

Метаматериалы в современной радиоэлектронике и сверхразрешение

А.Н. Лагарьков, В.Н. Кисель



Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН

Что считают метаматериалом?

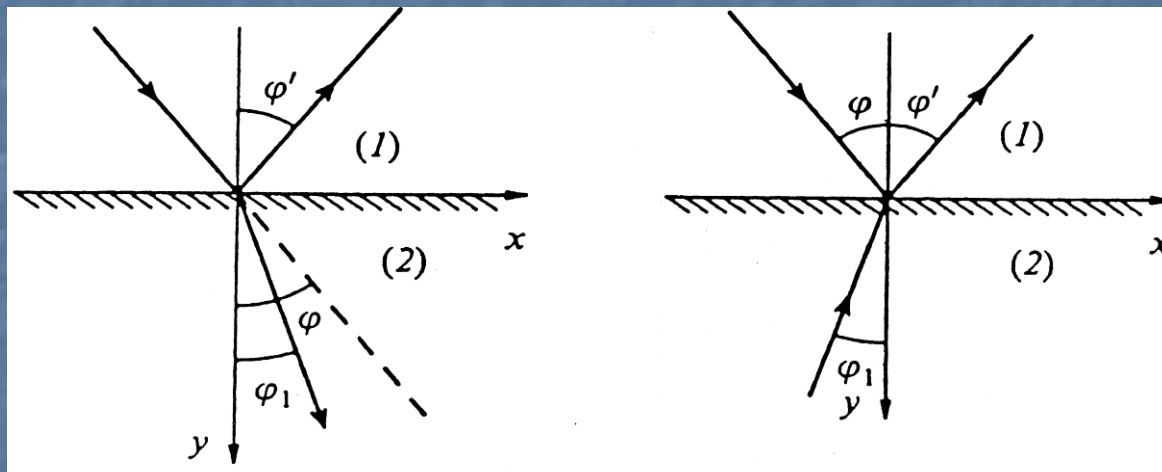
- Метаматериал — это композитный материал, особые свойства которого обусловлены не столько индивидуальными электрофизическими свойствами его компонентов, сколько микроструктурой.
- Термин «метаматериалы» особенно часто применяют по отношению к тем композитам, которые демонстрируют свойства, нехарактерные для объектов, встречающихся в природе.
- Выбирая структуру, свойства этих материалов можно изменять таким образом, чтобы они имели более широкий диапазон электромагнитных характеристик, включая отрицательный коэффициент преломления.

«Сверх»-материал:

- Отрицательные ϵ и μ
- Отрицательный коэффициент преломления
- Обратная волна

Отрицательное преломление

L.I. Mandelshtam. Lectures given on February, 26, 1940 and on May 5, 1944// Complete issue of works. Vol.5. Moscow: Izdatelstvo trudov AN SSSR. 1950.



"On plane $y=0$ these waves should meet, so called, boundary conditions. It is easy to show that only reflected wave (or only refracted one) cannot meet those conditions. However, if both waves exist the conditions are always met. It does not though mean at all, that not more then three waves should be present: boundary conditions permit the existence of one more wave, the fourth one, that goes at angle -1 in the second medium. There is a silent agreement over the absence of that wave, i.e. it is postulated that only one wave propagates in the second medium.

The wave corresponding to -1 propagates backwards the division boundary in the second medium (fig.2, left side). The wave corresponding to 1 propagates towards the division line (fig. 2, right side). It seems obvious that the second wave cannot exist because the light incidents from the first medium onto the second one, and therefore, the energy should moves off the division boundary in the second medium. But where does the energy come in? The direction of wave propagation is determined by its phase velocity, though the energy moves with the group velocity. Thus, a logical trick is present here, which is not felt only because we got used to coincidence in directions of energy and phase propagation. If the coincidence occurs, i.e. if the group velocity is positive, then everything is right. In the case of the negative group velocity, the case is quite real as I have mentioned, everything changes. Still demanding the energy to move off the division boundary we should conclude that the phase should move towards the boundary, and therefore, the direction of the reflected wave propagation will make angle -1 with regards to the normal (see fig. 2, right side). Such a construction may seem very unusual, though of no surprise, because the phase velocity says nothing yet about the direction of the energy flow".

