



МЕТАМАТЕРИАЛЫ – МИФ ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ? "ОБРАТНЫЙ" ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

ЧАСТЬ 3*

А.Потапов, potapov555@tut.by,
ГНУ "Институт химии новых материалов НАН
Беларусь", Минск, Беларусь

Пространственно-упорядоченные наноструктуры показали свою перспективность в качестве оптических аналогов элементов микроэлектроники для новых вычислительных систем. Целые технологические направления возникли на базе исследований их фотонных свойств. Однако сама возможность создания материалов с обратным показателем преломления в видимом диапазоне подвергается критике. Статья приглашает к дискуссии, заканчиваясь описанием эффекта Гуса-Хенхен.

Чтобы ответить на вопрос – можно ли изгото- вить метаматериал для видимой части диапазона длин волн или нет, – необходимо отделить смелые прогнозы ряда ученых от реально наблюдаемых оптических эффектов. Разбираясь с их физической сущностью и отбрасывая методы их математического моделирования, продолжим рассмотрение ряда наблюдаемых оптических эффектов.

2.8. УСЛОВИЕ БРЭГГА-ВУЛЬФА

Это условие определяет положение интерференционных максимумов рентгеновских лучей, рассеянных кристаллом без изменения длины волны. Условие Брэгга-Вульфа установлено в 1913 году независимо друг от друга английским ученым У.Л.Брэггом и русским ученым Г.В.Вульфом вскоре после открытия немецким ученым М.Лауз и его сотрудниками дифракции рентгеновских лучей [54, 55]. Согласно теории Брэгга-Вульфа, максимумы интенсивности (дифракционные максимумы) возникают при отражении рентгеновских лучей от системы параллельных кристаллографических плоскостей, когда лучи, отраженные разными плоскостями этой системы, имеют разность хода, равную целому

* Часть 1 см.: "Фотоника", 2017, № 1, с. 108-125; часть 2 см.: "Фотоника", 2017, № 2, с. 62-79.

METAMATERIALS: MYTH OR REALITY? "REVERSE" REFRACTIVE INDEX PART 3*

A.Potapov, potapov555@tut.by,
State Scientific Institution "Institute of Chemistry of
New Materials of the National Academy of Sciences
of Belarus", Minsk, Belarus

The spatially arranged nanostructures have shown their prospects as optical analogs of microelectronics elements for new computing systems. The entire technology directions have emerged based on the researches of their photon properties. However, the possibility of creation of materials with the reverse refractive index in the visible range is subject to criticism. The article invites to discussion, coming to an end with the description of Goos-Hänchen effect.

In order to answer the question, whether it is possible to make metamaterial for visible portion of wavelengths or not, it is necessary to separate bold forecasts of a number of scientists from actually observed optical effects. Dealing with their physical essence and discarding the methods of their mathematical modeling, we will continue to consider a number of observed optical effects.

2.8. BRAGG-WOLF CONDITION

This condition defines the provision of interferential maxima of the X-rays disseminated by crystal without wavelength change. Bragg-Woolf condition was found in 1913 independently from each other by the English scientist W.L. Bragg and Russian scientist G.V. Wolf soon after discovery of X-ray diffraction by the German scientist M. v. Laue et al. [54, 55]. According to Bragg-Wolf theory, intensity maxima (diffraction peaks) arise when X-rays are reflected from a system of the parallel crystallographic planes when the beams reflected by different planes of this system have path-length difference equal to integral number of wavelengths (fig. 17). Bragg-Wolf condition can be written down as follows: $2ds\sin\theta = m\lambda$, where d is an interplanar distance, θ is a gliding angle, i.e., an angle between

числу длин волн (рис.17). Условие Брэгга-Вульфа можно записать в следующем виде: $2ds\sin\theta = m\lambda$, где d – межплоскостное расстояние, θ – угол скольжения, т.е. угол между отражающей плоскостью и падающим лучом, λ – длина волны рентгеновского излучения и m – так называемый порядок отражения (положительное целое число).

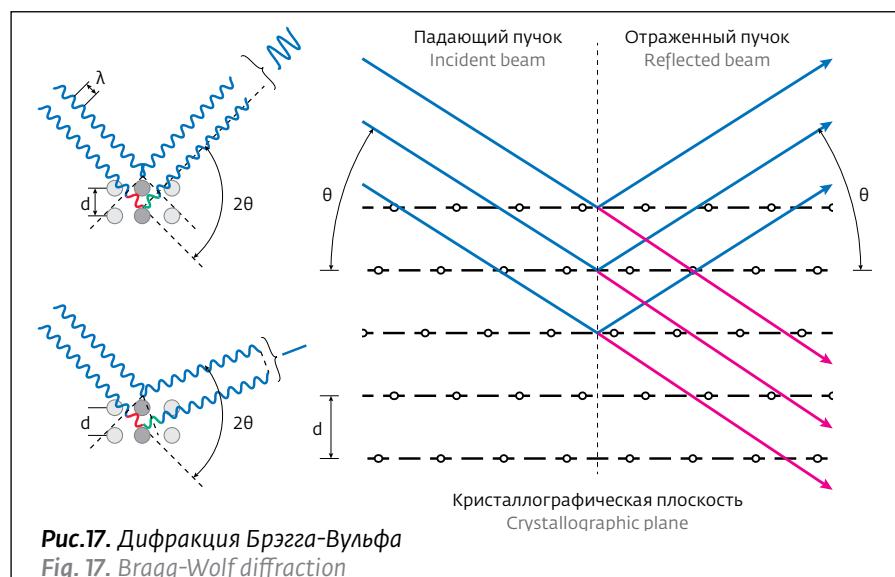
Условие Брэгга-Вульфа позволяет определить межплоскостные расстояния d в кристалле, так как λ обычно известна, а угол θ (брэгговский угол) измеряется экспериментально. Условие Брэгга-Вульфа получено без учета эффекта преломления для безграничного кристалла, имеющего идеально-периодическое строение. В действительности дифрагированное излучение распространяется в конечном угловом интервале $\theta \pm \Delta\theta$, причем ширина этого интервала определяется в кинематическом приближении числом отражающих атомных плоскостей (т.е. пропорциональна линейным размерам кристалла) аналогично числу штрихов дифракционной решетки.

