

Фотонные кристаллы и метаматериалы - 1



С.Г. Тиходеев

ИОФ РАН им. А.М. Прохорова



Династия

**Летняя школа фонда Дмитрия Зимина
«Династия»**

*"Актуальные проблемы конденсированного
состояния (теория и эксперимент)"*

Репино, 12 -21 июля 2013



- 1. Фотонные и поляритонные кристаллы, наноплазмоника**
- 2. Пример: решетка металлических нанонитей с плазмон-поляритонами**
- 3. Методы расчета**
- 4. Метаматериалы**
- 5. Линза Веселаго для распространяющихся волн**
- 6. Пендри: «Преодоление дифракционного предела разрешения» в дальней волновой зоне**
- 7. Эффективный электромагнитный отклик метаматериалов, пространственная нелокальность**
- 8. Киральные метаматериалы**

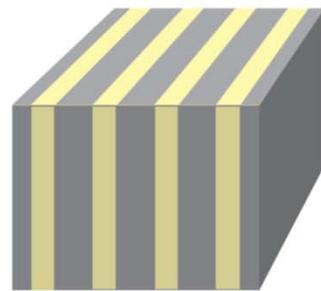


- **Фотонный кристалл = среда с пространственно-периодической диэлектрической проницаемостью**

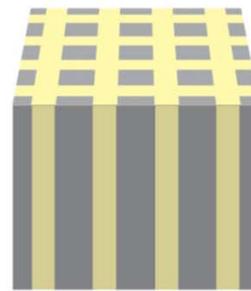
В.П. Быков 1972

E. Yablonovitch 1987

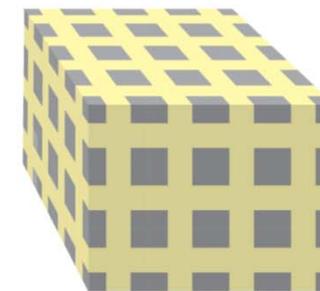
S. John 1987



1D



2D



3D

Более простые в изготовлении системы: фотонно-кристаллические слои с 1D или 2D периодической модуляцией и произвольно сложной (или простой) структурой по вертикали

Rittenhouse 1786

Fraunhofer 1821

Wood 1902

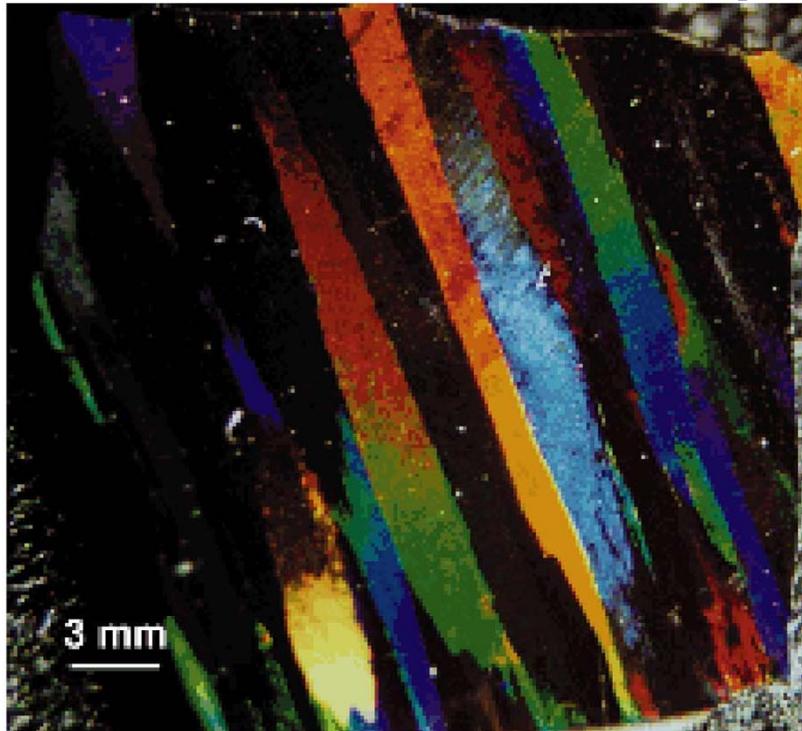
Lord Rayleigh 1907

Fano 1941

- **Дифракционная решетка = 1D фотонно-кристаллический слой**

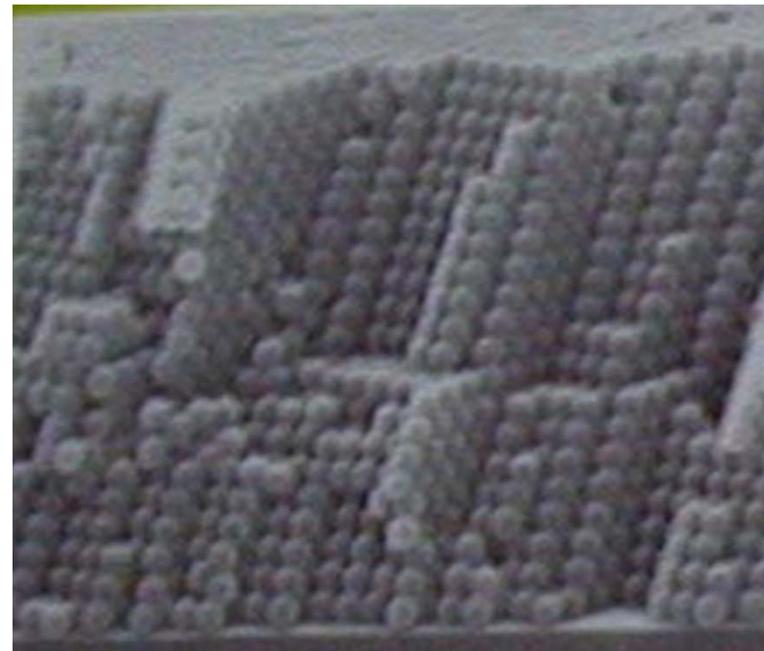
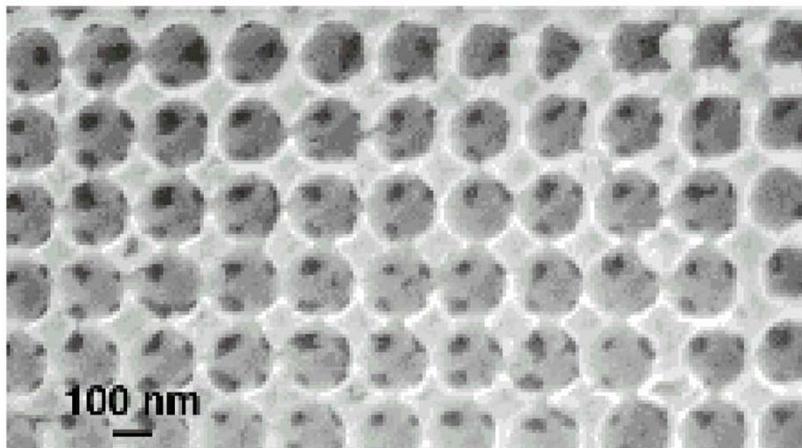


Фотонные кристаллы в природе



Опалы: естественные фотонные кристаллы, образованные слипшимися нано-шариками

На рисунке показана искусственные опало-подобные структуры из фуллеренов (слева) и кварцевых наночастиц (внизу)



Окраска бабочки

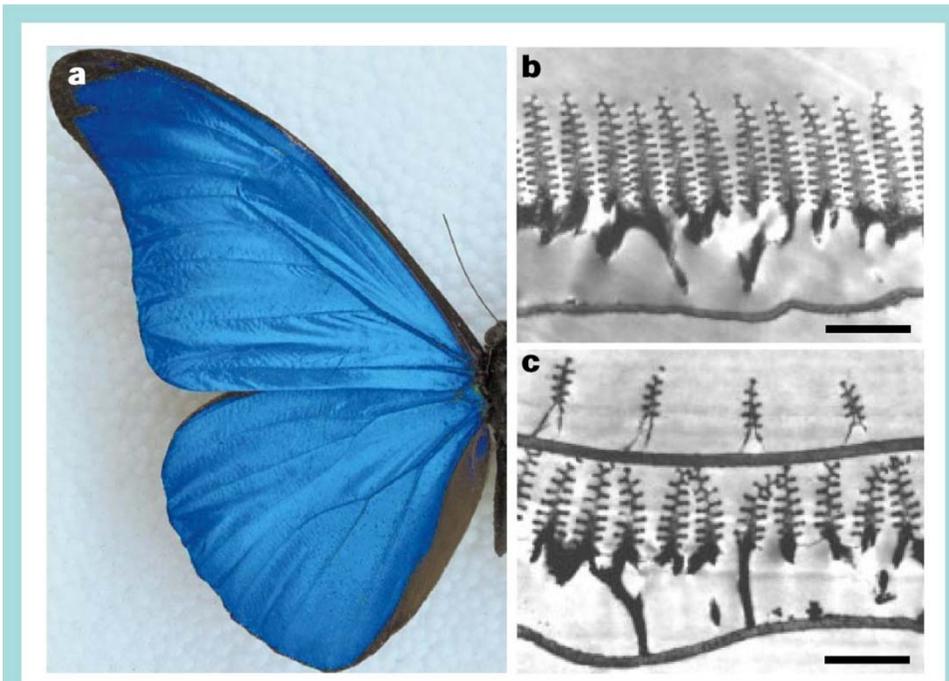


Figure 3 Iridescence in the butterfly *Morpho rhetenor*. **a**, Real colour image of the blue iridescence from a *M. rhetenor* wing. **b**, Transmission electron micrograph (TEM) images showing wing-scale cross-sections of *M. rhetenor*. **c**, TEM images of a wing-scale cross-section of the related species *M. didius* reveal its discretely configured multilayers. The high occupancy and high layer number of *M. rhetenor* in **b** creates an intense reflectivity that contrasts with the more diffusely coloured appearance of *M. didius*, in which an overlying second layer of scales effects strong diffraction⁴. Bars, **a**, 1 cm; **b**, 1.8 μm ; **c**, 1.3 μm .

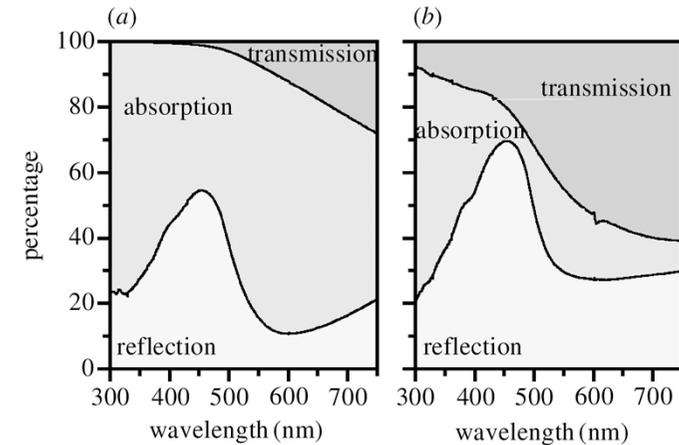


Figure 2. Percentages of transmission, absorption and reflection for the wings of (a) *Morpho didius* and (b) *Morpho sulkowskyi* measured by a spectrophotometer equipped with an integrated sphere.

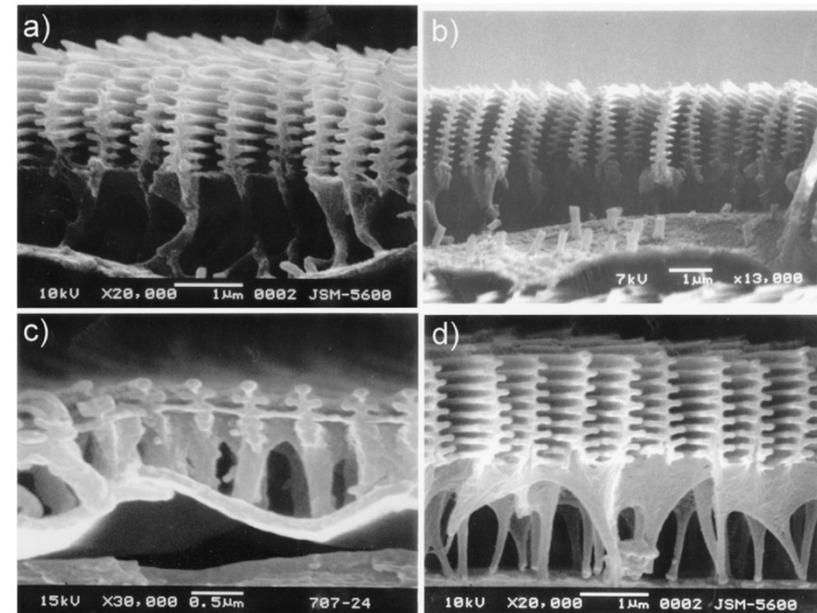
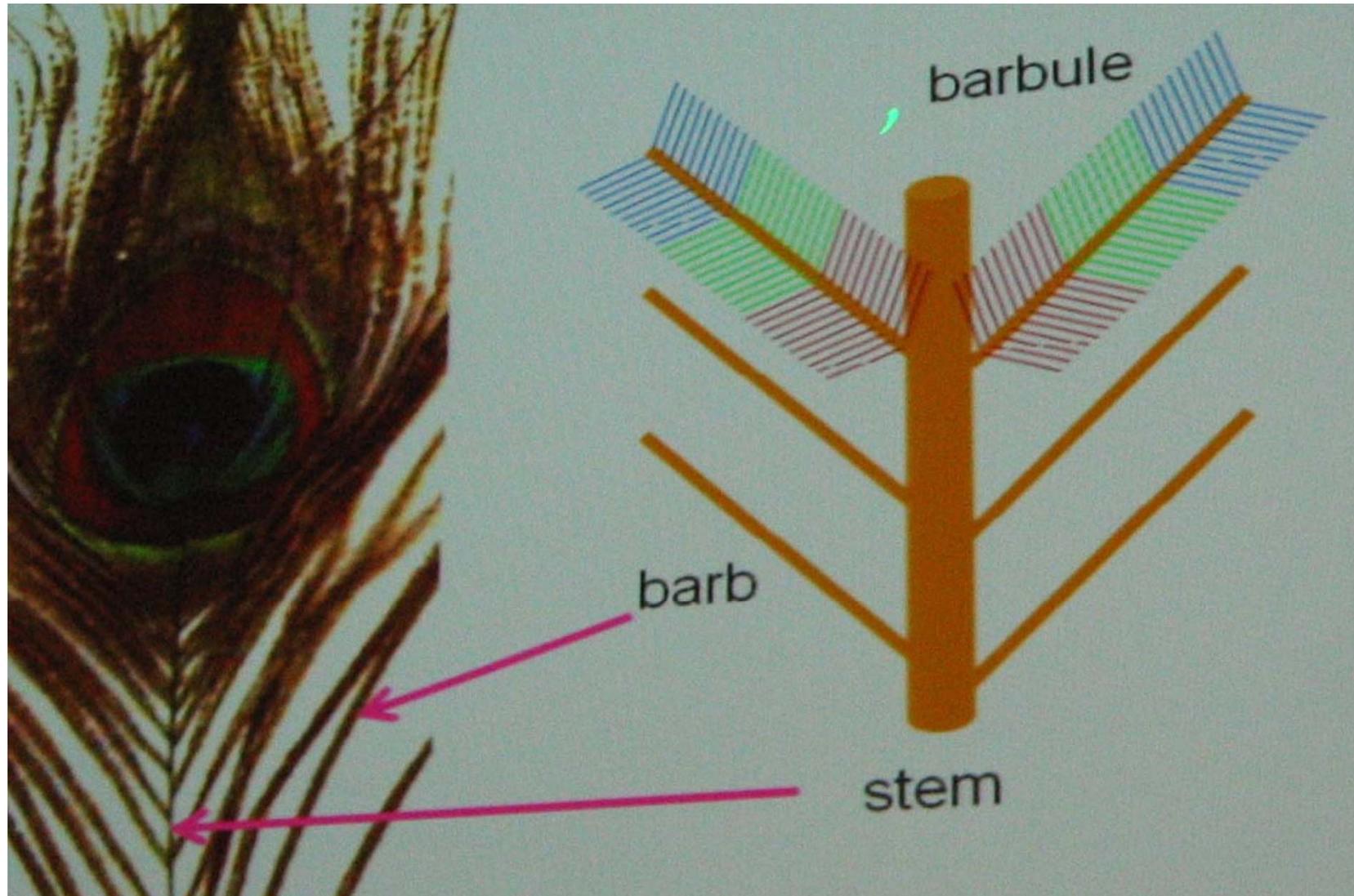


Fig. 3. Scanning electron microscope images of the cross sections of the iridescent scales of *Morpho* butterflies: (a) a ground scale of *M. didius*, (b) a scale of *M. rhetenor*, (c) a cover scale of *M. adonis* and (d) a scale of *M. sulkowskyi*.