«Правосторонние» и «левосторонние» среды

$$\Delta \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0$$

$$k = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$$

Плоская монохроматическая волна

D.V. Sivuhin, About the energy of electromagnetic field in dispersing media. *Optica i Spectroskopiya*, 3, No. 4, 308-312, 1957 (in Russian)

$$\vec{E} \approx \vec{E}_0 e^{-i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}$$

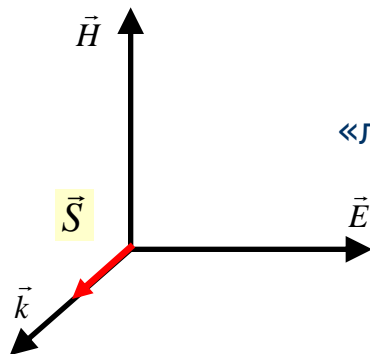
$$[\vec{k}, \vec{E}] = \frac{\omega}{c} \mu \vec{H} \quad [\vec{k}, \vec{H}] = -\frac{\omega}{c} \epsilon \vec{E}$$

Вектор \vec{k} и вектор Пойнтинга направлены противоположно

$$\mu > 0; \quad \epsilon > 0;$$

Векторы \vec{E} , \vec{H} и \vec{k}

образуют правую тройку



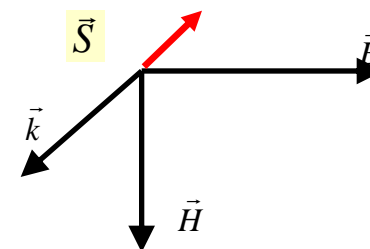
В.Г. Веселаго, 1967:
«левые» и «правые» среды