Искажения решетки кристалла в зависимости от их характера ведут к изменению угла θ или возрастанию $\Delta\theta$, или к тому и другому одновременно. Условие Брэгга-Вульфа является исходным пунктом исследований в рентгеновском структурном анализе, рентгенографии материалов, рентгеновской топографии; остается справедливым при дифракции γ -излучения, электронов и нейтронов в кристаллах, при дифракции в слоистых и периодических структурах излучения радио- и оптического диапазонов, а также звука. В нелинейной оптике и квантовой электронике при описании параметрических и неупругих процессов применяются различные условия пространственного синхронизма волн, близкие по смыслу условию Брэгга-Вульфа.

2.9. ГРУППОВАЯ СКОРОСТЬ СВЕТА

Для монохроматического пучка света используется понятие фазовой скорости V_ϕ – скорости перемещения определенной фазы волны в заданном направлении. Если показатель преломления среды, зависящий от частоты, равен $n(\omega)$, то $V_\phi = c/n(\omega)$. Фазовая скорость не соответствует реальному физическому распространению света.

Рассмотрим прохождение импульса, содержащего несколько разных частотных компонентов



the reflecting plane and the falling beam, λ is the wavelength of X-ray radiation and m is the so-called order of reflection (positive integral number).

Bragg-Wolf condition allows defining interplanar distances d in a crystal since λ is usually known, and angle θ (Bragg angle) is measured experimentally. Bragg-Wolf condition is received without refractive effect for the boundless crystal having ideal periodic structure. In fact, the diffracted radiation propagates in a final angular interval $\theta \pm \Delta\theta$, where the width of this interval is defined in a kinematic approach by a number of the reflecting nuclear planes (i.e., it is proportional to the crystal linear dimensions), similar to a number of strokes of diffraction grating.

Distortions of crystal lattice, depending on their character, cause change of angle θ , or $\Delta\theta$ increase, or both in the same time. Bragg-Wolf condition is a starting point of researches in X-ray structure analysis, X-ray study of materials, X-ray topography; it remains true for diffraction of γ -radiation, electrons and neutrons in crystals, for diffraction in layered and periodic structures of radio- and optical radiation, as well as acoustic. In nonlinear optics and quantum electronics, when describing parametrical and inelastic processes, different conditions of wave spatial synchronism, similar to Bragg-Wolf condition, are applied.

2.9. GROUP VELOCITY OF LIGHT

For monochromatic light beam, the concept of phase velocity V_{ph} , the traverse velocity of certain phase of wave in the set direction, is used. If the medium refractive index depending on frequency is equal to

(с узким частотным спектром) через линейную среду, где соблюдается принцип суперпозиции. Среда с зависящим от частоты показателем преломления, например сероуглерод [56], изменяет характер интерференции, заставляя волны каждой отдельной частоты распространяться со своей фазовой скоростью. Для описания такого движения используют групповую скорость $V_g = c/(n(\omega) + v \cdot dn/d\omega) = c/n_g$, где n_g – групповой показатель преломления. Групповая скорость волн – скорость движения группы волн, образующих в каждый данный момент времени локализованное в пространстве волновое образование из суперпозиции плоских монохроматических волн с близкими значениями частот (ω) и волновых векторов (k).

При сильной дисперсии групповая скорость может быть на несколько порядков меньше скорости света в вакууме. Если среда не обладает дисперсией, то все гармонические волны распространяются с одной и той же фазовой скоростью и пакет ведет себя как строго стационарная волна – его групповая скорость совпадает с фазовой скоростью.

Различают нормальную и аномальную дисперсию света.

- Нормальная (отрицательная) дисперсия среды – показатель преломления увеличивается с ростом частоты гармонической волны ($dn/d\omega > 0$). Групповая скорость меньше фазовой, длинные волны распространяются быстрее коротких. Примеры сред с нормальной дисперсией: вещества, прозрачные для оптических волн, волноводы, изотропная плазма.
- Аномальная (положительная) дисперсия среды ($dn/d\omega < 0$) – групповая скорость сигнала превышает его фазовую скорость: $d\omega/dk > \omega/k$ (длинные волны распространяются медленнее коротких). Аномальная дисперсия характерна для капиллярных волн на поверхности воды ($V_g = 2V_\phi$), для электромагнитных и акустических волн в средах с резонансным поглощением, а также, при определенных условиях, для волн в периодических структурах (кристаллы, замедляющие системы и т.п.). При этом возможна даже ситуация, при которой групповая скорость направлена противоположно фазовой. Волны, обладающие этим свойством, называются обратными. Аномаль-

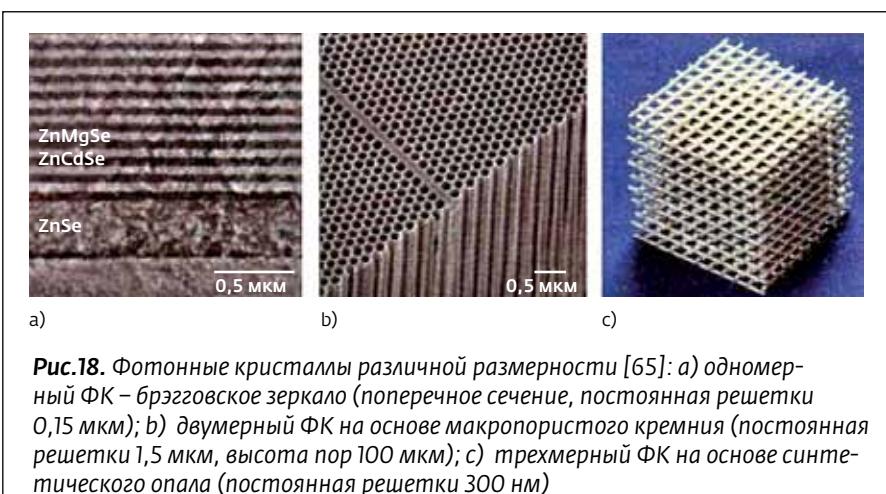


Рис.18. Фотонные кристаллы различной размерности [65]: a) одномерный ФК – брэгговское зеркало (поперечное сечение, постоянная решетки 0,15 мкм); b) двухмерный ФК на основе макропористого кремния (постоянная решетки 1,5 мкм, высота пор 100 мкм); c) трехмерный ФК на основе синтетического опала (постоянная решетки 300 нм)

Fig. 18. Photonic crystals of different dimension [65]: a) one-dimensional PC – Bragg mirror (transverse section, grid constant is 0.15 μm); b) two-dimensional PC based on macroporous silicon (grid constant is 1.5 μm , pore height is 100 μm); c) synthetic opal-based three-dimensional PC (grid constant is 300 nm)

$n(\omega)$, then $V_{ph} = c/n(\omega)$. The phase velocity does not correspond to real physical propagation of light.

