Блоха при фиксированной частоте. Определена связь между дисперсионными соотношениями эффективной среды и волн Блоха. Определены материальные параметры эффективной среды, соответствующей исследуемой структуре, в нулевом, первом и втором порядке по малому параметру (отношение периода структуры к длине волны в вакууме). Нулевой порядок соответствует квазистатическому приближению. В случае гиперболических метаматериалов, второй порядок эффективной теории позволяет предсказать оптическую нелокальность, с чем не справляется стандартное квазистатиче-

ское приближение. В применении к системе чередующихся слоев двух диэлектриков второй порядок эффективной среды позволяет преодолеть нарушение квазистатического приближения, которое было предсказано теоретически и подтверждено экспериментально.

ABSTRACT

Total amount of figures in the diploma paper is 9. Total amount of pages in the diploma paper is 65. The number of chapters is 3.

METAMATERIALS, PHOTONICS, LAMELLAR STRUCTURES, ANISOTROPIC MEDIA, BLOCH WAVES, EFFECTIVE MEDIUM, HYPERBOLIC METAMATERIALS.

Object of the research are lamellar periodic structures. The aim of the research is to investigate optical properties of the system of alternating layers of isotropic metal and uniaxial dielectric crystal, optical axis of the crystal lies in the plane of layers. The structure under consideration represents itself a lamellar realization of biaxial hyperbolic metamaterials. As a basic research technique operator covariant methods are used.

In the result, covariant theory of propagation of Bloch electromagnetic waves in periodic lamellar structures has been developed. It has been shown that the problems of finding dispersion equations of Bloch waves and their polarization are tightly related to the eigenvalues and eigenvectors problem for evolution operator of the unit cell of the structure. It has been found that when eigenvalues of evolution operator of the unit cell degenerate a new type of electromagnetic waves besides Bloch waves can excite. This new type of waves was called as adjoined Bloch waves. Spatial evolution of adjoined Bloch waves over period of the structure is substantially different from the one of Bloch waves and has linear character. Correspondingly, spatial evolution of the corresponding time averaged energy flux density over period of the structure is quadratic.

The problem of propagation of Bloch waves in lamellar biaxial hyperbolic metamaterials has been investigated. It has been revealed that adjoined Bloch waves excite when values of parameters of the frequency and tangential component of wavevector correspond to the edges of Brillouin zone. Asymptotic and limit analysis of Bloch wavenumber has been conducted at fixed frequency. The relationship between dispersion equations of Bloch waves in the stratified structure and plane waves in the corresponding effective medium has been found when tangential component of wavevector is small enough. By means of operator approach to the problem of effective medium material parameters of the latter corresponding to the structure under consideration have been found in the zeroth, first and second order approximation with respect to small parameter (ratio of period of the structure to the wavelength in vacuum). The zeroth order effective medium approximation corresponds to the quasistatic approximation. As the structure of our concern represents itself a more general structure than a system of alternating

isotropic layers its effective medium can be applied to both layered hyperbolic metamaterials and all-dielectric periodic systems. In case of hyperbolic metamaterials the second order effective medium approximation allows to predict optical nonlocality while standard quasistatic approach does not. The second order effective medium approximation also overcomes breakdown of quasistatic approximation applied to all-dielectric lamellar periodic systems which was predicted theoretically and confirmed experimentally.

РЭФЕРАТ

Агульная колькасць ілюстрацый у працы: 9. Усяго старонак у працы: 65. Колькасць частак у працы: 3.

МЕТАМАТЭРЫЯЛЫ, ФАТОНИКА, СЛАІСТЫЯ СТРУКТУРЫ, СРЭДЫ З АНІЗАТРАПЕЙ, ХВАЛІ БЛОХА, ЭФЕКТЫЎНАЯ СЕРАДА, ГІПЕРБАЛІЧНЫЯ МЕТАМАТЭРЫЯЛЫ.

Аб'ектам даследаванні працы з'яўляюцца слайстыя перыядычныя структуры. Мэтай працы з'яўляецца даследаванне уласцівасцяў структуры чаргуючыхся пластоў ізатропнога металу і аднаоснага дыэлектрычнага крышталля у аптычным дыяпазоне частот, аптычная вось крышталля ляжыць у плоскасці слаеў. Доследная структура ўяўляе сабой слайстую рэалізацыю двувосных гіпербалічных метаматэрыялаў. У якасці асноўнага метаду даследавання слайстай структуры у працы выкарыстоўваюцца аператарныя коваріантныя метады.

У выніку працы была распрацавана коваріантная тэорыя распаўсюджвання блохускіх электрамагнітных хваль у перыядычных плоскіх слайстых структурах. Паказана, што заходжанне дысперсійных суадносін і палярызацыі хваль Блоха звязана з рашэннем задачы на ўласныя значэнні і ўласныя вектары эвалюцыйнага аператара элементарнай ячэйкі перыядычнай сістэмы. Выяўлена, што ў выпадках выраджэння ўласных значэнняў эвалюцыйнага аператара элементарнай ячэйкі разам з узбуджэннем хваль Блоха магчыма ўзбуджэнне новага тыпу электрамагнітных хваль, якія адпавядаюць далучаным вектарах эвалюцыйнага аператара. Гэты новы тып хваляў быў названы далучанымі хвалямі Блоха. Прасторавая эвалюцыя за перыяд структуры поля далучаных хваль істотна адрозніваецца ад эвалюцыі хваляў Блоха і мае лінейныя характар. Пры гэтым прасторавая эвалюцыя шчыльнасці патоку энергіі далучаных хваль Блоха за перыяд структуры носіць квадратычныя характар.

Даследавана задача на распаўсюд блохускіх хваль у слайстых двувосных гіпербалічных метаматэрыялах. Выяўлена, што далучаныя хвалі Блоха ў іх узбуджаюцца пры значэннях параметраў частоты і тангенцыйнай кампаненты хвалевага вектара якія адпаведаюць межам зоны Бріллюэна. Праведзены асимптатычны і лімітавы аналіз паводзін хвалевага ліку Блоха пры фіксаванай частаце. Вызначаная сувязь паміж дысперсійнымі суадносінамі эфектыўнай серады і хваль Блоха дазволіла даследаваць паводзіны хвалевага ліку Блоха пры малых значэннях тангенцыйнай кампаненты хвалевага вектара блохавскай хвалі. З выкарыстаннем аператарнага падыходу ў

тэорыі эфектыўнай серады, вызначаны матэрыяльныя параметры апошней, адпаведнай доследнай структуры, у нулявым, першым і другім парадку па малому параметру (стаўленне перыяду структуры да даўжыні хвалі ў вакууме). Нулявы парадак адпавядае квазістатыческаму набліжэнню. Так як дадзеная структура ўяўляе сабой больш агульны выпадак, чым перыядычныя сістэмы ізатропных слаёў, то яе эфектыўную сераду можна прымяніць як да слоістых гіпербаличных метаматэрыялаў так і да сістэмы пластоў двух ізатропных дыэлектрыкаў. У выпадку гіпербаличных метаматэрыялаў, другі парадак эфектыўнай тэорыі дазваляе прадказаць аптычную нелакальнасць, з чым не спраўляецца стандартнае квазістатычнае набліжэнне. Таксама другі парадак эфектыўнай серады дазваляе пераадолець парушэнне квазістатычнага набліжэння ў прымяненні да перыядычнай сістэмы пластоў двух дыэлектрыкаў, якое было прадказаны тэарэтычна і пацверджана эксперыментальна.