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E}, \vec{H}]$$

$$\mu < 0; \quad \epsilon < 0;$$

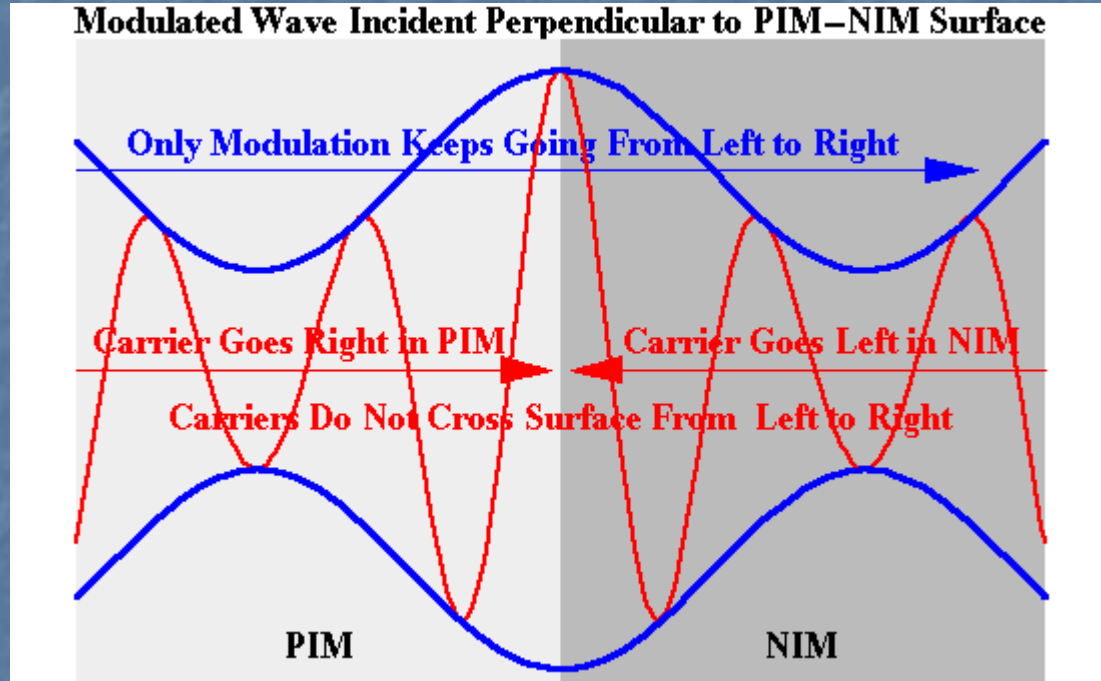
Векторы \vec{E} , \vec{H} и \vec{k}

образуют левую тройку



Обратная волна

Модулированное колебание



Метаматериал – сильно диспергирующая среда

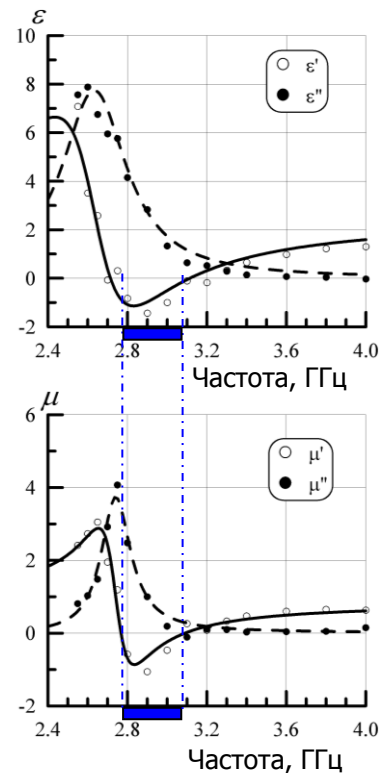
$$W = \varepsilon E^2 + \mu H^2$$

$$W = \frac{\partial(\varepsilon\omega)}{\partial\omega} E^2 + \frac{\partial(\mu\omega)}{\partial\omega} H^2$$

$$\frac{\partial(\varepsilon\omega)}{\partial\omega} = \varepsilon + \omega \frac{\partial\varepsilon}{\partial\omega} > 0,$$

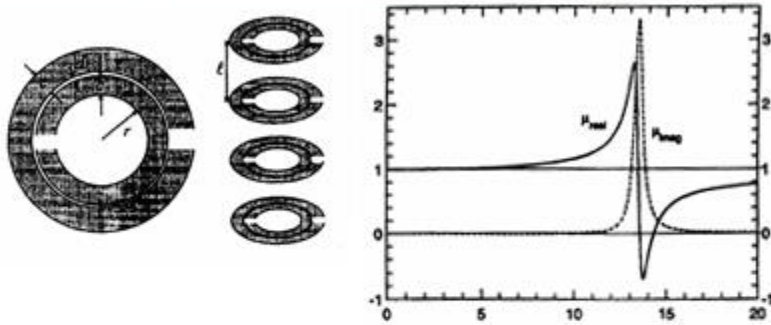
$$\frac{\partial(\mu\omega)}{\partial\omega} > 0$$

$$\varepsilon''(\omega) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varepsilon'(x) - 1}{x - \omega} dx$$



Некоторые структуры, позволяющие получить отрицательную эффективную магнитную проницаемость

J.B. Pendry et al. IEEE Trans. MTT. 1999. V.47, p.2075-2084.



S.A. Schelkunoff, H.T. Friis. Antennas: Theory and Practice. New York: John Wiley & Sons, 1952, p. 584.

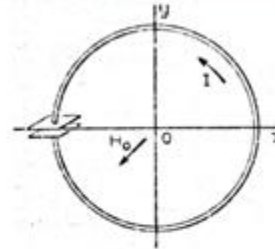


FIG. 19.10 A loop loaded with capacitance.

effects of the changes in μ and ϵ on the index of refraction are opposite. What we need is a way of increasing the permeability rather than decreasing it.

19.10 Methods for increasing the permeability of artificial dielectrics

Consider a loop with a capacitor (Fig. 19.10). Let the impressed magnetic intensity H_0 be in the positive z direction. The counterclockwise induced current is

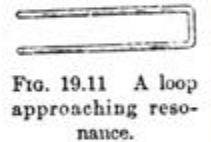
$$I = \frac{-j\omega\mu_0 H_0 S}{j\omega L + (1/j\omega C)} = \frac{\omega^2 \mu_0 C S H_0}{1 - \omega^2 LC}, \quad (52)$$

where L is the inductance of the loop and C the capacitance in series with it. The moment of the magnetic doublet equivalent to the loop is