Let us consider the way the pulse containing several different frequency components (with narrow content frequency) passes through the linear medium where the superposition principle is observed. The medium with the refractive index depending on frequency, e.g., carbon sulfur [56], changes the nature of interference, forcing the waves of each separate frequency to extend at their phase velocity. Such movement is described using the group velocity $V_g = c/(n(\omega) + v \cdot dn/d\omega) = c/n_g$, where n_g is a group refractive index. Group velocity of waves is the motion velocity of group of waves causing wave formation localized in space of superposition of plane simple harmonic waves with near-frequencies values (ω) and wave vectors (k) in each moment of time.

Under strong dispersion, group velocity can be some orders less than light velocity in vacuum. If the medium does not possess dispersion, all harmonious waves propagate at the same phase velocity, and the package behaves as a strictly stationary wave, i.e., its group velocity coincides with phase velocity.

The normal and abnormal dispersions of light can be distinguished.

- Normal (negative) dispersion of the medium – when the refractive index increases with growth of frequency of harmonious wave ($dn/d\omega > 0$). Group velocity is less than the phase velocity; long waves propagate faster than the short ones. Examples of media with normal dispersion: substances, transparent for optical waves, wave guides, isotropic plasma.

ная дисперсия наблюдается в пределах полос или линий поглощения, нормальная – вдали от собственных линий поглощения.

Групповая скорость определяет скорость и направление переноса энергии волнами. В анизотропных средах (в кристаллах, в плазме, в постоянном магнитном поле), где ν волн зависят от частоты и направления распространения, групповая скорость определяется как векторная производная $V_g = d\omega/dk$ и обычно не совпадает по направлению с фазовой скоростью. В средах с сильным поглощением вместо групповой скорости вводят величину, характеризующую скорость переноса энергии $V_{\text{эн}} = \langle S \rangle / \langle W \rangle$, где $\langle S \rangle$ – средняя плотность потока энергии, а $\langle W \rangle$ – средняя плотность энергии в волнах. В прозрачных средах величины $V_{\text{эн}}$ и V_g совпадают. Согласно теории относительности групповая скорость не может превышать скорость распространения света в вакууме [57–60].

2.10. ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Много внимания уделяется фотонным кристаллам (ФК) – структурам, в которых диэлектрическая проницаемость модулируется с периодом, сравнимым с длиной волны света [61]. Брэгговская дифракция собственных электромагнитных состояний блоховского^{*} типа на краю зоны Бриллюэна^{**} таких структур приводит к возникновению фотонной запрещенной зоны (photonic band gap) для излучения [62, 63].

Сложно? Попробуем упростить и переформулировать.

ФК – структуры, состоящие из периодически чередующихся материалов (рис.18), при прохождении ЭМИ через которые возникает брэгговская дифракция (см. рис.17) на периодически чередующихся границах слоев с разной диэлектрической проницаемостью. Эта периодичность, по аналогии с электронной зонной структурой в регулярной кристаллической решетке, обусловливает возникновение "фотонной запрещенной зоны" – спектраль-

* Волна Блоха (Bloch wave) – волновая функция частицы, движущейся в периодически неоднородной среде (кристалле).

** Бриллюэна зоны (Brillouin zones) – области значений волнового вектора k , при которых энергия электронов изменяется непрерывно, а на границах претерпевает разрыв.

Волновой вектор k является одной из основных характеристик состояния электрона в твердом теле. В соответствии с зонной теорией, электрон в кристалле не может иметь непрерывный спектр значений энергий, поэтому и на зависимости энергии электронов $E(k)$ также должны быть исключены участки, соответствующие запрещенным зонам, т.е. кривая $E(k)$ должна иметь разрывы в некоторых точках.

Физический смысл границ зоны Бриллюэна заключается в том, что они показывают такие значения волновых векторов или квазимпульсов электрона, при которых электронная волна не может распространяться в твердом теле [64].



Рис.19. Иризация крыльев бабочки *Vanessa kershawi* и фрагмент поверхности крыла

Fig. 19. Iridescence of butterfly wings of *Vanessa kershawi* and a fragment of wing surface

- Abnormal (positive) dispersion of the medium ($d\mu/d\omega < 0$) – when the group velocity of signal exceeds its phase velocity: $d\omega/dk > \omega/k$ (long waves propagate more slowly than the short ones). Abnormal dispersion is characteristic for capillary waves on water surface ($V_g = 2V_{\text{ph}}$), for electromagnetic and acoustic waves in media with resonance absorption, and also, under certain conditions, for waves in periodic structures (crystals, slow-wave circuits, etc.). Thus, the situation where group velocity is directed opposite to the phase velocity is possible. The waves possessing this property are called reverse waves. Abnormal dispersion is observed within bands or lines of absorption, normal

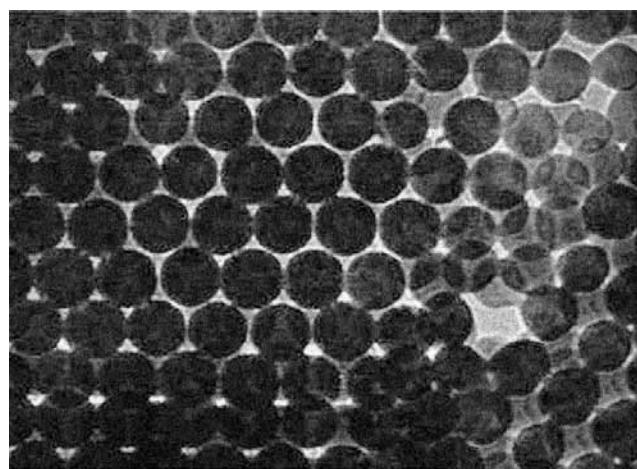


Рис.20. Микрофотография опала в просвечивающем режиме, упаковка микросфер

Fig. 20. Microphotograph of opal in the translucent mode, microspheres packaging

ной области, в пределах которой распространение света подавлено во всех или в некоторых избранных направлениях ФК.