Перо павлина

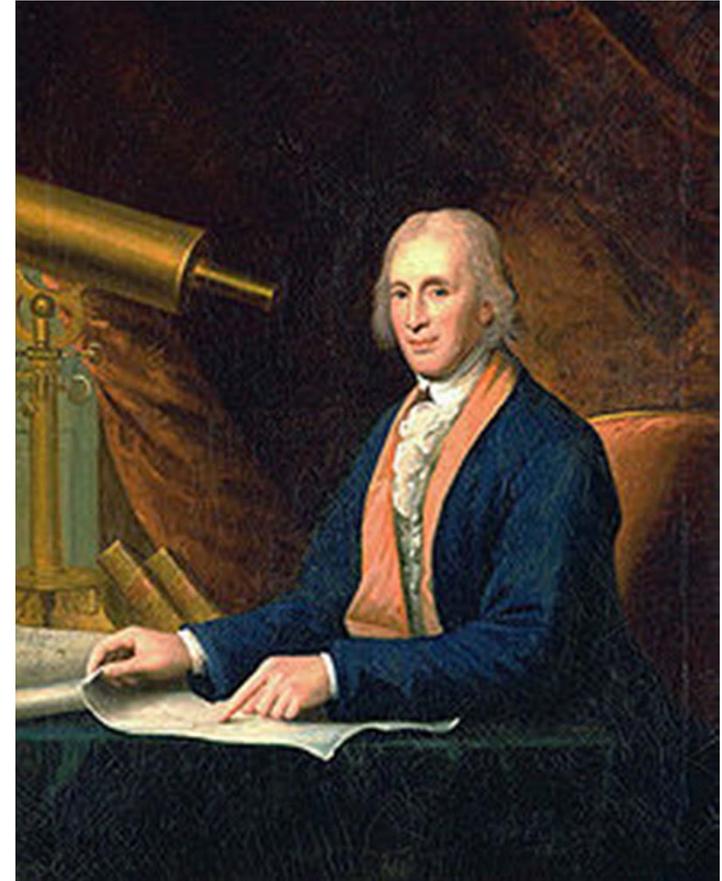


Дифракционная решетка

David Rittenhouse 1786

"An optical problem, proposed by Mr. Hopkinson, and solved by Mr. Rittenhouse", Transactions of the American Philosophical Society, vol. 2, pages 201-206 (1786).

И.Д.Багбая, «К истории дифракционной решетки», УФН 108, 337 (1972)



*An Optical Problem, proposed by Mr. HOPKINSON,
and solved by Mr. RITTENHOUSE.*

Philadelphia, March 16th, 1785.

DEAR SIR,

Read Feb.
17, 1786.

I TAKE the liberty of requesting your attention to the following problem in *optics*. It is I believe entirely new, and the solution will afford amusement to you and instruction to me.

Setting at my door one evening last summer, I took a silk handkerchief out of my pocket, and stretching a portion of it tight between my two hands, I held it up before my face and viewed, through the handkerchief, one of the street lamps which was about one hundred yards distant; expecting to see the threads of the handkerchief much magnified. Agreeably to my expectation I observed the silk threads magnified to the size of very coarse wires; but was much surpris'd to find that, although I moved the handkerchief to the right and left before my eyes, the dark bars did not seem to move at all, but remained permanent before the eye. If the dark bars were occasioned by the interposition of the magnified threads between the eye and the flame of the lamp, I should have supposed that they would move and succeed each other, as the threads were made to move and pass in succession before the eye; but the fact was otherwise.



The Answer, by Mr. RITTENHOUSE.

DEAR SIR,

THE experiment you mention, with a silk handkerchief and the distant flame of a lamp, is much more curious than one would at first imagine. For the object

By pursuing these experiments it is probable that new and interesting discoveries may be made, respecting the properties of this wonderful substance, light, which animates all nature in the eyes of man, and perhaps above all things disposes him to acknowledge the Creator's bounty. But want of leisure obliges me to quit the subject for the present.

I am, dear sir, your affectionate friend,
And very humble servant,

DAVID RITTENHOUSE.



термин **Фотонный кристалл** для среды с пространственно-периодической диэлектрической проницаемостью был предложен Э. Яблоновичем в 1991

Eli Yablonovich

“Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics”

Phys. Rev. Lett. **58**, 2059-2087 (1987)

S. John

“Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices”

Phys. Rev. Lett. **58**, 2486-2489 (1987)

В.П. Быков

«Спонтанное излучение в периодической системе»

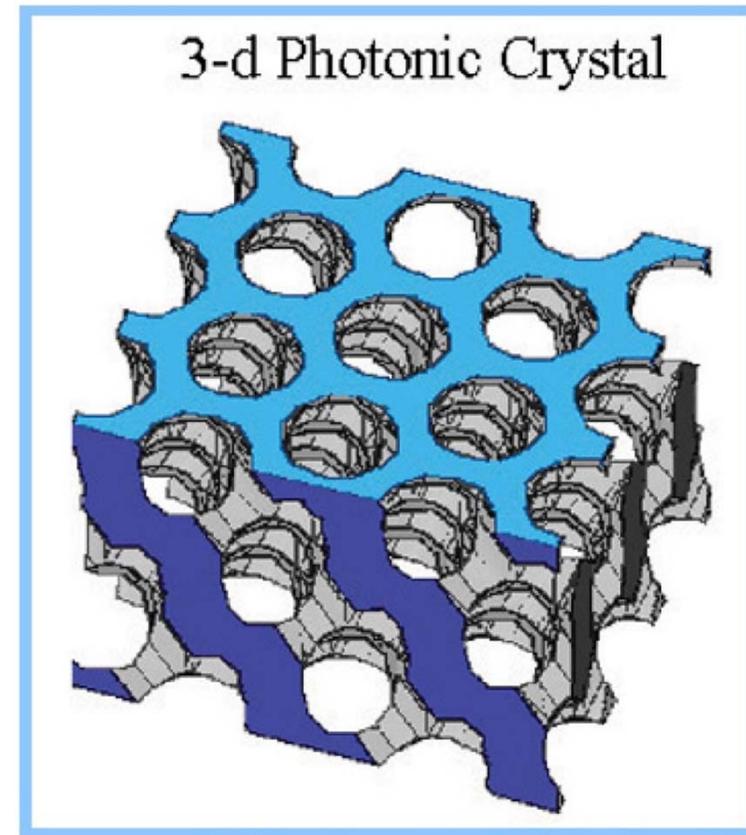
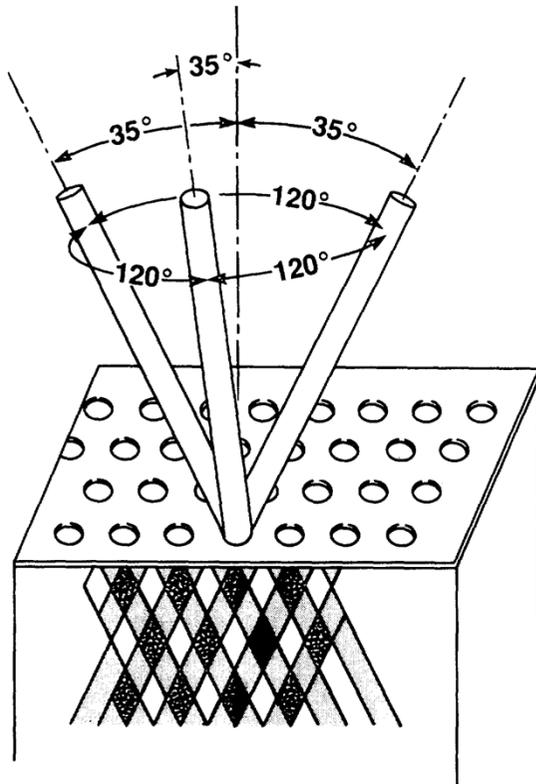
ЖЭТФ **62**, 505(1972)



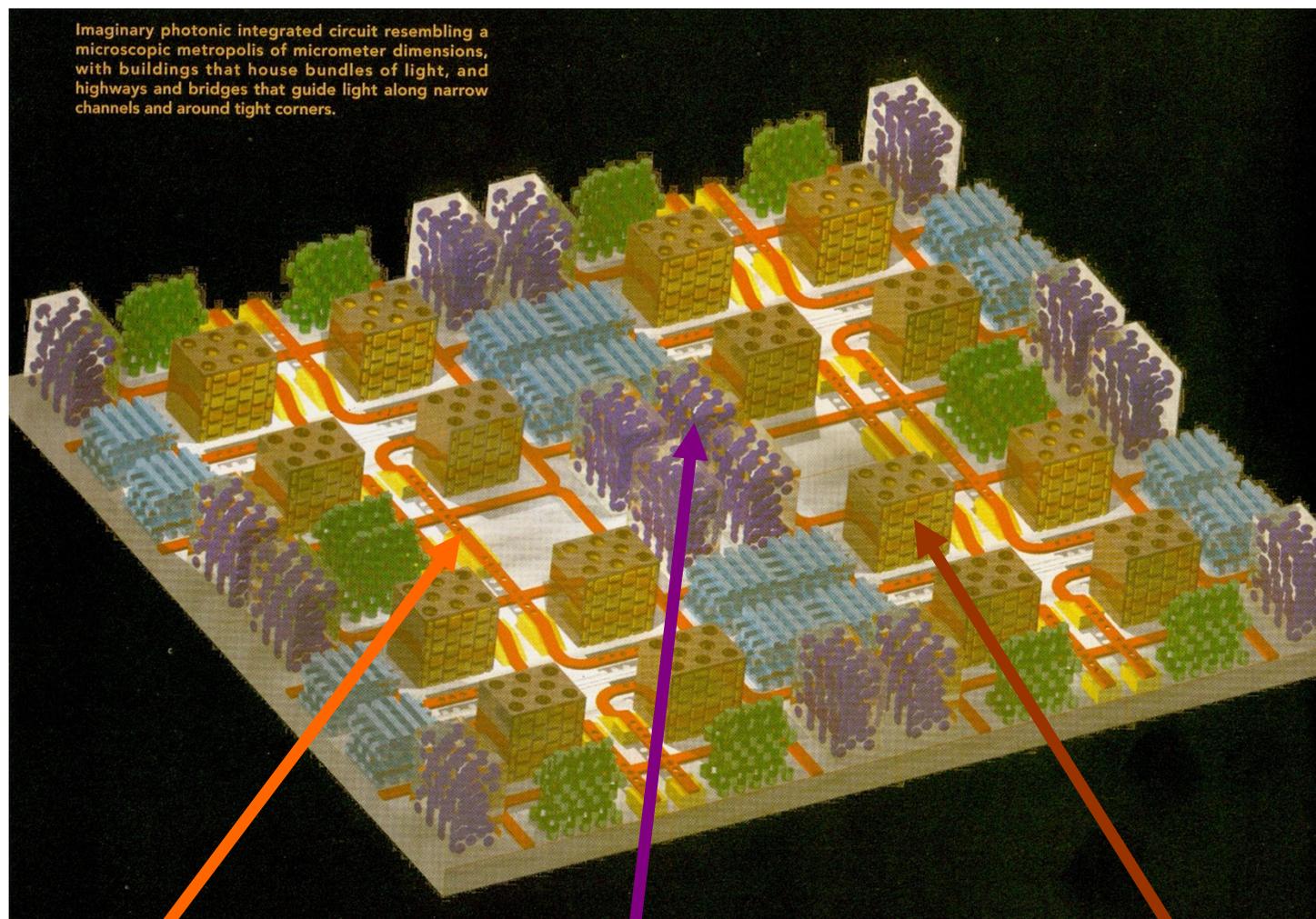
Яблоновит

Первый фотонный кристалл с перекрывающимися щелями для обеих поляризаций в СВЧ диапазоне ($\lambda \sim 2$ см) был изготовлен из керамики при помощи дрели

E. Yablonovitch, T. J. Gmitter and K. M. Leung, PRL 67, 2295 (1991)



Воображаемая интегральная оптическая схема с фотонными кристаллами



1D разветвитель

3D волновод

3D зеркало



Поляритонные фотонные кристаллы: Взаимодействующие электронные и фотонные резонансы

Экситон-поляритоны в фотонных кристаллах из
полупроводниковых квантовых ям
Ivchenko et al, 1994; Kochereshko et al, 1994

Плазмон-поляритонные фотонные кристаллы с
наноструктурированными металлами
Ebbesen et al, 1998; Linden et al, 2001; Christ et al, 2003
Teperik et al, 2006

Метаматериалы – короткопериодические плазмон-поляритонные
кристаллы с контролируемым электромагнитным откликом
Pendry 2000; Smith et al 2000; Podolskiy, Sarychev, Shalaev 2003; Zhang et al
2005; Pendry et al 2006, Shalaev 2007, Liu & Giessen 2008-2012

**Сильные магнито-оптические эффекты в плазмон-поляритонных
фотонных кристаллах и метаматериалах**
Belotelov et al, 2007, 2012



Плазмоны:

поверхностные

и

локализованные (размер $\ll \lambda$)

Drude 1900

Wood 1902

Fano 1941

Richie 1968

Lorenz 1890

Hertz 1892

Rayleigh 1897

Maxwell Garnett 1904

Mie 1908

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2(\omega)}$$

Аномалии в спектрах металлических дифракционных решеток
Нанофотолитография с субдлинноволновым разрешением
Металло-диэлектрические **плазмон-поляритонные фотонные кристаллы и метаматериалы**



Плазмоны:

поверхностные

и

локализованные (размер $\ll \lambda$)