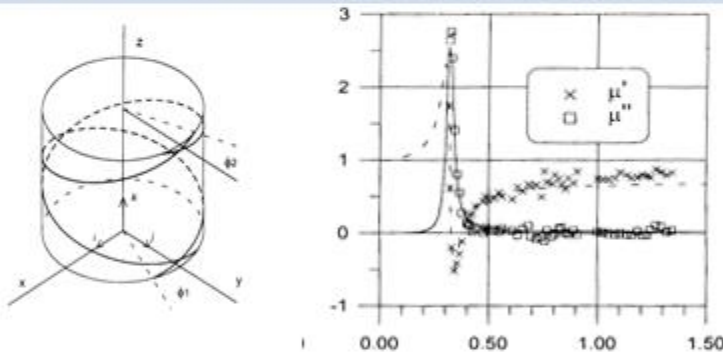
$$p_m = \mu_0 I S. \quad (53)$$

Hence, the magnetic polarizability is

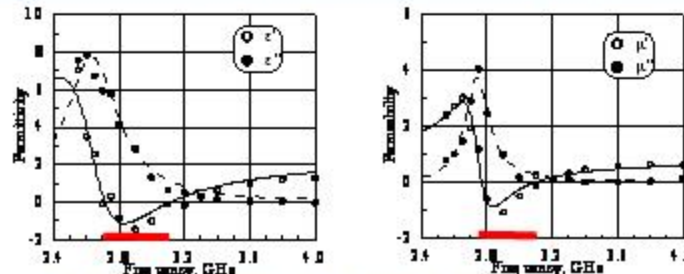
$$\chi_m^0 = \frac{\omega^2 \mu_0^2 C S^2}{1 - \omega^2 LC} = \frac{\omega^2 \mu_0 \epsilon_0 (C/\epsilon_0) S^2}{1 - \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 (LC/\mu_0 \epsilon_0)} \mu_0. \quad (54)$$



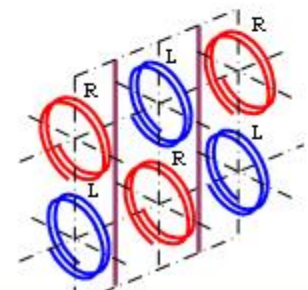
A.N. Lagarkov et al. Electromagnetics. 1997. V.17. № 3. P.213-237.



A.N. Lagarkov et al. Journ. of Magnetism and Magnetic Materials, 2003. V.258-259. P. 161-166.



Developed 10+ years ago for some other purposes...



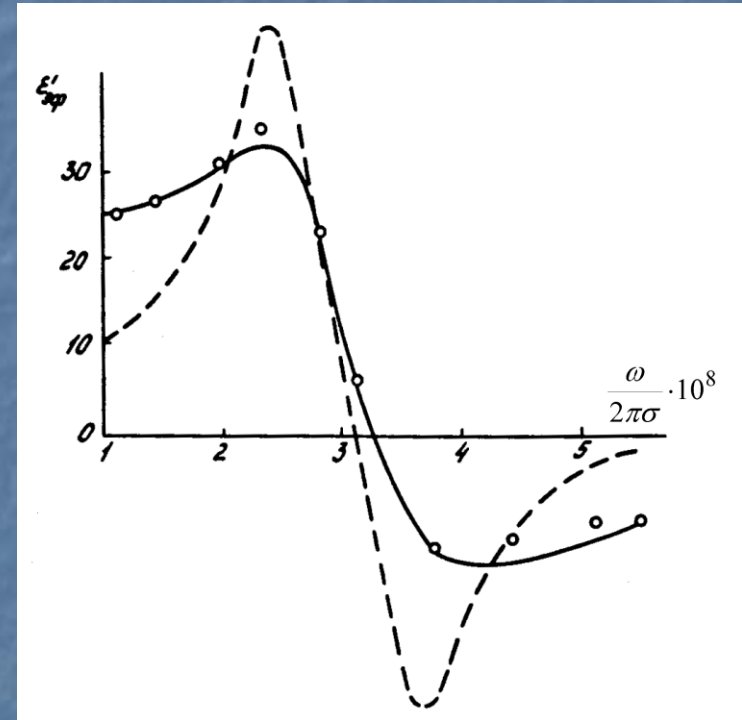
A.N. Lagarkov, V.N. Kissel. PRL, V. 92, 077401, 2004.