При совпадении масштабов модуляции диэлектрической проницаемости и длины волн зондирующего излучения спектры пропускания содержат характерные полосы, обусловленные брэгговским отражением электромагнитных волн. Проявление фотонных свойств встречается и в живой природе (рис.19). Характерное для ФК явление иризации (радужная игра света) наблюдается у некоторых бабочек (*Vanessa kershawi*, *Morpho rhetenor*), у морского черва (*Genus aphrodita*) и у некоторых других видов организмов [65].

Опал – один из ювелирных камней, проявляющих свойства ФК. Этот минерал характеризующийся разнообразной игрой света – опалесценцией*, представляет собой гидрогель диоксида кремния $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ с переменным содержанием воды и имеет следующий химический состав, мас.%: SiO_2 – 65–90, H_2O – 4,5–20, Al_2O_3 – до 9, Fe_2O_3 – до 3, TiO_2 – до 5. Иногда в опалах присутствуют примеси NiO , MnO_2 , органического вещества. Опалы могут быть бесцветными или окрашенными в различные цвета за счет примесей. Показатель преломления 1,44–1,46.

С помощью электронной микроскопии установлено, что благородные опалы состоят из однородных по размеру сферических частиц $\alpha\text{-SiO}_2$ диаметром 150–450 нм (рис.20), которые, в свою очередь, образованы из более мелких глобуллярных структур диаметром 5–50 нм. Пустоты упаковки сфер $\alpha\text{-SiO}_2$ заполнены аморфным диоксидом кремния. Интенсивность дифрагированного света определяется "идеальностью" упаковки микросфер и различием в показателях преломления кристаллического и аморфного диоксида кремния. Наиболее заметная иризация наблюдается для черных опалов, различие в показателях преломления которых составляет $\approx 0,02$.

ФК представляют интерес как для фундаментальных исследований, так и для различных применений: в оптической связи, лазерных технологиях, для создания принципиально новых устройств и приборов. Например, на их основе можно создавать новые устройства для управления световыми потоками. Возможности управления групповой и фазовой скоростью световых импульсов, а также увеличения эффективности нелинейно-оптиче-

* Способность минерала испускать разноцветные световые блики своей поверхностью (переливчатость, радужная игра цветов). Эффект обусловлен интерференционными явлениями, связанными с регулярной структурой минерала, по масштабу периодичности отвечающей длинам волн видимого света.

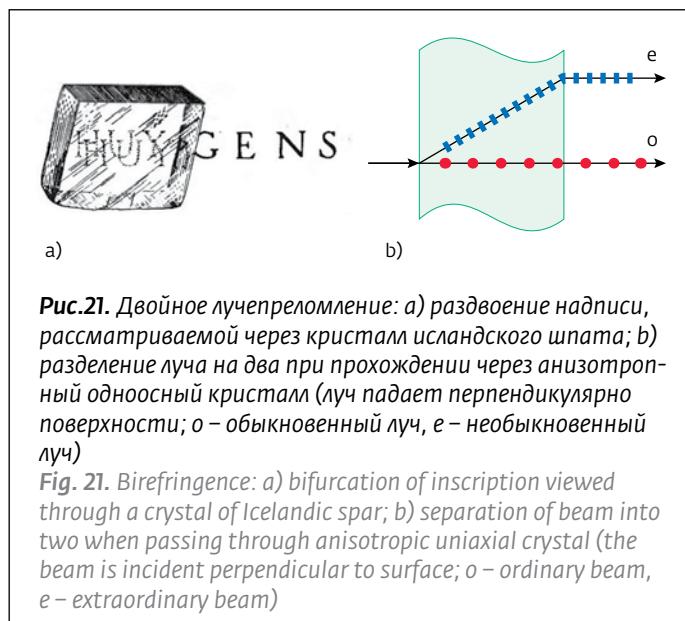


Рис.21. Двойное лучепреломление: а) раздвоение надписи, рассматриваемой через кристалл исландского шпата; б) разделение луча на два при прохождении через анизотропный одноосный кристалл (луч падает перпендикулярно поверхности; о – обыкновенный луч, е – необыкновенный луч)

Fig. 21. Birefringence: a) bifurcation of inscription viewed through a crystal of Icelandic spar; b) separation of beam into two when passing through anisotropic uniaxial crystal (the beam is incident perpendicular to surface; o – ordinary beam, e – extraordinary beam)

dispersion is observed far from own lines of absorption.

Group velocity determines the velocity and direction of energy transfer by waves. In anisotropic media (in crystals, in plasma, in constant magnetic field) where the number of waves depends on frequency and direction of propagation, group

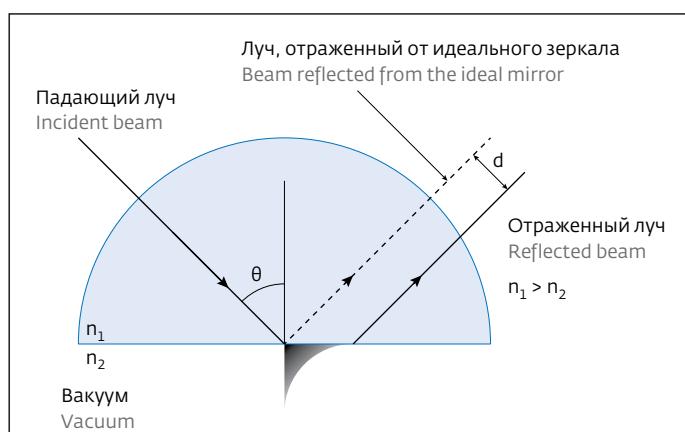


Рис.22. Положительный сдвиг Гуса-Хенхен при полном внутреннем отражении для конечной плоской монохроматической электромагнитной волны на границе оптических сред. Эванесцентная волна смещает отраженную волну вправо. Величина сдвига линейно поляризованного (s- и p-поляризация) света различна

Fig. 22. Positive Goos-Hänchen shift in the event of total internal reflection for finite plane simple harmonic electromagnetic wave on the border of optical media. The evanescence wave displaces the reflected wave to the right. The value of linearly polarized (s- and p-polarization) light shift is different



ских процессов в таких структурах обусловливают перспективы использования ФК в телекоммуникационных системах (светофильтры, миниатюрные волноводы, преобразователи длины волн) [65].