Drude 1900

Wood 1902

Fano 1941

Richie 1968

Lorenz 1890

Hertz 1892

Rayleigh 1897

Maxwell Garnett 1904

Mie 1908

$$\frac{E_{\alpha,\text{in}}}{E_{\alpha,\text{out}}} = \frac{1}{1 + N_{\alpha}[(\varepsilon_{\text{in}}(\omega))/\varepsilon_{\text{out}} - 1]}$$

$$\frac{\varepsilon_{\text{in}}(\omega)}{\varepsilon_{\text{out}}} = 1 - N_{\alpha}^{-1} = \begin{cases} -2, & \text{сфера} \\ -1, & \text{цилиндр} \end{cases}$$

Цветные стекла, витражи

Гигантское комбинационное рассеяние

Управление фотолюминесценцией, наноантенны

Спектроскопия отдельных молекул, включая биологические

Сканирующая ближнеполевая микроскопия и нанофотолитография с субдлинноволновым разрешением

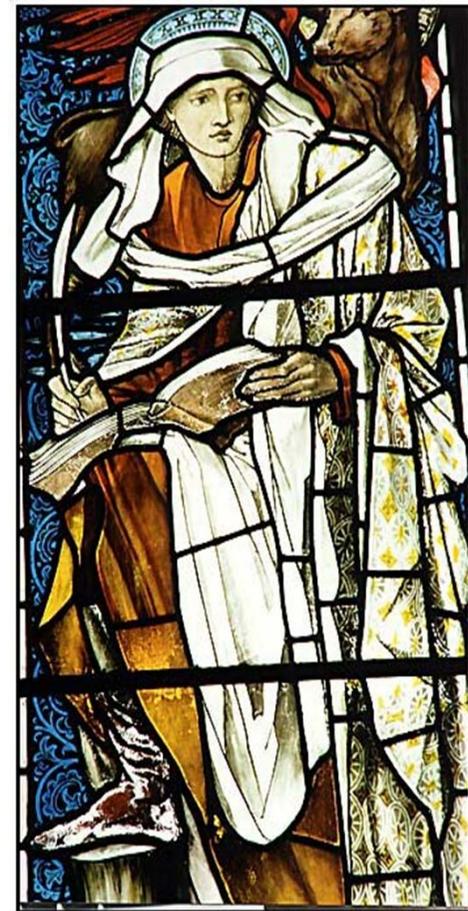
Металло-диэлектрические плазмон-поляритонные фотонные кристаллы и метаматериалы



Основные принципы наноплазмоники использовались человечеством и были известны очень давно. Однако с развитием нанотехнологий возникли качественно новые и интересные возможности.



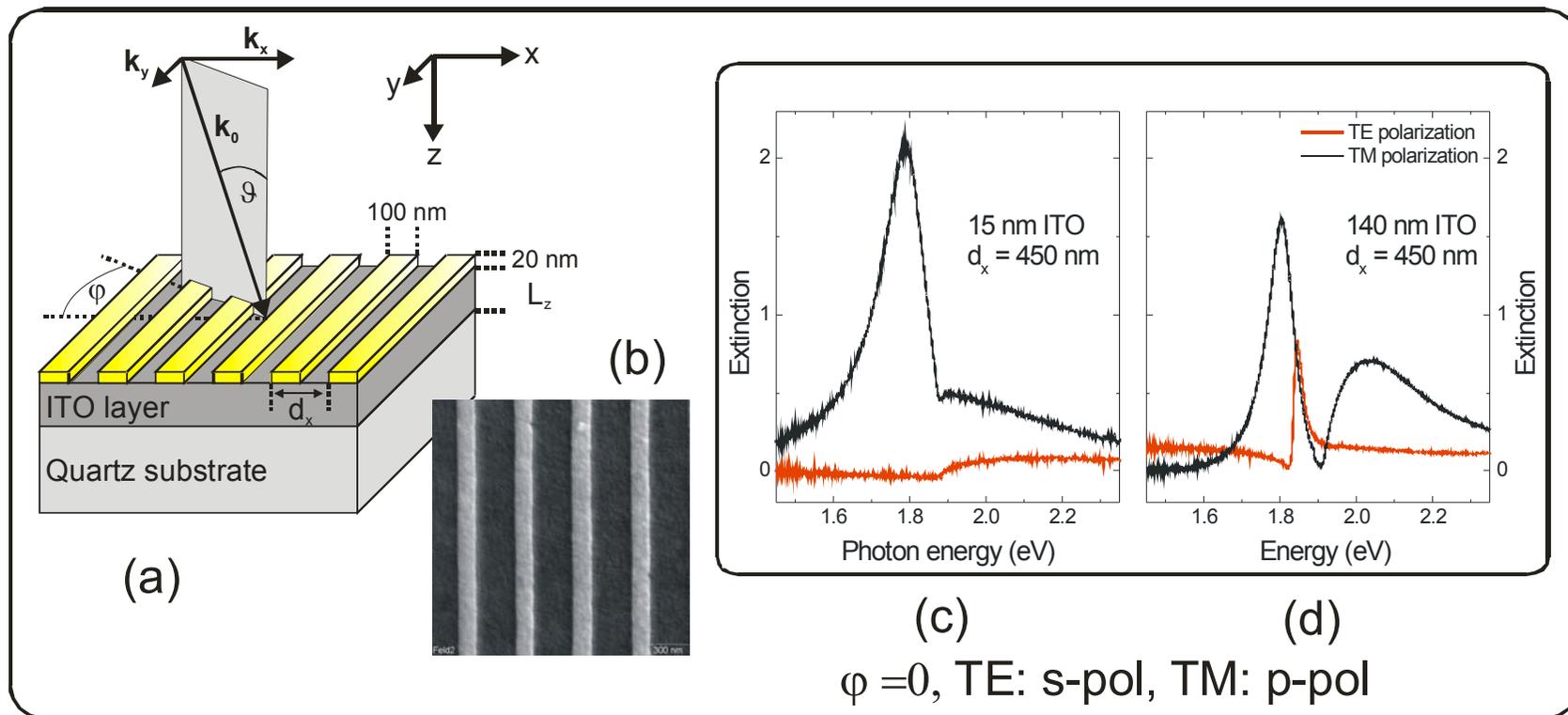
Кубок Ликурга — предположительно александрийской работы IV века н. э. Экспонируется в Британском музее.



1. Фотонные и поляритонные кристаллы, наноплазмоника
2. **Пример: решетка металлических нанонитей с плазмон-поляритонами**
3. Методы расчета
4. Метаматериалы
5. Линза Веселаго для распространяющихся волн
6. Пендри: «Преодоление дифракционного предела разрешения» в дальней волновой зоне
7. Эффективный электромагнитный отклик метаматериалов, пространственная нелокальность
8. Киральные метаматериалы



1D решетка из золотых нанонитей на поверхности диэлектрического волновода



Схематический вид (a), реальная структура (b), спектр потерь $(-\ln t)$ в структуре с волноводными модами (c) и без них (d)

A. Christ, S. G. Tikhodeev, N. A. Gippius, J. Kuhl, and H. Gissen, *PRL* **91**, 183901, (2003), *PRB* **70**, 125113 (2004); T. Zentgraf, A. Christ, J. Kuhl, S. G. Tikhodeev, N. A. Gippius, and H. Gissen, *PRB* **73** 115103 (2006)

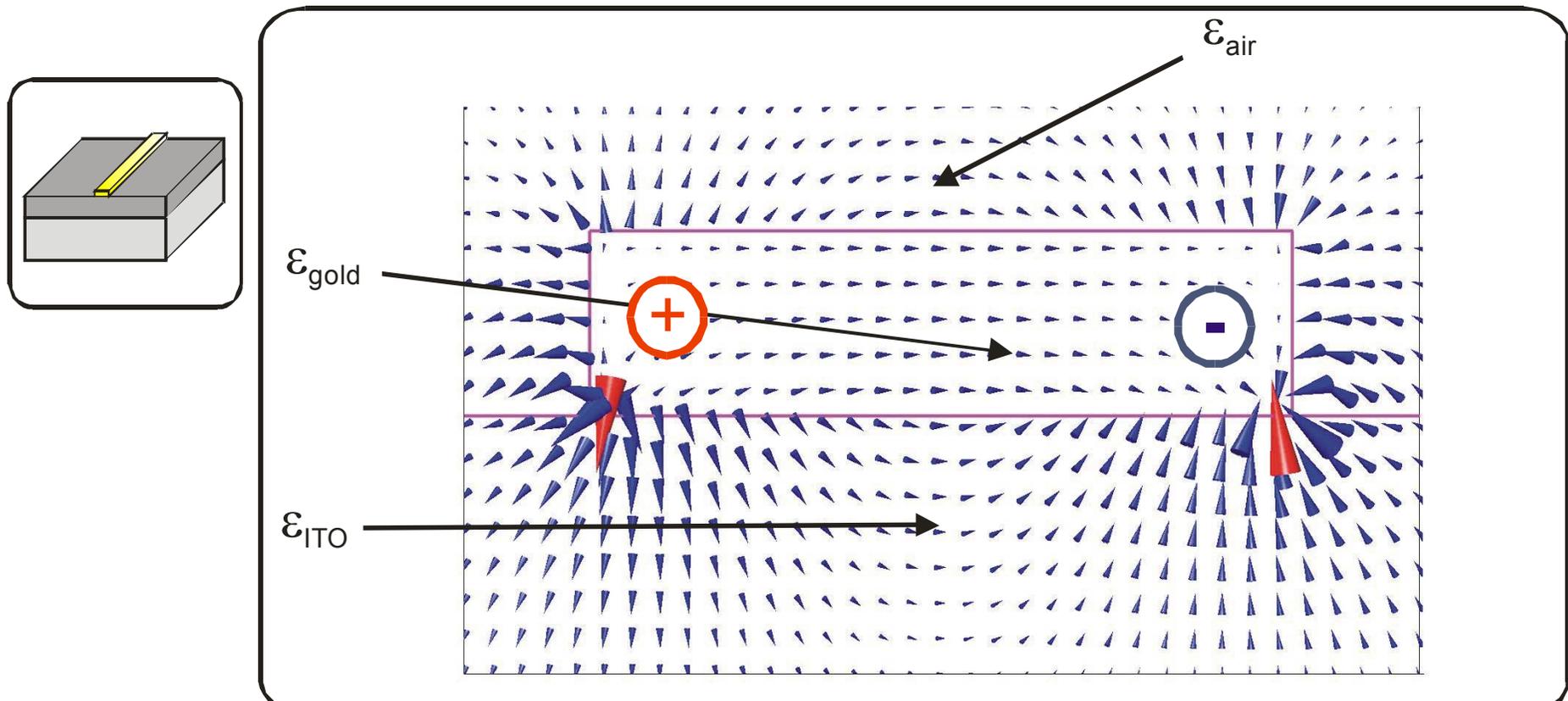
Если волновод или решетка сделаны из ферромагнетика, возникают интересные возможности для магнитооптики V. I. Belotelov et al, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 077401 (2007)



Локализованный плазмон в нанонити : дипольный резонанс

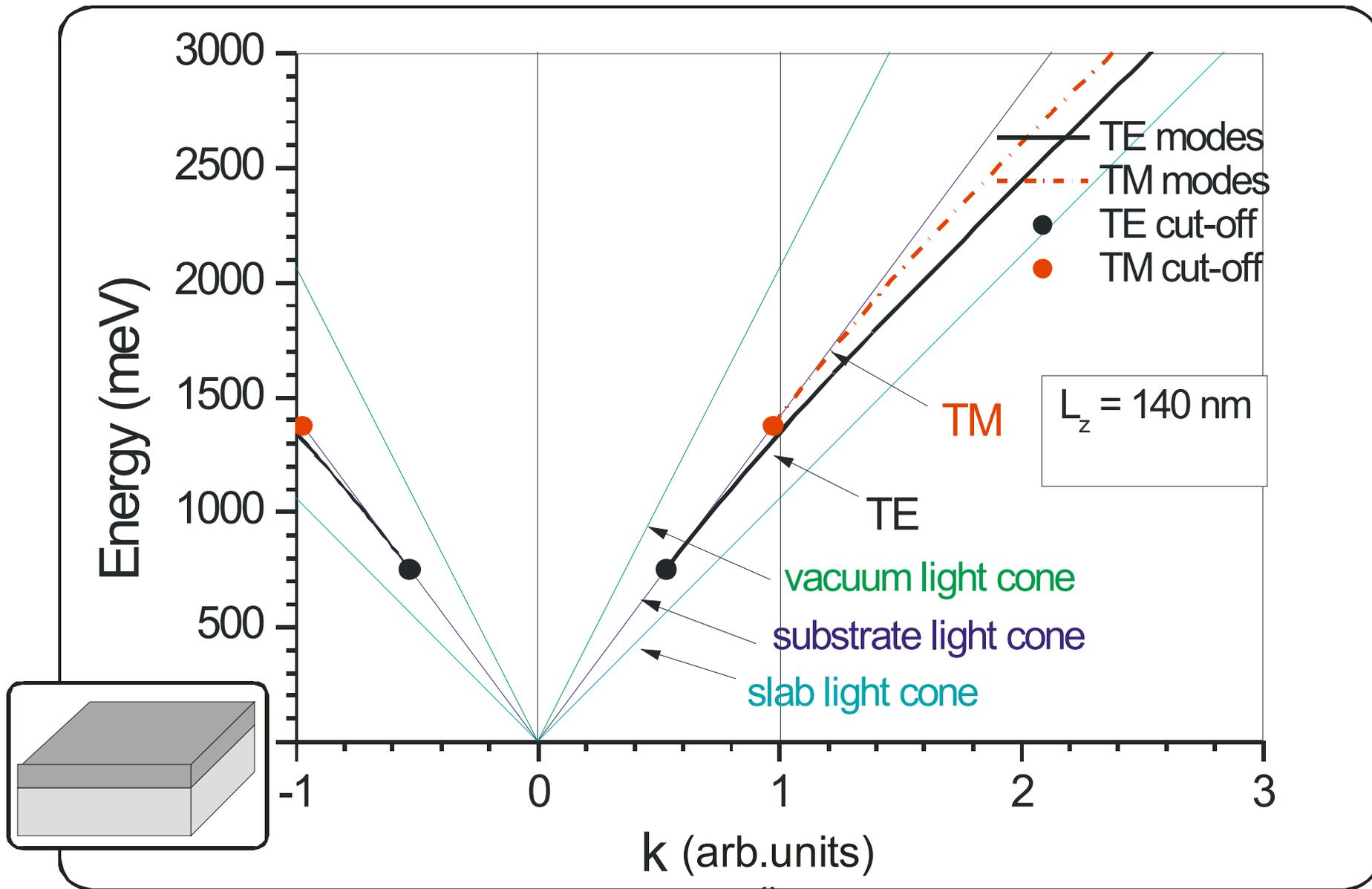
(Электрическое поле перпендикулярно нити)