Композиты с отрицательной эффективной диэлектрической проницаемостью

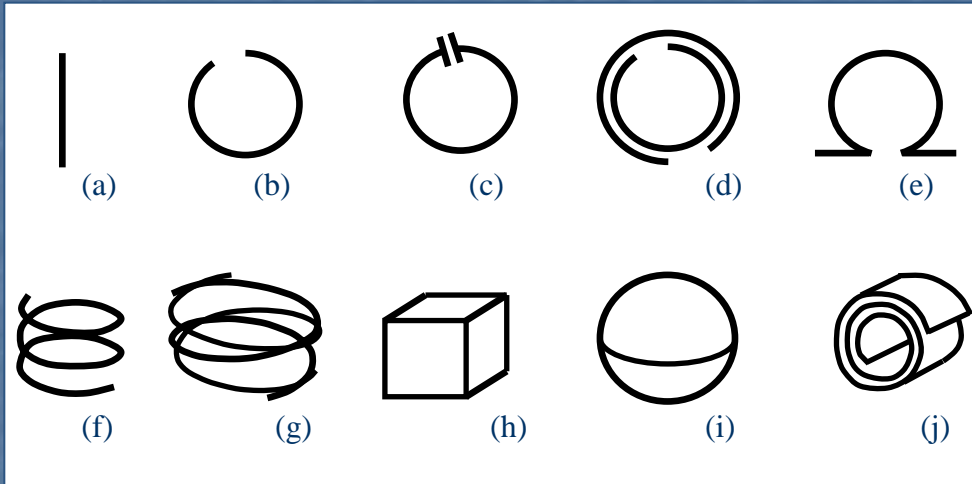
Electrophysical properties of percolational systems// Ed. by A.N. Lagarkov. Moscow, IVTAN, 1990 (in Russian)

Lagarkov A.N., Sarychev A.K., Smychkovich Y.R. and Vinogradov A.P. Effective Medium Theory For Microwave Dielectric Constant and Magnetic Permeability of Conducting Stick Composites // T. Elect. Waves and Appl. 1992. V 6. №9. P.1159.

Lagarkov A.N., Sarychev A.K. Electromagnetic properties of composites containing elongated conducting inclusions // Phys. Rev. 1996. V. B 53. P. 6318.



Некоторые типы включений в составе композитного материала



(a): A. N. Lagarkov, L. V. Panina, A. K. Sarychev et al., in: MRS Spring Meeting (1990), paper S 9.3.

A. I. Kolesnikov, A. N. Lagarkov, S. M. Matytsin et al., in: Optical and Electrical Properties of Polymers No. 214, edited by J. A. Emerson and J. M. Torkelson/Materials Research Society (1991).

A. N. Lagarkov, A. K. Sarychev, Y. R. Smychkovich et al, : J. Electromagn. Waves Appl. Vol. 6 (1992), p. 1159

A. N. Lagarkov and A. K. Sarychev: Phys. Rev. B Vol. 53 (1996), p. 6318

(b), (c): S.A. Schelkunoff and H.T. Friis: Antennas: Theory and Practice (New York. Wiley 1952)

(f), (g): A. N. Lagarkov, V. N. Semenenko, V. A. Chistyayev, D. E. Ryabov, S. A. Tretyakov and C. R. Simovski: Electromagnetics Vol. 17 (1997), p. 213

(h), (i): V.N. Semenenko, V.A. Chistyayev and D.E. Ryabov, in: Proc. Of the 7th Int. Crimean Conf. "Microwave and Telecommunication Technology", Sept. 15-18, Crimea, Ukraine (1997), p. 113

A.N. Lagarkov, V.N. Semenenko, V.N. Kisel and V.A. Chistyayev: J. Magn. Magn. Mater. Vol. 238-239 (2003), p. 161

(j): V.N. Semenenko, V.A. Chistyayev and D.E. Ryabov, in: Proc. of the Bianisotropics'98 7th Int. Conf. on Complex Media, June 3-6, Braunschweig, Germany (1998), p. 313