Широкое распространение получили покрытия и краски на основе коллоидных микросфер. При их высыхании образуется пленка, ярко переливающаяся на солнце при изменении угла падения света (особенно актуально для автомобильной промышленности).

Считается, что уже в недалеком будущем фотоны могут "заменить" электроны не только в системах передачи информации, но и в компьютерах (уже сейчас разрабатываются проекты по созданию оптического компьютера), что приведет к революционным изменениям во всей информационной технологии. Использование ФК при конструировании телекоммуникационных систем может способствовать снижению коэффициента затухания оптических волокон, созданию низкопороговых лазерных излучателей (видимого и ближнего ИК-диапазонов) и сверхбыстрых оптических переключателей потоков информации.

С точки зрения достижения необходимых фотонных свойств весьма перспективны нанокомпозиты на основе синтетических опалов, заполненных полупроводниковыми материалами. Это обусловлено как дешевизной и технологичностью приготовления достаточно совершенных опалов и композитов на их основе с толщиной более 100 и даже 1000 структурных ячеек, так и возможностью варьирования их оптических свойств.

2.11. ДВОЙНОЕ ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ. ЭФФЕКТ КЕРРА

Двойное лучепреломление – эффект расщепления в анизотропных средах луча света на две составляющие. Впервые эффект обнаружен на кристалле исландского шпата. Если луч света падает перпендикулярно к поверхности кристалла (рис.21), то он расщепляется на два луча. Первый луч продолжает распространяться прямо и называется обычным (o – ordinary), второй же отклоняется в сторону и называется необыкновенным (e – extraordinary). В результате в кристалле возникают две волны, имеющие взаимно перпендикулярную линейную поляризацию и идущие в разных направлениях с различными скоростями (соответственно, с различными показателями преломления).

Для характеристики двулучепреломления используют разность показателей преломления двух образовавшихся волн: $\Delta_n = n_o - n_e$. На выходе из кристалла из-за разной скорости возникает сдвиг фаз.

velocity is defined as vector derivative $V_g = d\omega/dk$, and usually does not coincide in the direction with phase velocity. In media with strong absorption instead of group velocity, the value characterizing the velocity of energy transfer $V_{en} = \langle S \rangle / \langle W \rangle$, where $\langle S \rangle$ is the average energy flux density, and $\langle W \rangle$ is the average density of energy in waves, is introduced. In transparent media, V_{en} and V_g values coincide. According to the relativity theory, group velocity cannot exceed the velocity of propagation of light in vacuum [57-60].

2.10. PHOTONIC CRYSTALS

Much attention is paid to photonic crystals (PC), the structures where dielectric permittivity is modulated with the period, comparable with the wavelength of light [61]. Bragg diffraction of intrinsic electromagnetic conditions of Bloch^{*} type on the border of Brillouin zone^{**} of such structures leads to emergence of photonic band gap for radiation [62, 63].

Does it sound difficult? Let us try to simplify and reformulate.

PCs are the structures consisting of periodically alternating materials (fig. 18) when passing EMI through which Bragg diffraction arises (fig. 17) on periodically alternating borders of layers with different dielectric permittivity. This periodicity, by analogy with electronic zonal structure in regular crystal lattice, causes emergence of "photonic band gap", i.e., spectral area within which propagation of light is suppressed in all or in some chosen directions of PC.

When scales of modulation of dielectric permittivity and wavelength of probing radiation coincide, transmission spectrums contain the characteristic bands caused by Bragg reflection of electromagnetic waves. Manifestation of photonic properties is also met in wildlife (fig. 19). The irisation phenomenon, characteristic for

* Bloch wave is a wave function of the particle moving in periodically non-uniform medium (crystal).

** Brillouin zones are the ranges of values of wave vector k, where energy of electrons changes continuously, and discontinues on the borders.

The wave vector k is one of the main characteristics of electron condition in a solid body. According to the band theory, the electron in crystal cannot have ionization continuum of values of energy, therefore the dependence of energy of electrons E(k) should not have sites corresponding to band gaps, i.e. curve E(k) should have discontinuities in some points.

The physical sense of the Brillouin zone borders is that they show such values of wave vectors or electron quasi-momentums where the electronic wave cannot propagate in a solid body [64].



Эффект Керра – возникновение двойного лучепреломления в оптически изотропных веществах (жидкостях, стеклах, кристаллах с центром симметрии) под воздействием постоянного электрического поля. Помещенное в электрическое поле изотропное вещество становится анизотропным, приобретая свойства одноосного кристалла. Величина двойного лучепреломления Δ_n пропорциональна квадрату напряженности электрического поля E : $\Delta_n = nkE^2$, где n – показатель преломления вещества в отсутствие поля, k – постоянная Керра.

2.12. ЭФФЕКТ ГУСА-ХЕНХЕН

Эффект Гуса-Хенхен (GH) представляет собой продольный сдвиг отраженного луча при полном внутреннем отражении относительно положения, определенного геометрической оптикой (рис.22). Этот эффект был обнаружен в 1943 году Ф.Гусом и Х. Хенхен при многолучевой интерференции в стеклянной пластине. Наблюдаемый сдвиг составил $1-2\lambda$ при длине волны 578 нм.

Один из подходов к объяснению GH-сдвига был предложен в работе [66]. При полном внутреннем отражении на поверхности диэлектрика возникает экспоненциально затухающее эванесцентное поле (смотри раздел 2.5). Поток энергии через плоскость, перпендикулярную плоскости падения луча и границе раздела двух сред, не равен нулю, а интенсивности падающего и отраженного лучей одинаковы. В этом случае закон сохранения энергии выполняется только при возникновении сдвига отраженного луча.