Резонансная частота зависит от формы сечения и диэлектрического окружения

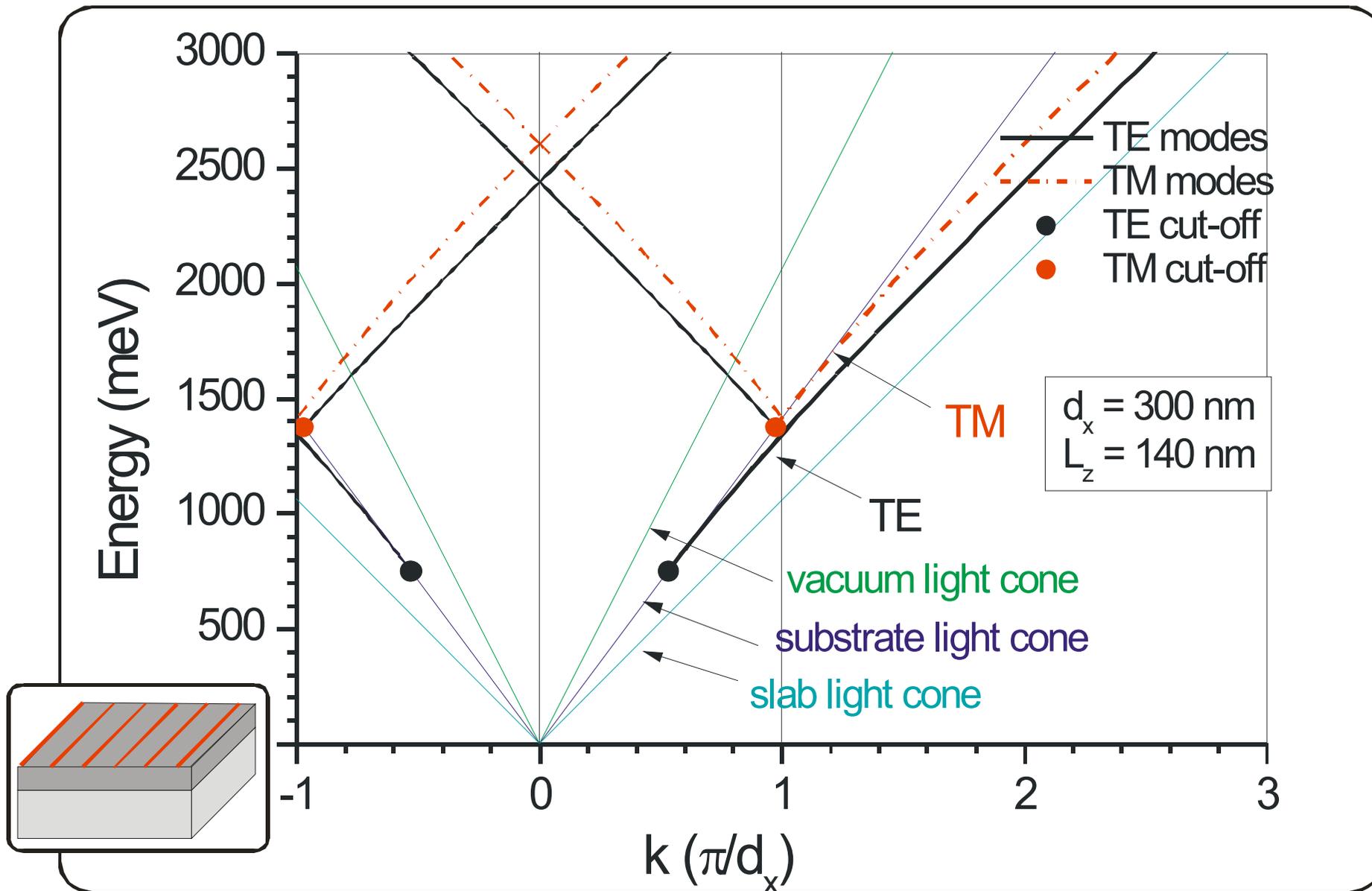


Электрическое поле внутри диэлектрического эллипсоида модифицируется $F_{\alpha}(\omega) \equiv \frac{E_{\alpha,\text{in}}}{E_{\alpha,\text{out}}} = \frac{1}{1 + N_{\alpha} [(\epsilon_m(\omega)/\epsilon_{\text{out}} - 1)]}$, $\alpha = a, b, c$,



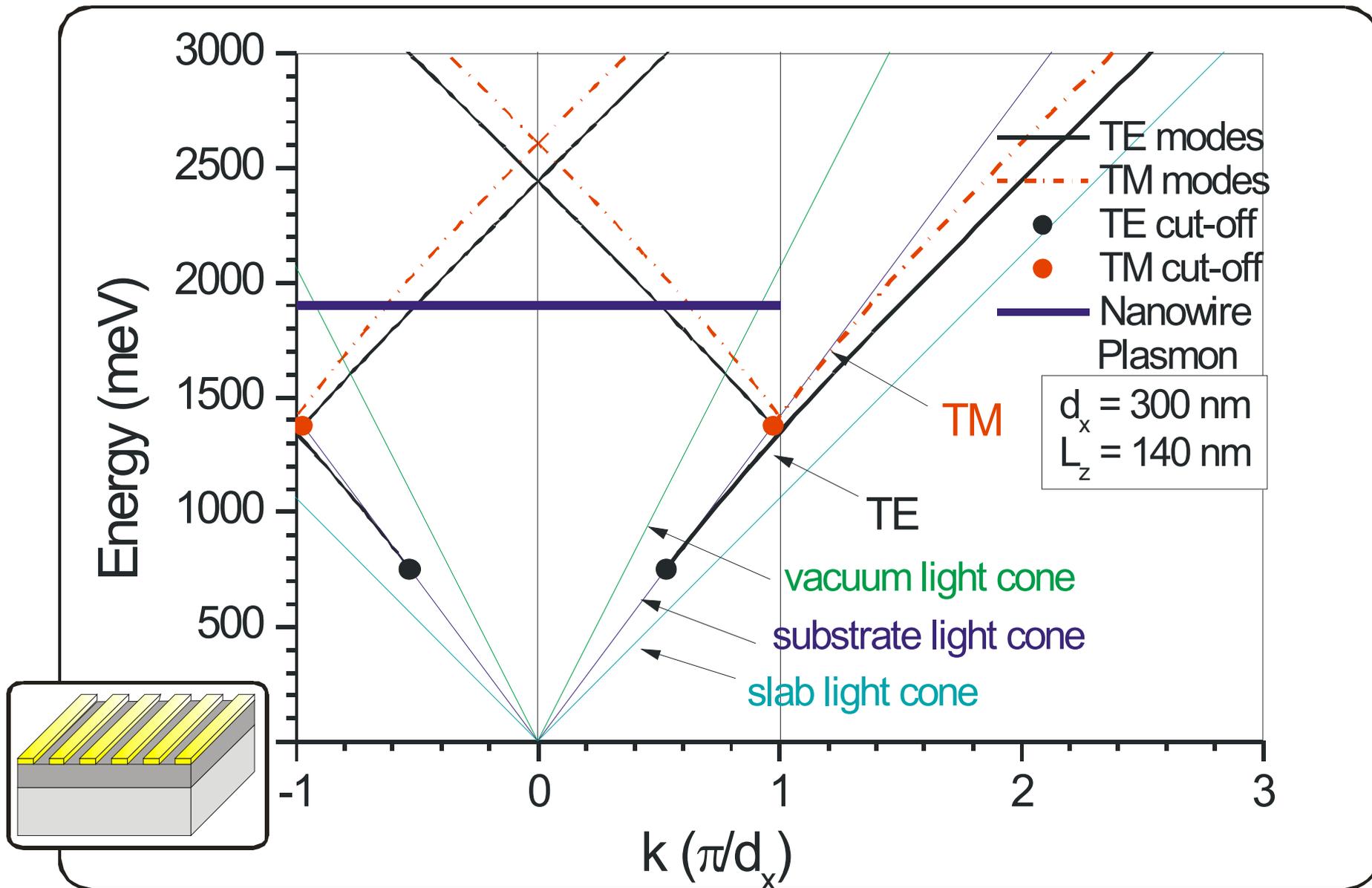


TE0 и TM0 моды в 140 нм ITO волноводе на кварце



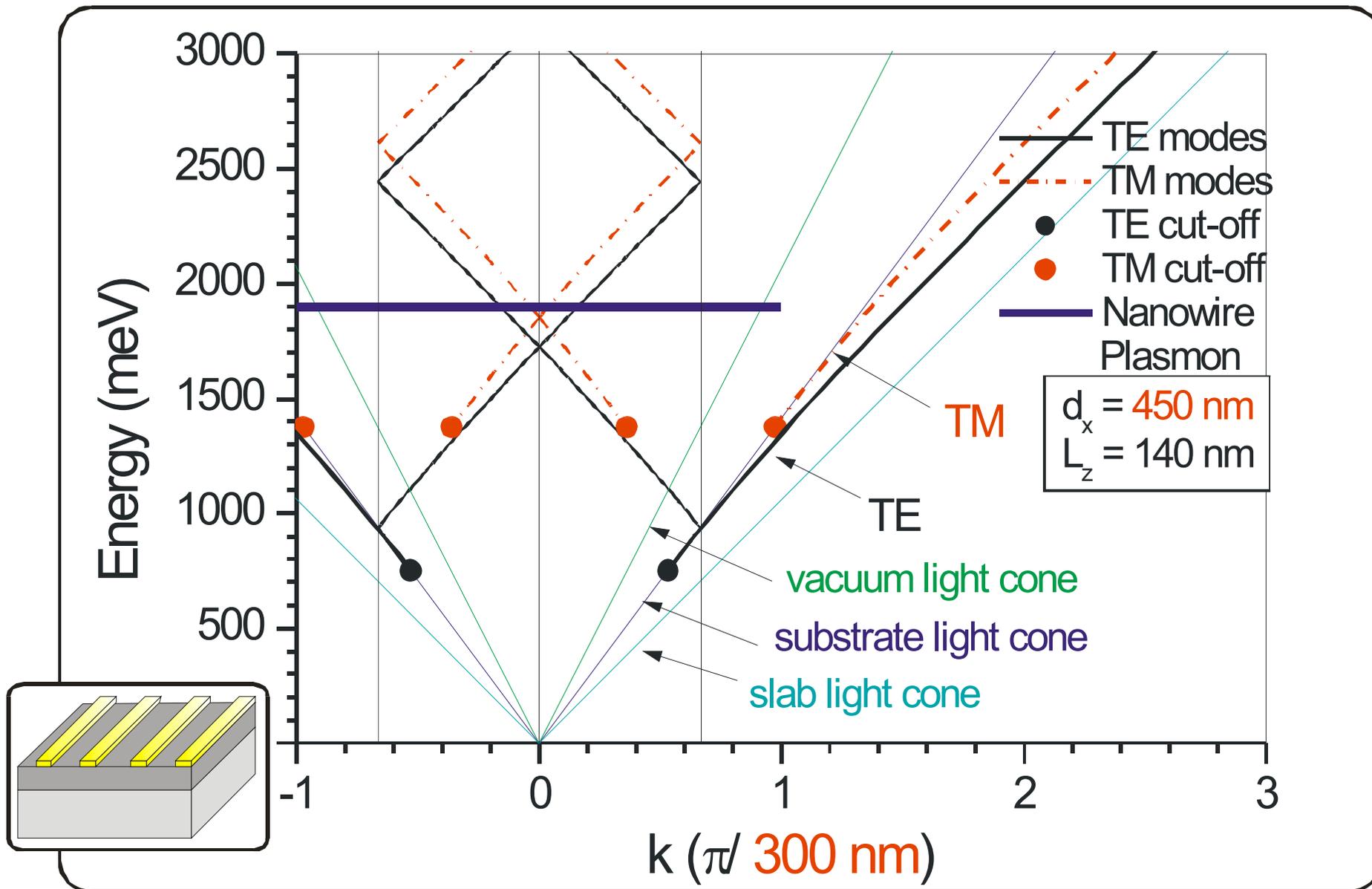
TE₀ и TM₀ моды в 140 нм ITO волноводе на кварце, свернутые в 1 зону Брюллиэна структуры с периодом 300 нм.





TE₀ и TM₀ моды в 140 нм ITO волноводе на кварце, свернутые в 1 зону Брюллиэна структуры с периодом 300 нм. Синяя линия - плазмонный резонанс в нанонити





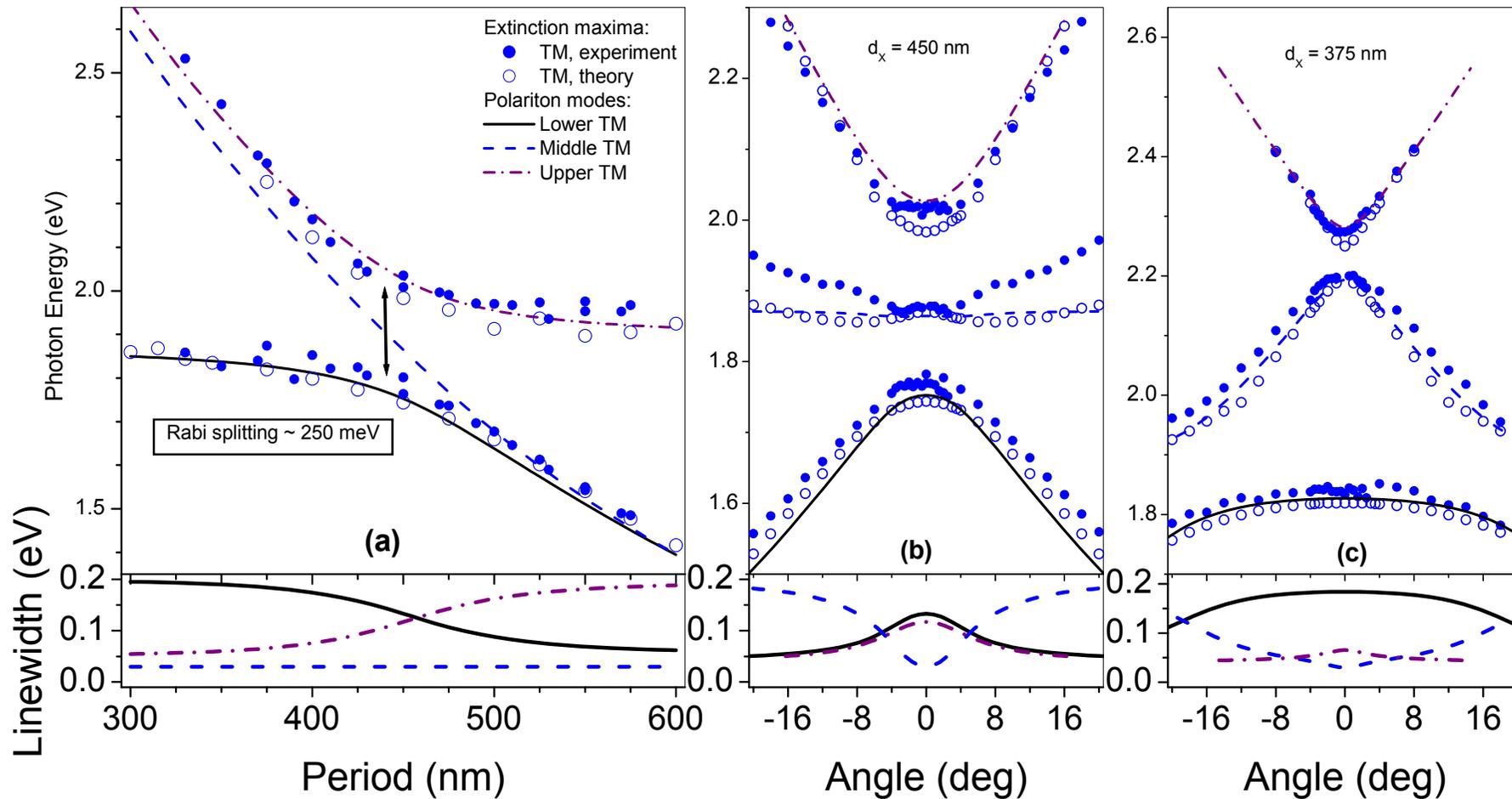
TE₀ и TM₀ моды в 140 нм ITO волноводе на кварце, свернутые в 1 зону Бреллиэна структуры с периодом 450 нм. Синяя линия - плазмонный резонанс в нанонити