Необычное преломление, «суперлинза»

$$n = \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\mu} = -1$$

Линза Веселаго

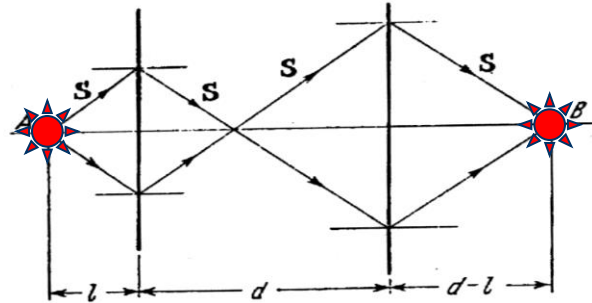
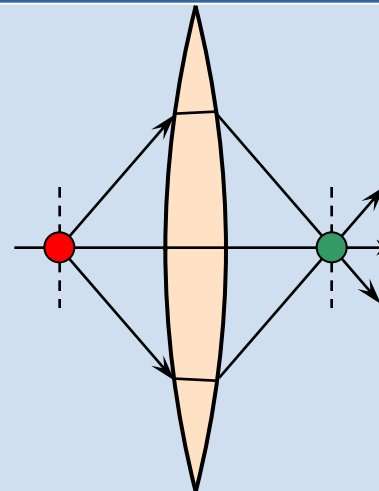


Рис. 4. Прохождение луча света через пластину из левого вещества толщиной d .
 A — источник излучения, B — приемник излучения.