Имеется ряд публикаций [67-74], в которых авторы рассуждают об отрицательном GH-сдвиге. Большинство этих работ – теоретические, т.е. авторы моделируют отрицательный GH-сдвиг в различных средах (поглощающие среды, Ме поверхности) и под различными углами падения. Экспериментальное подтверждение отрицательного GH-сдвига доказало бы существование NIM. И вот М.Мерано с соавторами [73] заявляет об экспериментальном подтверждении существования отрицательного GH-сдвига при отражении от золотой пленки. Однако, как это ни удивительно, в тексте статьи не указаны величины отрицательного сдвига D_p (сдвиг для p-поляризованного света) и положительного сдвига D_s (для s-поляризованного света). Вместо этого приводится разность $D_p - D_s$, которая при больших углах падения (луч лазера скользит по поверхности золотой пленки) становится отрицательной. Остается только гадать, зачем авторы в таком виде представили экспериментальные данные и что они получили на самом деле. Был ли зафиксирован отрицательный сдвиг или

PC (iridescent play of light) is observed in some butterflies (Vanessa kershawi, Morpho rhetenor), sea worm (Genus aphrodita) and in some other types of organisms [65].

Opal is one of the gemstones demonstrating PC properties. This mineral is characterized in various play of light, i.e., opalescence*, and represents silicon dioxide hydrogel $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ with variable water content and has the following chemical composition, % wt.: SiO_2 – 65–90, H_2O – 4.5–20, Al_2O_3 – up to 9, Fe_2O_3 – up to 3, TiO_2 – up to 5. Sometimes opals have NiO , MnO_2 impurities, organic substance. Opals can be colorless or have different colors due to impurities. Their refractive index is 1.44–1.46.

By means of electronic microscopy it was established that jeweler's opals consist of spherical particles, homogeneous by the size, $\alpha\text{-SiO}_2$ (fig. 20) with a diameter of 150–450 nm which, in turn, are formed of smaller globular structures with a diameter of 5–50 nm. Voids of spheres packaging $\alpha\text{-SiO}_2$ are filled with amorphous silicon dioxide. Intensity of diffracted light is defined by "ideality" of microspheres packaging and distinction in refractive indices of crystal and amorphous silicon dioxide. The most noticeable irisation is observed for black opals, where distinction in refractive indices makes ~0.02.

PCs are of interest both to basic researches, and to different applications: in optical interconnection, laser technologies, for creation of essentially new appliances and devices. For example, it is possible to create new devices for control of luminous fluxes. Possibilities of management of group and phase velocity of light pulses, and also increase in efficiency of nonlinear and optical processes in such structures cause perspectives of PCs use in telecommunication systems (light filters, miniature wave guides, wavelength converters) [65].

Coverings and paints based on colloid microspheres are widely used. When they dry up, the film is formed opalescent in the sun at change of light incidence angle (especially popular for automotive industry).

It is considered that in the near future photons can already "replace" electrons not only in the information transfer systems, but also in computers (projects on creation of optical computer are under

* Ability of a mineral to emit multi-colored highlight from its surface (iridescence, iridescent change of colors). The effect is caused by the interferential phenomena connected with the regular structure of mineral, corresponding to lengths of waves of visible light by scale of frequency.



попросту сдвиг D_s превышает сдвиг D_p ? Аналогично представлены экспериментальные данные в работе [74], где анализируется разность $\Delta_{TM} - \Delta_{TE}$ (TM – р-поляризованный, а TE – s-поляризованный свет). Следует констатировать, что на сегодняшний день исследователям не удалось экспериментально подтвердить существование отрицательного СН-сдвига.

Список интересных оптических эффектов, касающихся прохождения ЭМИ через вещество, можно продолжать. Например:

- параметрическое рассеяние света – неупругое рассеяние света в однородной нелинейной среде, параметры которой модулируются световой волной;
- рассеяние Мандельштама-Бриллюэна – рассеяние света на адиабатических флуктуациях плотности конденсированных сред, сопровождающееся изменением частоты;
- рассеяние Тиндаля – упругое рассеяние света неоднородными средами;
- многофотонное поглощение – взаимодействие ЭМИ с веществом, при котором в одном элементарном акте поглощается несколько фотонов.

Но это уже темы других публикаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой части обзора были рассмотрены NIMs и проведен критический анализ. Во второй и третьей частях кратко описаны реально наблюдаемые сложные оптические эффекты. Анализируя материал, изложенный в первой части, можно сделать вывод о том, что NIM, работающий в видимом диапазоне и отвечающий предположениям/предсказаниям Веселаго и Пендири, создан не будет.

Современным исследователям нужно научиться отличать реально существующие сложные, необычные явления (эффекты) от туманных предположений и гипотез, основанных в первую очередь на амбициях авторов. Это очень тонкая грань, требующая от исследователей глубоких знаний в предметной области, интуиции, критического анализа любой новой информации и одновременно гибкого мышления и способности воспринимать новое, конструктивно реагировать на критику.

Одно из основных направлений развития современных нанотехнологий базируется на использовании уникальных свойств пространственноупорядоченныхnanoструктур и построении на их основе оптических аналогов элементов микроэлектроники (проводников, диодов, транзисторов, элементов памяти и т.п.). Такие исследования имеют конечной целью разработку элементной базы для созда-

development) that will lead to revolutionary changes in all information technology. Use of PCs in designing of telecommunication systems can promote decrease in attenuation coefficient of optical fibers, creation of low-threshold laser radiators (visible and near Infrared ranges) and superfast optical switches of information flows.

From the point of view of achievement of required photon properties, synthetic opal-based nanocomposites filled with semiconductor materials are very perspective. It is caused both by low cost and technological effectiveness of preparation of relatively perfect opals and opal-based composites with thickness over 100 and even 1000 structural cells, and possibility of variation of their optical properties.

2.11. BIREFRINGENCE. KERR EFFECT

Birefringence is the effect of splitting in anisotropic mediums of ray of light into two components. For the first time the effect was found on crystal of Icelandic spar. If the ray of light is incident perpendicularly to crystal surface (fig. 21), it is split into two beams. The first beam continues to propagate directly and is called ordinary (o - ordinary), the second deviates and is called extraordinary (e - as extraordinary). As a result, two waves having mutually perpendicular linear polarization and diverging with different velocitys (respectively, with different indices of refraction) occur in the crystal.