Образование волноводно-плазмонного поляритона

A. Christ et al., *PRL* **91**, 183901 (2003)

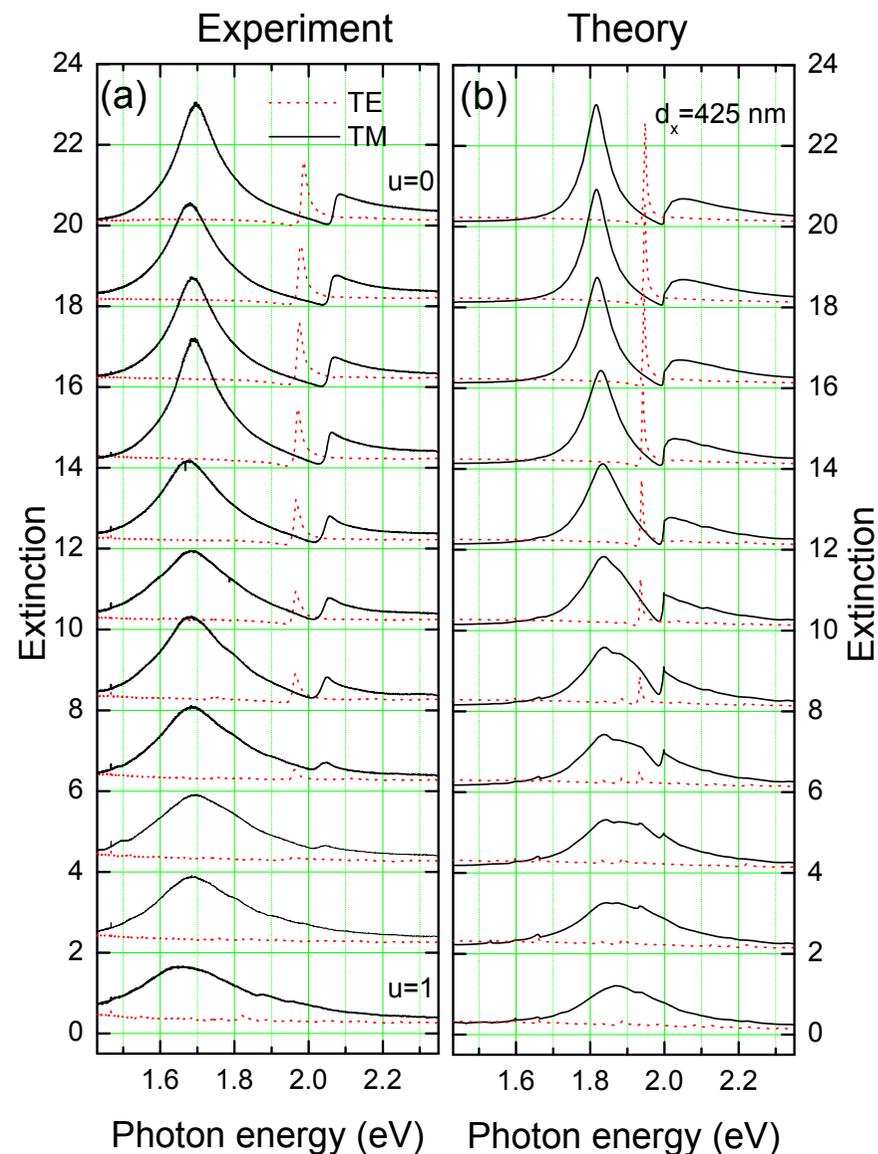
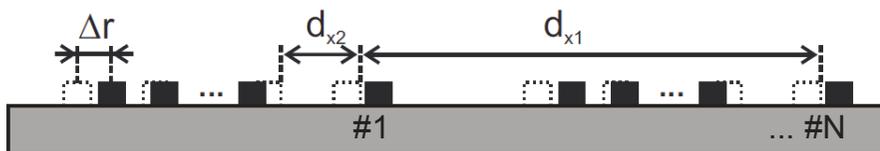
Большая величина дипольного момента локализованных плазмонов в металлических нанонитях приводит к гигантской величине частоты Раби – порядка 250 мэВ



Разрушение волноводно-плазмонного поляритона беспорядком

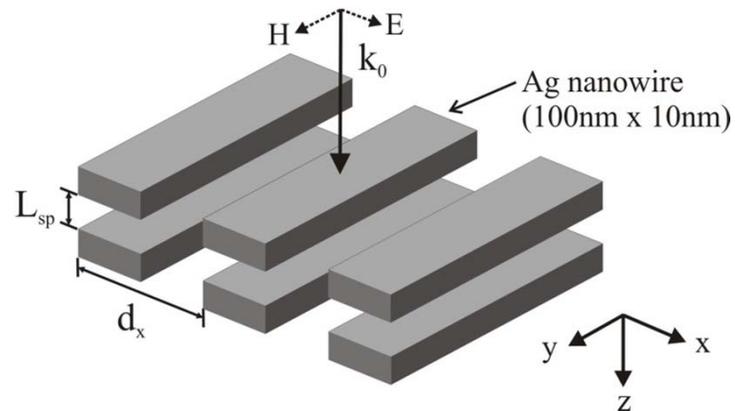
$$\Delta r_i = u d_{x2} \text{rnd}(i)$$

$$0 < \text{rnd}(i) < 0.5, 1 < i < N$$

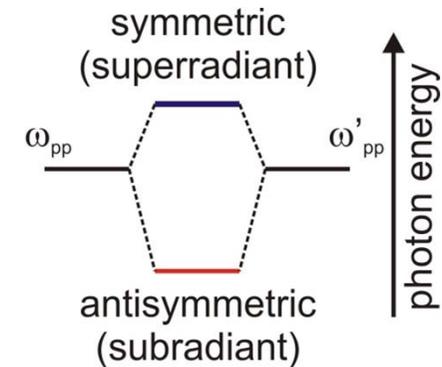


Плазмонные метаматериалы

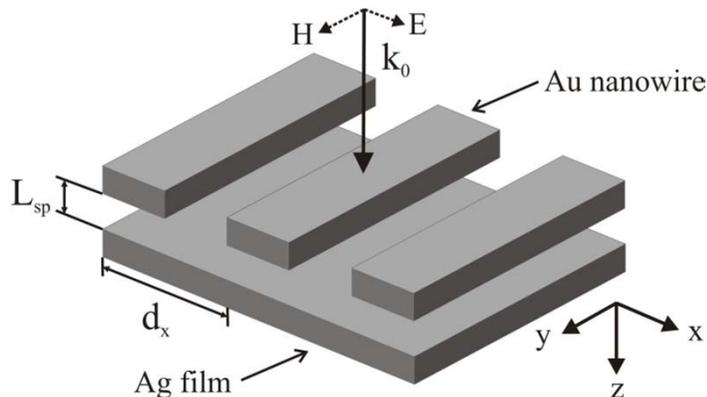
Наноструктуризация металла \Rightarrow Модификация оптического отклика (например, гигантский диамагнетизм на оптических частотах)



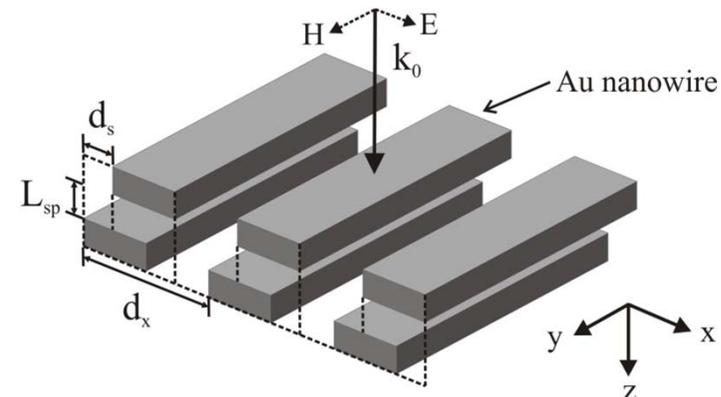
Гибридизация плазмонов



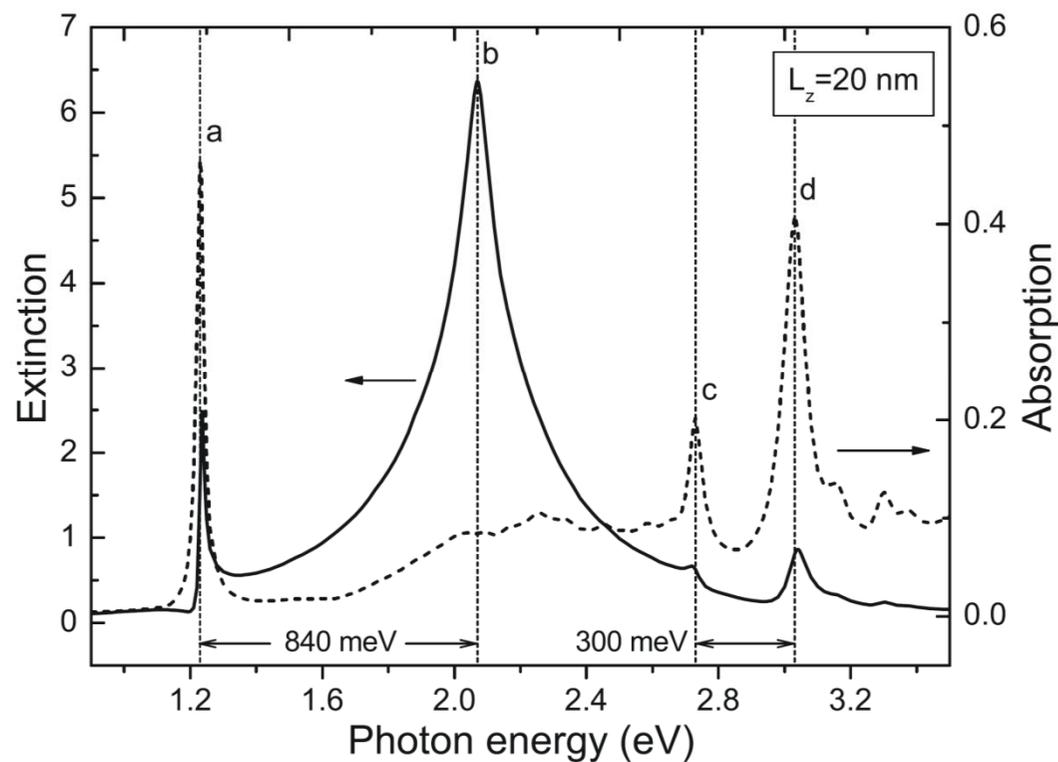
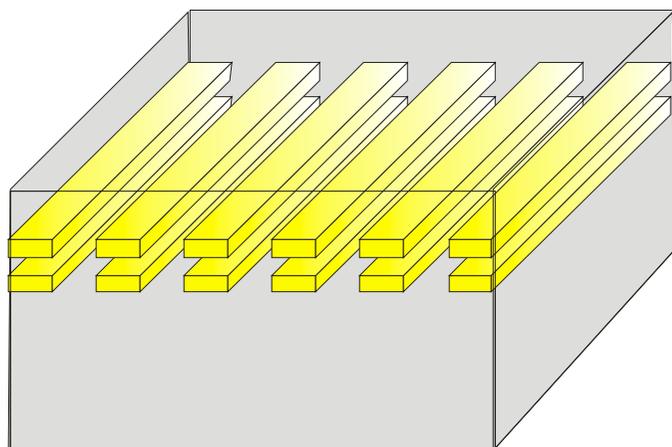
Взаимодействие с зарядами изображения