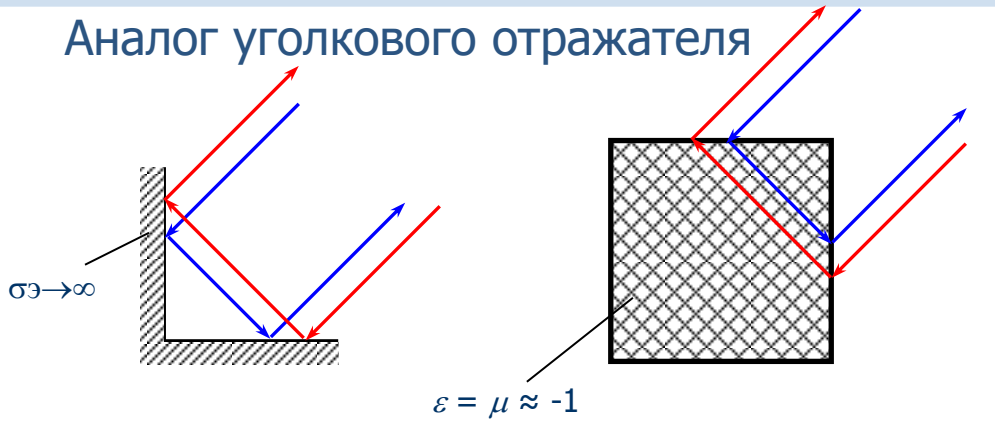


Обычная линза

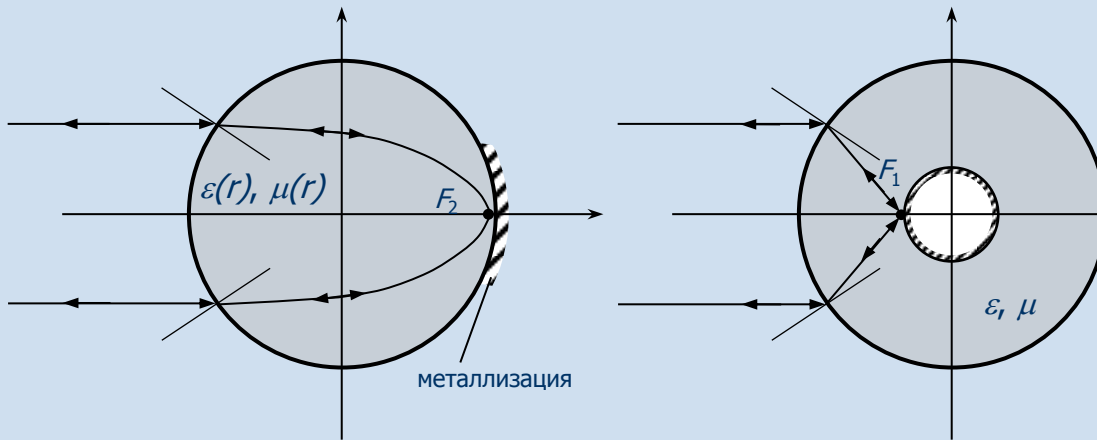
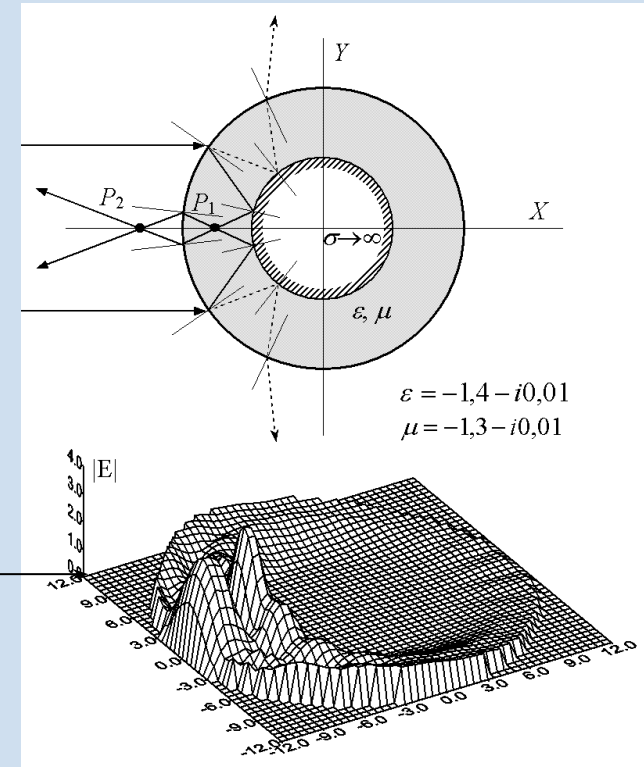


Новые устройства на основе метаматериалов

Аналог углового отражателя



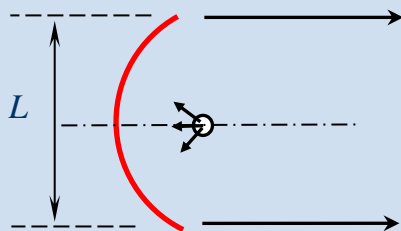
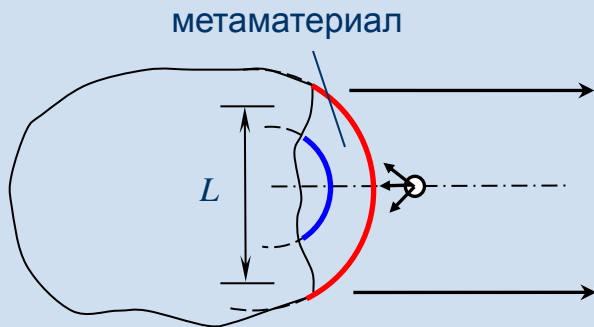
Выпуклая (круговая) фокусирующая система



Аналог линзы Лунеберга

Применение выпуклой фокусирующей поверхности

Фокусирующие свойства выпуклой отражающей поверхности; эквивалентная апертура

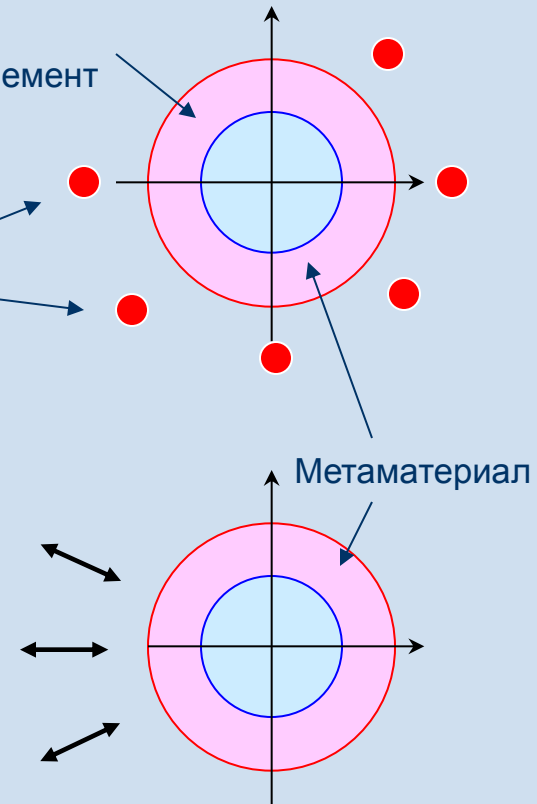


Обычная фокусирующая система

Всенаправленный излучатель, линза Люнеберга и т.д.