The difference of refractive indices of two formed waves is used to characterize birefringence: $\Delta_n = n_o - n_e$. On the exit from crystal phase shift occurs due to different velocity.

Kerr effect is the emergence of birefringence in optically isotropic substances (liquids, glasses, crystals with the center of symmetry) under the influence of constant electric field. The isotropic substance placed in electric field becomes anisotropic, gaining properties of uniaxial crystal. Birefringence value Δ_n is proportional to square of electric field intensity E: $\Delta_n = nkE^2$, where n is refractive index of substance in lack of field, k is Kerr constant.

2.12. GOOS-HÄNCHEN EFFECT

Goos-Hänchen (GH) effect represents longitudinal shift of reflected beam in the conditions of total internal reflection relative to location determined by ray optics (fig. 22). This effect was discovered in 1943 by F. Goos and H. Hänchen for multibeam interference in a glass plate. The observed shift was $1-2 \lambda$ at the wavelength of 578 nm.



ния квантовых компьютеров и нейронных сетей. И хотя текущий уровень развития технологий пока весьма далек от непосредственной реализации таких проектов, можно отметить несомненную важность данной области для создания качественно новых вычислительных систем.

Что касается исследований по созданию различных композиционных материалов, то они, несомненно, дадут практический результат [75–89]. Например, композиты с наночастицами (нанотрубками, нановолокнами) или субмикронными частицами применяются в Stealth технологии, при создании термофотоэлектрических элементов, фотодетекторов (сенсоров), для радиационного охлаждения/нагрева оптоэлектронных устройств, в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния, при изготовлении ЖК-устройств.

Незаметно для большинства читателей исследователи из области практической физики перешли в область абстрактной математики. И критика относительно предсказаний о существовании метаматериалов в диапазоне видимого света осталась практически незамеченной из-за большого количества теоретических работ в пользу такой возможности.

ЛИТЕРАТУРА

54. Bragg W.L. The diffraction of short electromagnetic waves by a crystal. – Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1914, v. 17, p. 43.
55. Физ. энциклопедия под ред. А.М.Прохорова. Т.1.Ааронова-Бома эффект – Длинные линии.– М.: Сов. энциклопедия, 1988.
Fiz. jenciklopedija pod red. A.M.Prohorova. T.1. Aaronova-Boma jeffekt – Dlinnye linii.– M.: Sov. jenciklopedija, 1988.
56. Ландсберг Г.С. Оптика. Уч. пособие для вузов. 6 изд.– М.: Физматлит, 2003, с. 393.
Landberg G.S. Optika. Uch. posobie djja vuzov. 6 izd.– M.: Fizmatlit, 2003, s. 393.
57. Горелик Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. 2 изд.– М.: Физматгиз, 1959.
Gorelik G.S. Kolebanija i volny. Vvedenie v akustiku, radiofiziku i optiku. 2 izd.– M.: Fizmatgiz, 1959.
58. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. 2 изд.– М.: Наука, 1967.
Ginzburg V.L. Rasprostranenie elektromagnitnyh voln v plazme. 2 izd.– M.: Nauka, 1967.
59. Крауфорд Ф. Волны. Пер. с англ. 3 изд.– М.: Наука, 1984.
Krauford F. Volny. Per. s angl. 3 izd.– M.: Nauka, 1984.
60. Пирс Д.Р. Почти все о волнах. Пер. с англ.– М.: Мир, 1976.
Pirs D.R. Pochti vse o volnah. Per. s angl.– M.: Mir, 1976.
61. Photonic Band Gap Materials. Ed.By C.M Soukoulis. Advanced Studies Institute of NATO, Ser. E, v. 315.– Dordrecht: Kluwer, 1996.
62. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics.– Phys. Rev. Lett., 1987, v. 58, p. 2059–2062.
63. Sajeev J. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices.– Phys. Rev. Lett., 1987, v. 58, p. 2486–2489.
64. Мегэнциклопедия Кирилла и Мефодия. Бриллюэна зоны. Код доступа: megabook.ru.
Megajenciklopedija Kirilla i Mefodija. Brillijuena zony. Kod dostupa: megabook.ru.
65. Елисеев А.А., Лукашин А.В. Функциональные наноматериалы.– М.: Физматлит,

One of the approaches to GH shift explanation was suggested in work [66]. With total internal reflection on dielectric surface, there is exponential attenuating evanescent field (see section 2.5). The energy flow through the plane, perpendicular to the plane of beam incidence and interface of two media, is not equal to zero, and the intensity of the incident and reflected beams are identical. In this case the law of energy conservation is true only in case of shift of reflected beam.

There are a number of publications [67–74] where the authors argue on negative GH shift. The majority of these works is theoretical, i.e. authors model negative GH shift in different mediums (absorbing mediums, Me surfaces) and under different incidence angles. Experimental confirmation of negative GH shift would prove the existence of NIM. And now M. Merano et al. [73] declare experimental confirmation of existence of negative GH shift in under conditions of reflection from gold film. However, surprisingly, the values of negative shift D_p (shift for p-polarized light) and positive shift D_s (for s-polarized light) are not specified in the text of article. Instead the difference $D_p - D_s$ is given becoming negative with significant incidence angles (laser beam slides on gold film surface). One can only guess why the authors have presented experimental data in such form and what they have obtained in reality. Whether negative shift was recorded or simply shift D_s exceeded shift D_p ? Experimental data in work [74] where the difference $\Delta_{TM} - \Delta_{TE}$ is analyzed (TM is p-polarized light, and TE is s-polarized light) are similarly presented.

It should be noted that nowadays the researchers have not managed to confirm the existence of negative GH shift experimentally.

The list of the most interesting optical effects concerning EMI passing through substance can be continued. For example:

- parametrical dispersion of light – inelastic dispersion of light in homogeneous nonlinear medium where the parameters are modulated by light wave;
- Mandelstam-Brillouin dispersion – the dispersion of light on adiabatic fluctuations of density of condensed mediums which is followed by frequency change;
- Tyndall dispersion – elastic dispersion of light by non-uniform mediums;
- multiphoton absorption – interaction of EMI with substance where several photons are absorbed in one elementary act.