Модифицированное взаимодействие в ближнем поле



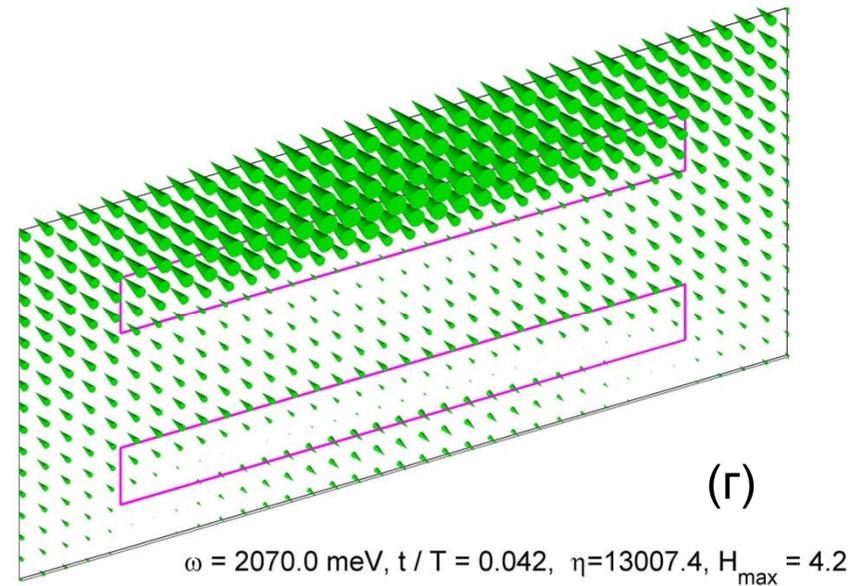
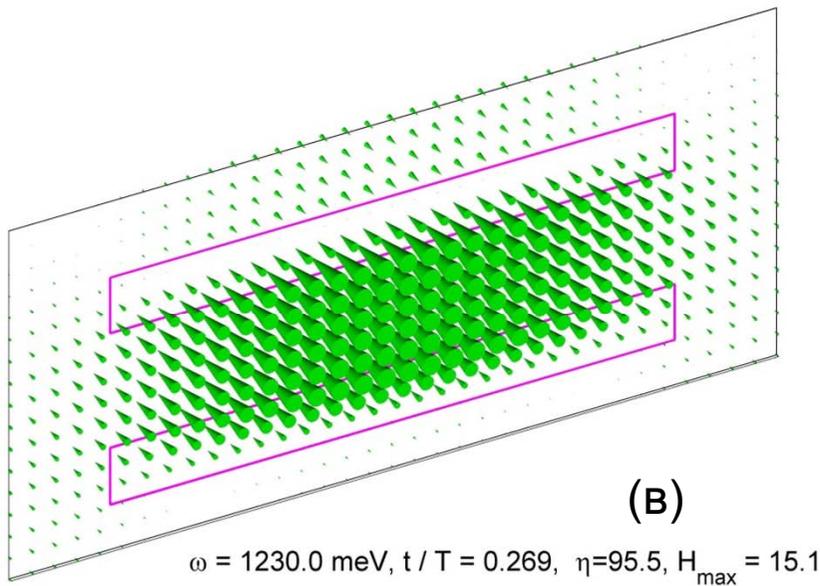
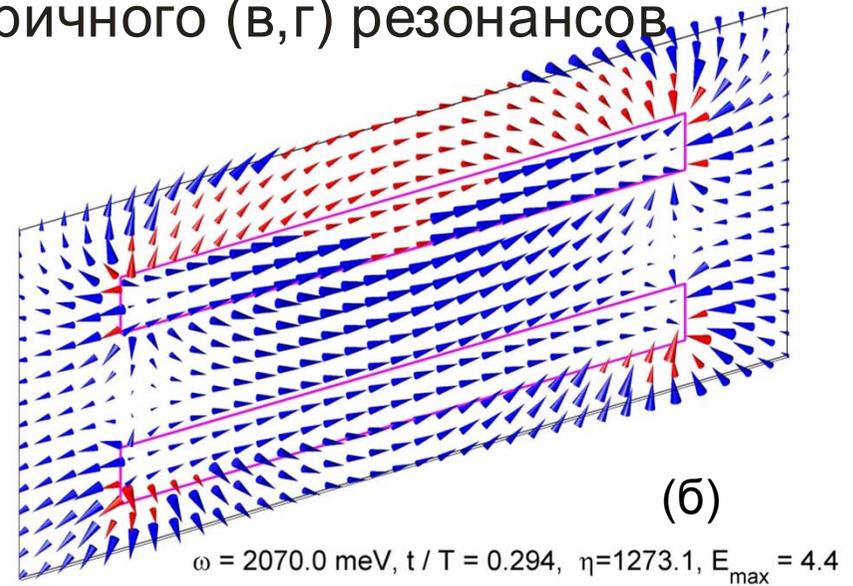
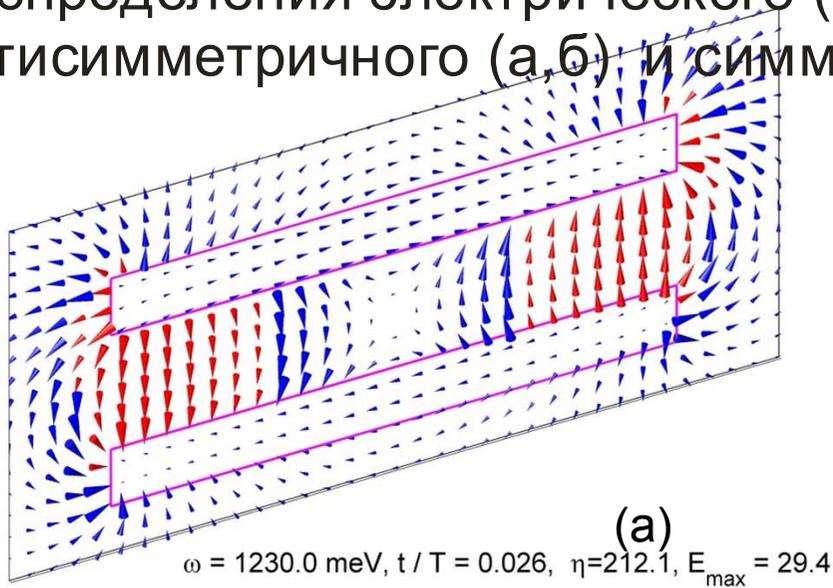
1D решетка из пар нанонитей: антисимметричные и симметричные плазмоны



Спектр потерь ($-\ln t$) и коэффициент поглощения, рассчитанные для малого расстояния между нитями (20 нм)

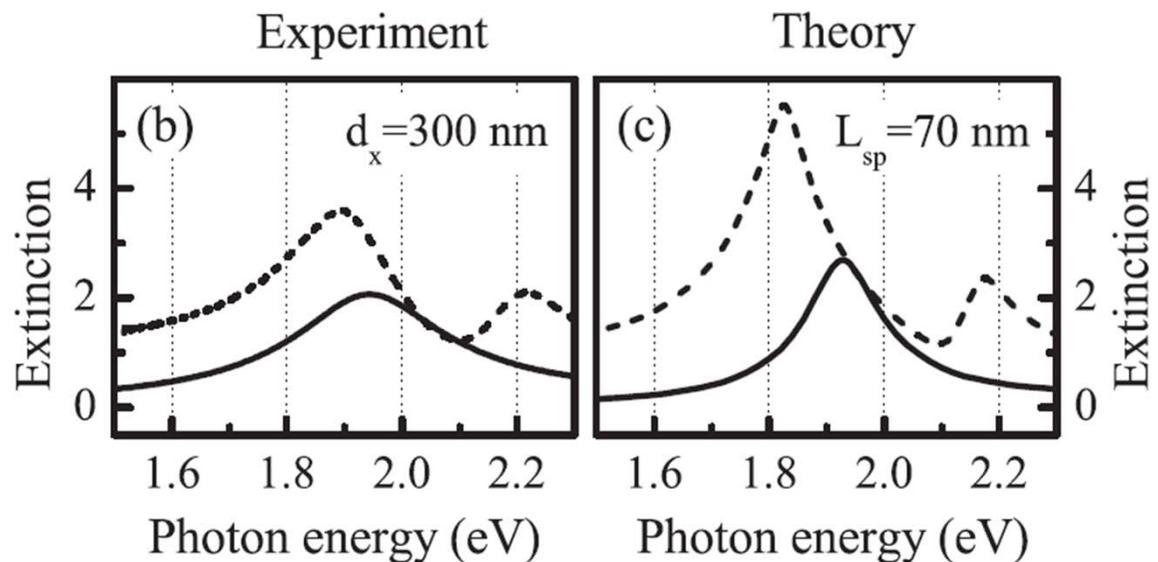
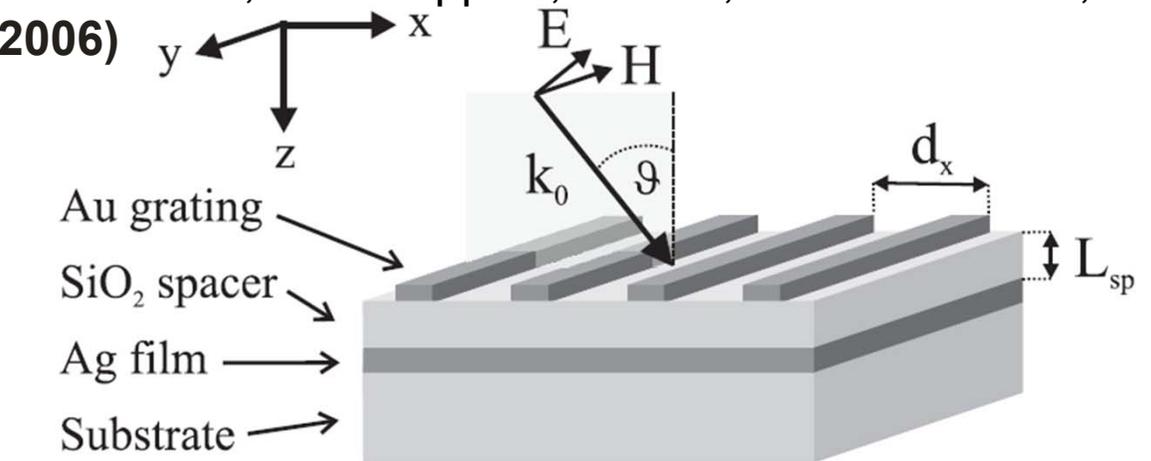


Распределения электрического (а,в) и магнитного (б,г) полей антисимметричного (а,б) и симметричного (в,г) резонансов



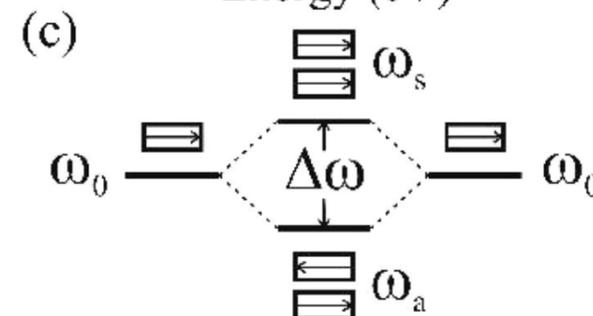
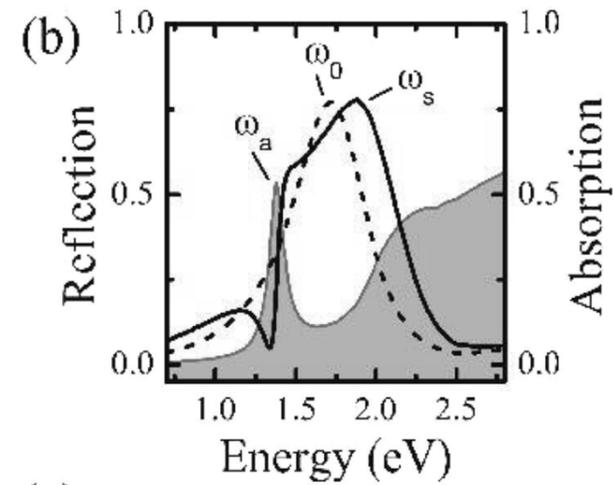
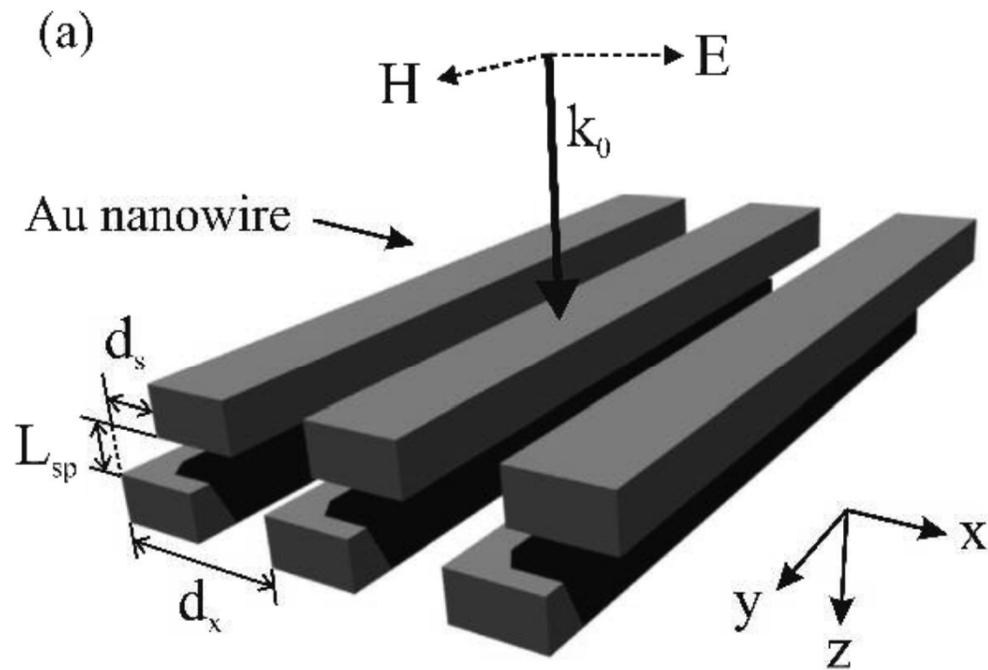
1D решетка металлических нанонитей вблизи металлической пленки: взаимодействие локализованных и распространяющихся плазмонов

A.Christ, T. Zentgraf, S. G. Tikhodeev, N. A. Gippius, J. Kuhl, and H. Giessen, *Phys.Rev. B* 74,155435 (2006)

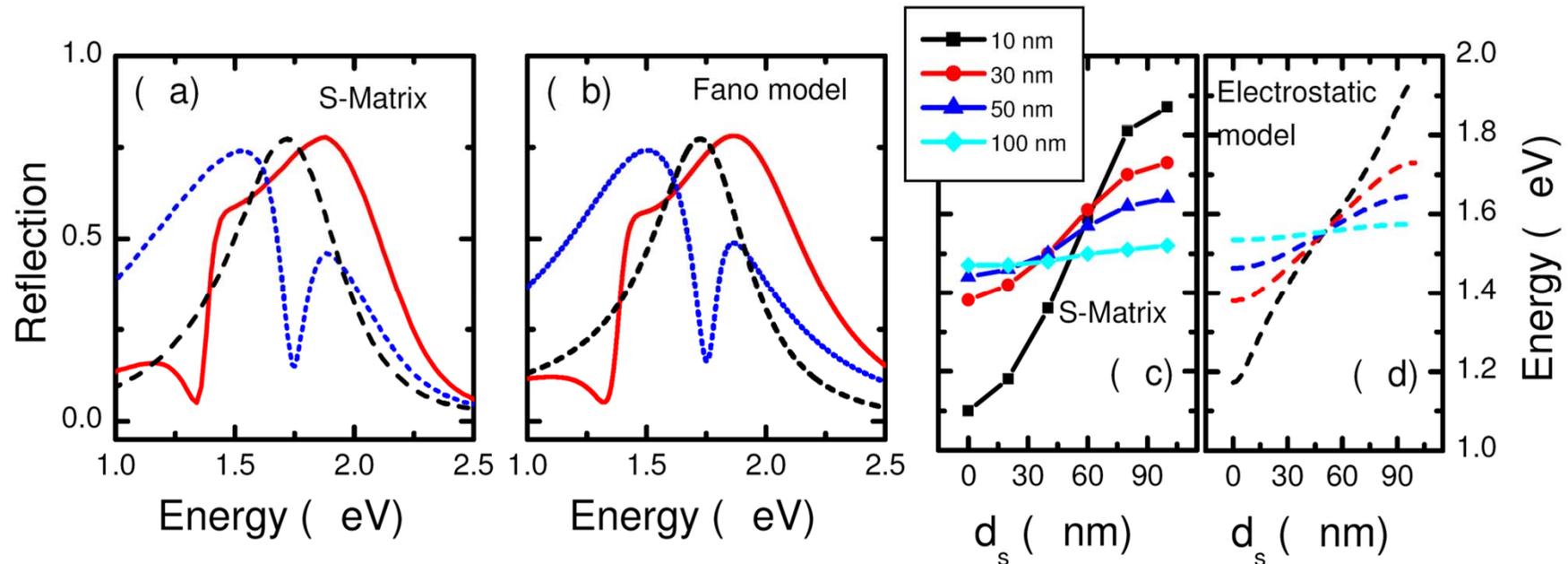


Смещенные 1D решетки металлических нанонитей: управление симметричными и асимметричными плазмонами с помощью нарушения симметрии

A.Christ, O.J.F.Martin, Y. Ekinici, N. A. Gippius, and S. G. Tikhodeev, *Nano Lett* 8, 2171 (2008)



Смещенные 1D решетки металлических нанонитей: управление симметричными и асимметричными плазмонами с помощью нарушения симметрии



a,b: **Красная линия: нити одна над другой; Синяя линия: нити верхней решетки**

посередине между нитями нижней.