- 2010, c. 117–132.
- Eliseev A.A., Lukashin A.V. Funktsional'nye nanomaterialy.– M.: Fizmatlit, 2010, s. 117–132.
66. Renard R.H. Total reflection: a new evaluation of the Goos-Hänchen shift.– J. Opt. Soc. Am., 1954, v. 54, iss. 10, p. 1190–1197.
67. Leung P.T., Chen C.W., Chiang H.-P. Large negative Goos-Hänchen shift at metal surfaces.– Optics Communications, 2007, v. 276, p. 206–208.
68. Jiang R., Huang Z.-X., Lu G.-Z. Negative Goos-Hänchen shifts with nano-metal-films on prism surface.– Preprint, arXiv:1212.2728 [physics.optics], 2012, p. 9.
69. Wang X., Jiang A. and Zheng F. Large and bistable Goos-Hänchen shifts from the Kretschmann configuration with a nonlinear negative-zero-positive index metamaterial.– J. Opt., 2014, v. 16, no. 4, p. 045101(6).
70. Anicin B.A., Fazlic R. and Kopric M. Theoretical evidence for negative Goos-Hänchen shifts.– J. Phys. A: Math. Gen., 1978, v. 11, no. 8, p. 1657–1662.
71. Huang J., Duan Z., Ling H.Y. and Zhang W. Goos-Hänchen-like shifts in atom optics.– Physical Review A, 2008, v. 77, p. 063608(7).
72. Lakhtakia A. Positive and negative Goos-Hänchen shifts and negative phase-velocity mediums (alias left-handed materials).– Preprint, arXiv: physics/0305133v1 [physics.optics], 2003, 5 p.
73. Merano M., Aiello A., Hooft G.W.'t, van Exter M.P., Eiel E.R., Woerdman J.P. Observation of Goos-Hänchen shifts in metallic reflection.– Optics Express, 2007, v. 15, iss. 24, p. 15928–15934.
74. Yin X., Hesselink L., Liu Z., Fang N., Zhang X. Large positive and negative lateral optical beam displacements due to surface plasmon resonance.– Appl. Phys. Lett., 2004, v. 85, no. 3, p. 372–374.
75. Pat. CN102303429 (A). Tunable flat absorbing material for electromagnetic waves / Wen Q., Zhang H., Yang Q. et al.
76. Pat. US2012024359 (A1). Thermophotovoltaic system / Hou W.-C., Wu T.-H., Ni C.-J. et al.
77. Pat. US2012312360 (A1). Thin-film integrated spectrally-selective plasmonic absorber/emitter for solar thermophotovoltaic applications / Shvets G., Wu C.-H.
78. Nefedov I.S., Valagiannopoulos C.A., Hashemi S.M., Nefedov E.I. Total absorption in asymmetric hyperbolic media.– Scientific Reports, 2013, v. 3, article no. 2662, 6 p.
79. Pat. US20130340990 (A1). Radiative cooling of optoelectronic devices using hyperbolic metamaterials / Smolyaninov I.I., Narimanov E.
80. Pat. US20140059830 (A1). Hyperbolic metamaterials as distributed Bragg mirrors for high power VCSEL devices / Morel Y.C., Smolyaninov I.I.
81. Pat. CN103063607 (A). Optical refractive index sensor based on metamaterial absorber / Zhao X., Zhu W., Wang X. et al.
82. Pat. GB2500232 (A). Increasing intensity of electromagnetic source with optical metamaterial / Palikaras G., Kallos T.
83. Pat. US6608716 (B1). Optical enhancement with nanoparticles and microcavities / Armstrong R.L., Shalaev V.M., Shay T.M. et al.
84. Pat. US2012077280 (A1). Nanofibers with modified optical properties / Chase G.G., Evans E.A., Ramsier R.D. et al.
85. Pat. US2006263593 (A1). Display devices with light absorbing metal nanoparticle layers / Aziz H., Paine A.J., Popovic Z.D.
86. Pat. US8263418 (B2). Sensors for detecting an analyte using silver nanoparticles / Brennan M., Armstrong G., Kelly J. et al.
87. Pat. WO 2011071417 (A1). Bactericidal sorbent material and method for producing same / Lerner M.I., Glazkova E.A., Psakhe S.G. et al.
88. Пат. RU2314834 (С1). Раневое покрытие / Добыш С.В., Волкова А.А.
89. Morones J.R., Elechiguerra J.L., Camacho A., Holt K., Kouri J.B., Ramirez J.T., Yacaman M.J. The bactericidal effect of silver nanoparticles.– Nanotechnology, 2005; v. 16, p. 2346–2353.

But these should be the subjects of other publications.

CONCLUSION

The first part of the overview concerned the NIMs and their critical analysis. Actually observed complex optical effects were briefly described in the second and third parts. Analyzing the material stated in the first part of article, it is possible to draw conclusion that NIM operating in the visible range and corresponding to Veselago and Pendry assumptions/predictions will not be created.

Modern researchers need to learn to distinguish the real-life complex, unusual phenomena (effects) from the foggy assumptions and hypotheses based, first of all, on ambitions of their authors. It is a very thin edge demanding the researchers to possess profound knowledge in subject domain, intuition in critical analysis of any new information and at the same time flexible thinking and ability to perceive new information, positively reacting to criticism.

One of the main directions of development of modern nanotechnologies is based on use of unique properties of the spatially arranged nanostructures and creation of optical analogs of elements of microelectronics on their base (conductors, diodes, transistors, memory elements, etc.). Such researches have ultimate goal to develop element base for creation of quantum computers and neural networks. And though the current level of development of technologies is still very far from direct implementation of such projects, it is possible to note undoubted importance of this area for creation of qualitatively new computing systems.

As for researches on creation of different composition materials, they, undoubtedly, will yield practical result [75–89]. For example, composites with nanoparticles (nanotubes, nanofibres) or submicronic particles are applied in Stealth technology, for creation of thermophotoelectric cells, photodetectors (sensors), for radiation cooling/heating of optoelectronic devices, in spectroscopy of huge Raman scattering, for manufacturing LC devices.

Imperceptibly for most of the readers, the researchers have shifted from the area of practical physics into the area of abstract mathematics. Therefore, the criticism concerning predictions for existence of metamaterials in the field of visible light remained almost unnoticed because of a large number of theoretical works in favor of such possibility.