Узкий провал в спектрах отражения – асимметричная мода; широкий максимум – симметричная мода.

c,d: смещение частоты асимметричной моды при сдвиге верхней решетки по отношению к нижней, для разных расстояний по вертикали между решетками



1. Фотонные и поляритонные кристаллы, наноплазмоника
2. Пример: решетка металлических нанонитей с плазмон-поляритонами
3. Методы расчета
4. Метаматериалы
5. Линза Веселаго для распространяющихся волн
6. Пендри: «Преодоление дифракционного предела разрешения» в дальней волновой зоне
7. Эффективный электромагнитный отклик метаматериалов, пространственная нелокальность
8. Киральные метаматериалы



**Метод конечных разностей - Finite
Difference in Time Domain, FDTD**

**Метод Фурье-разложения по плоским
волнам и МАТРИЦА РАССЕЙЯНИЯ**



Фурье-разложение по плоским волнам

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}_{\mathbf{G}} \exp (ik_{x,\mathbf{G}}x + ik_{y,\mathbf{G}}y) \times \exp (iKz - i\omega t)$$

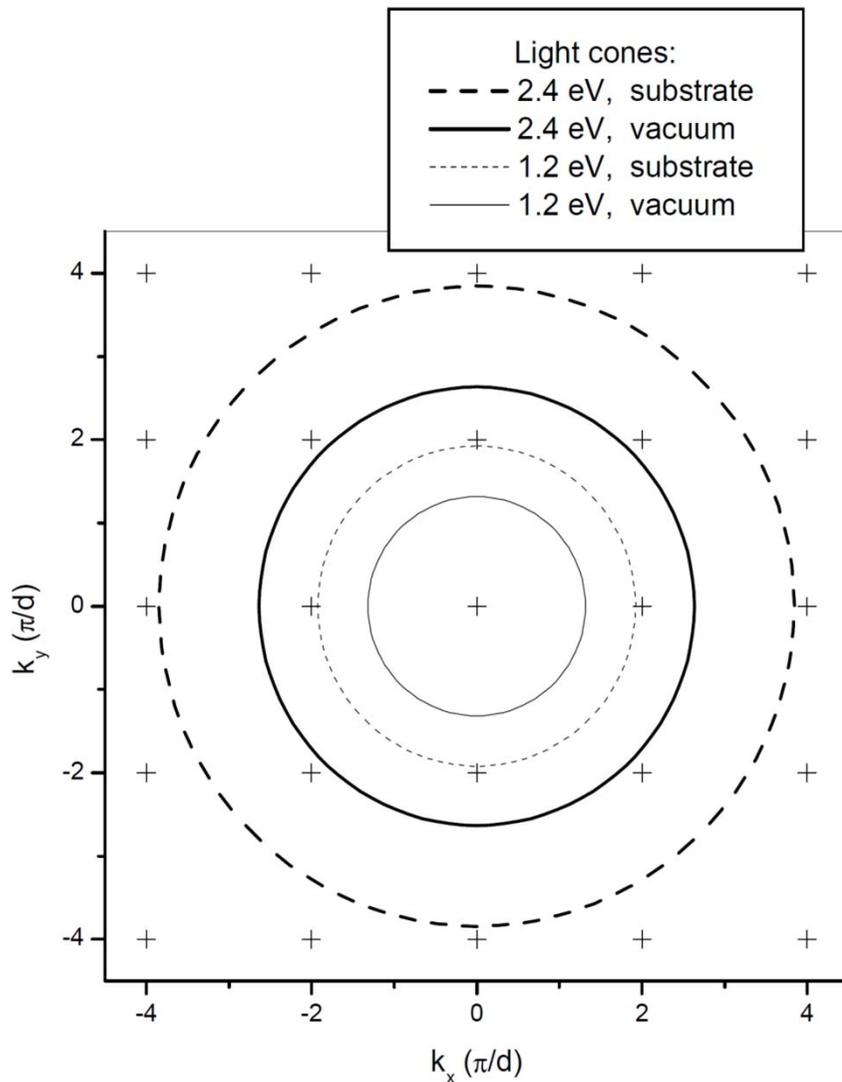
$$k_{x,\mathbf{G}} = k_x + G_x, \quad k_{y,\mathbf{G}} = k_y + G_y$$

\mathbf{G} – обратная решетка, K – волновое число в направлении поперек слоя

Для однородных полубесконечных слоев над и под фотонно-кристаллическим слоем:

$$k_{z,\mathbf{G},a} = \sqrt{\frac{\omega^2 \varepsilon_a}{c^2} - (k_x + G_x)^2 - (k_y + G_y)^2}$$





Карта обратной решетки

Окружности = сечения световых конусов на частоте падающего фотона

+ вектора обратной решетки

вектора внутри конусов отвечают распространяющимся волнам, снаружи – экспоненциальным или эванесцентным

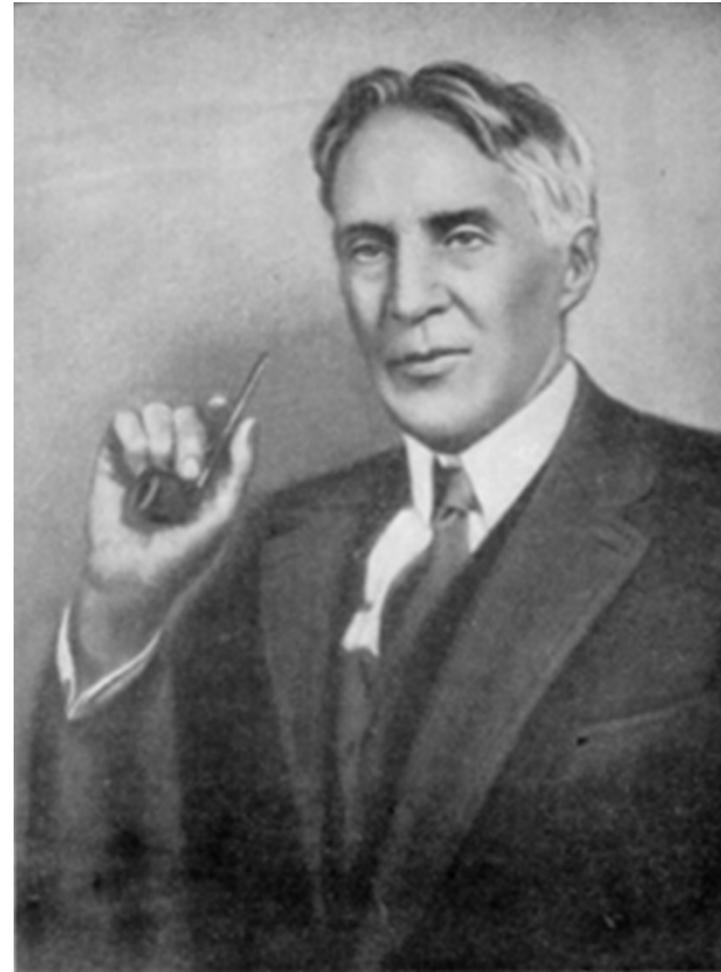
$$k_{z,\mathbf{G},a} = \sqrt{\frac{\omega^2 \varepsilon_a}{c^2} - (k_x + G_x)^2 - (k_y + G_y)^2}$$



Rittenhouse 1786
Fraunhofer 1821

Robert W. Wood, 1902
“On a Remarkable Case of
Uneven Distribution of Light
in a Diffraction Grating
Spectrum ”
Philos. Mag. 4, 396-402 (1902)

Lord Rayleigh 1907
Fano 1941
Purcell 1946
Веселаго 1967
Yablonovich 1987
Pendry 2000



Аномалии ВУДА



Robert W. Wood, 1902

“On a Remarkable Case of Uneven Distribution of Light in a Diffraction Grating Spectrum ”

Philos. Mag. 4, 396-402 (1902)

XLIII. *On a Remarkable Case of Uneven Distribution of Light in a Diffraction Grating Spectrum.* By R. W. WOOD, Professor of Experimental Physics, Johns Hopkins University*.

IT is a well-known fact that in the spectra formed by a diffraction-grating the light is unevenly distributed, that is the total light in any one spectrum will not recombine to form white light.

I have been examining a most remarkable grating recently ruled on one of the Rowland dividing-engines in which this uneven distribution is carried to a degree almost incomprehensible. If the spectra of an incandescent lamp are viewed directly in the grating without any other optical appliance, at certain angles of incidence perfectly sharp monochromatic

* Communicated by the Physical Society: read June 20, 1902.

Аномалии ВУДА



Rittenhouse 1786

Fraunhofer 1821

Wood 1902

Lord Rayleigh 1907

***(John William Strutt,
third Baron Rayleigh)***

***“Note on the remarkable Case of
Diffraction Spectra described by Prof.
Wood”, Philos. Mag.14, 60-65 (1907)***

Fano 1941

Purcell 1946

Веселаго 1967

Yablonovich 1987

Pendry 2000



Аномалии ВУДА-РЭЛЕЯ

Lord Rayleigh 1907
(John William Strutt,
third Baron Rayleigh)

“Note on the remarkable
Case of Diffraction Spectra
described by Prof. Wood”,
Philos. Mag.14, 60-65 (1907)

The first step towards an explanation would be the establishment of a relation between the wave-lengths of the bands and the corresponding angles of incidence; and at the time of reading the original paper I was inclined to think that the determining circumstance might perhaps be found in the passing off of a spectrum of higher order. Thus in the spectrum under observation of the first order, an abnormality might be expected at a particular wave-length if in the third order light of this wave-length were just passing out of the field of view, *i. e.* were emerging tangentially to the grating surface. The verification or otherwise of this conjecture requires a knowledge of the grating interval (ϵ). This is not given in the published paper; but on hearing from Prof. Wood that there were 14,438 lines to the inch, I made at once the necessary calculation.



Lord Rayleigh 1907
(John William Strutt,
third Baron Rayleigh)

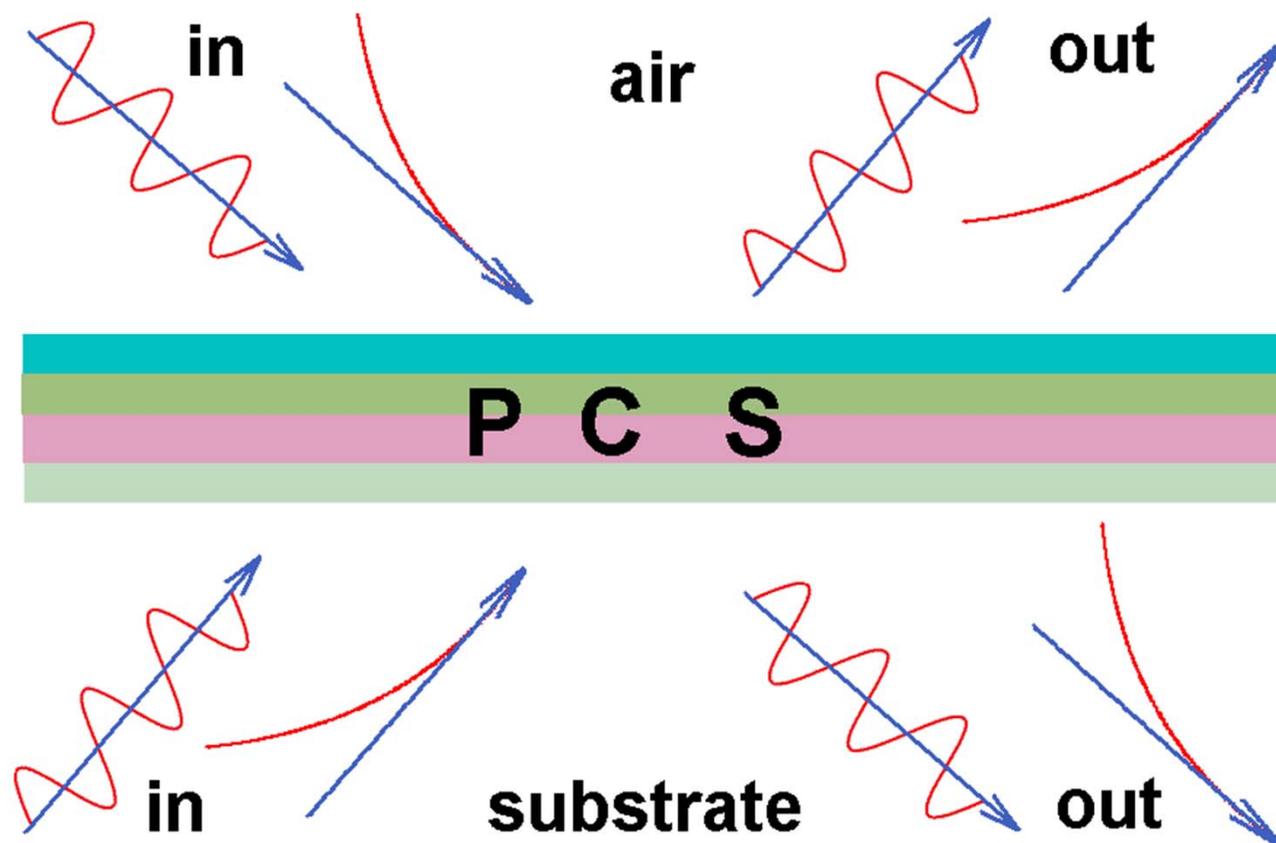
**“Note on the remarkable
Case of Diffraction Spectra
described by Prof. Wood”,
Philos. Mag.14, 60-65 (1907)**

62 Lord Rayleigh on the remarkable Case of

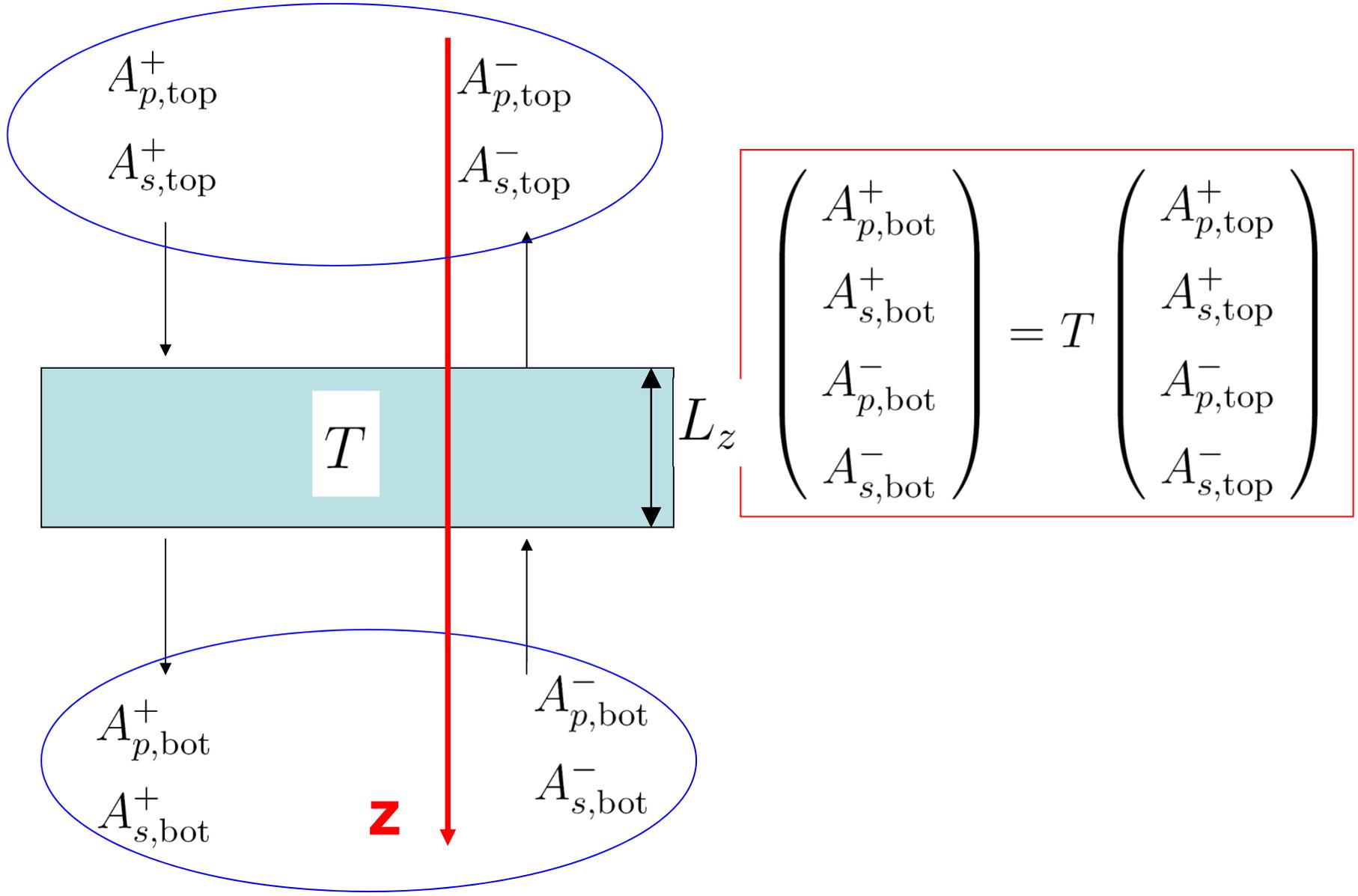
that 609 is passing off in the third spectrum on the same side as that on which the light is incident, and 517 in the third spectrum upon the other side. But the agreement of 3·10 and 3·15 with the integer 3·00 seemed hardly good enough, and so the matter was put aside until recently, when my attention was recalled to it in reading an article by Prof. Ames * on Rowland's ruling-machines, from which it appeared that gratings have been ruled with three different spaces, viz. 14438, 15020, and 20000 lines to the inch. If we permit ourselves to suppose that the number of lines in the special grating is really 15020 to the inch in place of 14438, the alteration would be in the right direction, 3·10 becoming 2·98 and 3·15 becoming 3·03, so that the mean would be about correct.



Взаимодействие света с фотонно-кристаллическим слоем



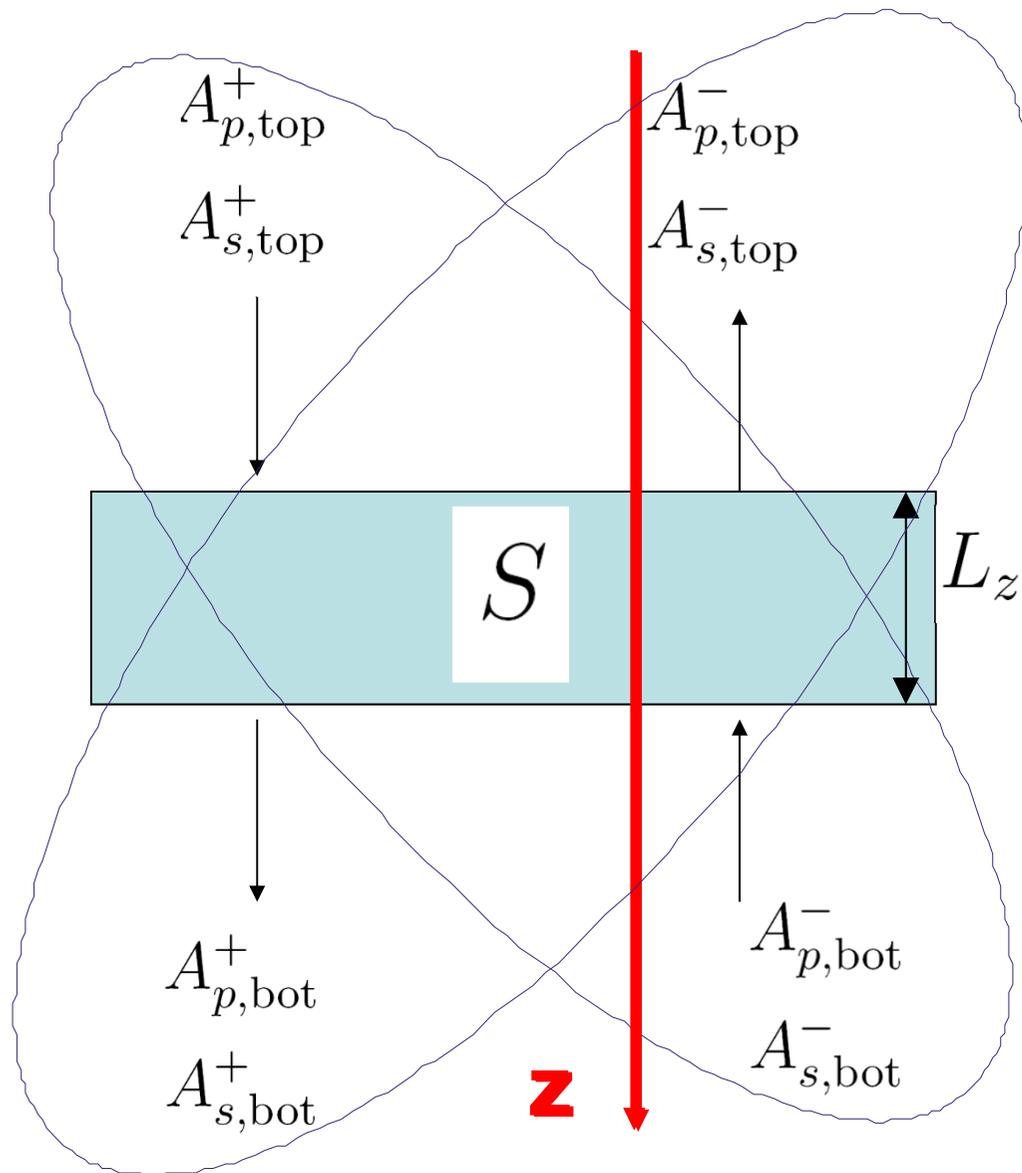
Оптическая матрица переноса через слой



$$\begin{pmatrix} A_{p,bot}^+ \\ A_{s,bot}^+ \\ A_{p,bot}^- \\ A_{s,bot}^- \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} A_{p,top}^+ \\ A_{s,top}^+ \\ A_{p,top}^- \\ A_{s,top}^- \end{pmatrix}$$



Оптическая матрица рассеяния слоя



$$\begin{pmatrix} A_{p,top}^- \\ A_{s,top}^- \\ A_{p,bot}^+ \\ A_{s,bot}^+ \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} A_{p,top}^+ \\ A_{s,top}^+ \\ A_{p,bot}^- \\ A_{s,bot}^- \end{pmatrix}$$

Входные амплитуды

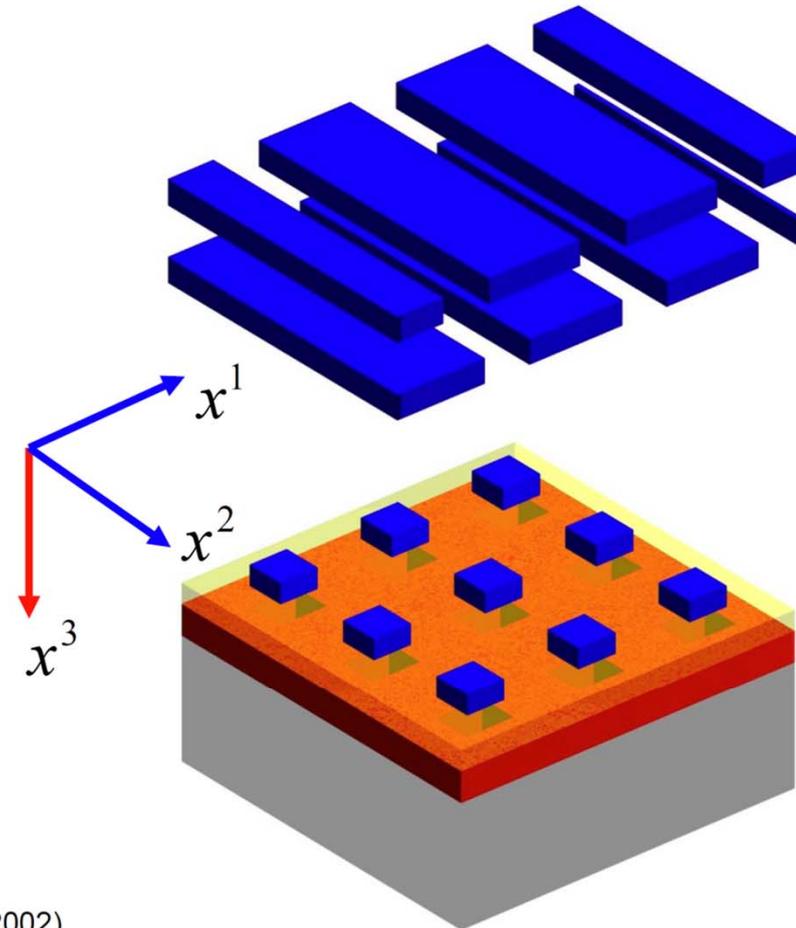
Выходные амплитуды



Fourier modal method

Typical structures FMM:

- Stacked systems with one common **axis of invariance**
- **1d or 2d periodic** or homogeneous layers with identical periods



L. Li, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **5**, 345 (2003).

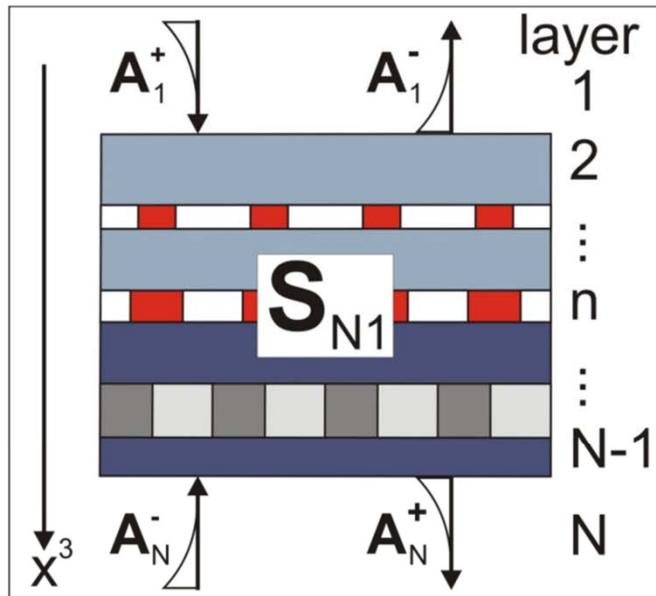
G. Granet and J. P. Plumey, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **4**, 145 (2002).

T. Weiss, N. A. Gippius, S. G. Tikhodeev, G. Granet, and H. Giessen, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11**, 114019 (2009).



Fourier modal method

Maxwell curl equations in each layer:



Eigenvalue equation:

$$\Lambda \mathbf{F} = \hat{M} \mathbf{F}$$

Lateral fields:

$$\mathbf{F} = (e_1 \quad e_2 \quad h_1 \quad h_2)^T$$

D. M. Whittaker, I. S. Culshaw, *Phys. Rev. B* **60**, 2610 (1999).

S. G. Tikhodeev et al. , *Phys. Rev. B* **66**, 45102 (2002).

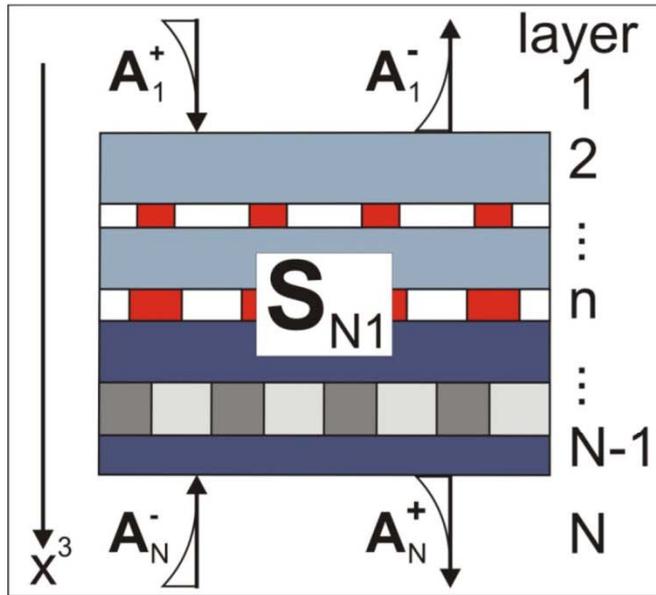
L. Li, *J. Opt. Soc. Am. A* **14**, 2758 (1997).

G. Granet and J. P. Plumey, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **4**, 145 (2002).



Fourier modal method

Start iterative layer by layer procedure:



Final result:
Scattering matrix



$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_N^+ \\ \mathbf{A}_1^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{N1}^{++} & S_{N1}^{+-} \\ S_{N1}^{-+} & S_{N1}^{--} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1^+ \\ \mathbf{A}_N^- \end{pmatrix}$$

output

input

D. M. Whittaker, I. S. Culshaw, *Phys. Rev. B* **60**, 2610 (1999).

L. Li, *J. Opt. Soc. Am. A* **14**, 2758 (1997).

S. G. Tikhodeev et al. , *Phys. Rev. B* **66**, 45102 (2002).

G. Granet and J. P. Plumey, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **4**, 145 (2002).



Фн 11.

ЧИТАЛЬНЫЙ ЗАЛ

THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

п. 2637

CONDUCTED BY
LORD KELVIN, G.C.V.O. D.C.L. LL.D. F.R.S. &c.
JOHN JOLY, M.A. D.Sc. F.R.S. F.G.S.
AND
WILLIAM FRANCIS, F.L.S.

"Nec araneorum sane textus ideo melior quia ex se fila gignunt, nec noster
vilior quia ex alienis libamus ut apes." Just. Lips. Polit. lib. i. cap. 1. Not.

VOL. XIV.—SIXTH SERIES.
JULY—DECEMBER 1907.

~~Phys.-chem. Inst.
Univ. Leipzig.
LONDON~~

TAYLOR AND FRANCIS, RED LION COURT, FLEET STREET

SOLD BY SIMPKIN, MARSHALL, HAMILTON, KENT, AND CO., LD.
SMITH AND SON, GLASGOW;—HODGES, FIGGIS, AND CO., DUBLIN;
VEUVE J. BOYVEAU, PARIS;—AND ASHER AND CO., BERLIN.

АНГЛИЙСКИЕ НАУКИ СОЮЗ
ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ИН-Т
БИБЛИОТЕКА