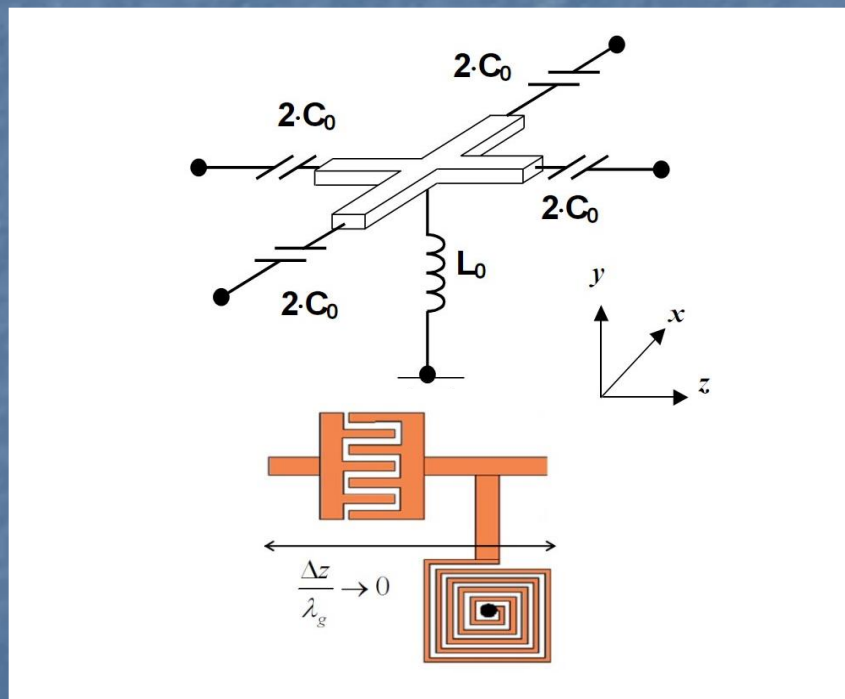
Единственный фокусирующий элемент

Излучатели (приемники)

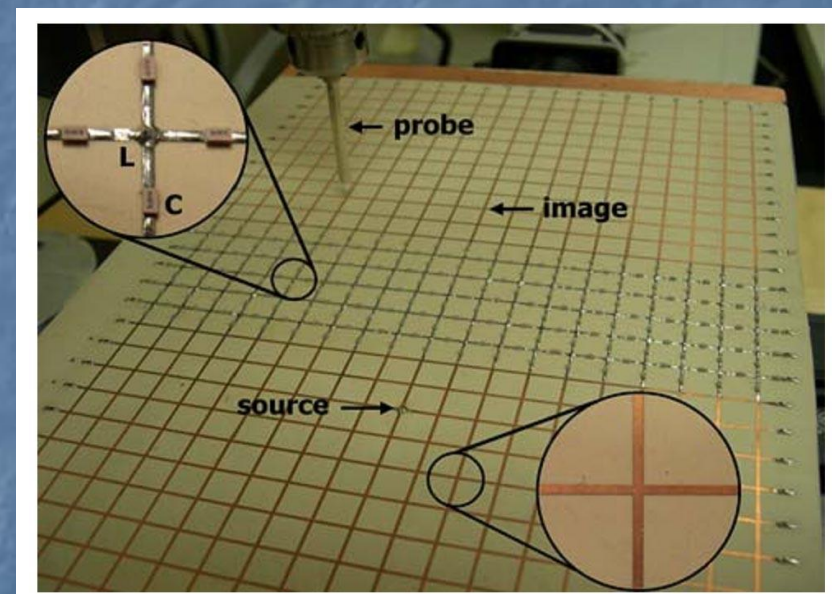


Плоские метаматериалы – распределенные системы

Элементарная ячейка искусственной среды



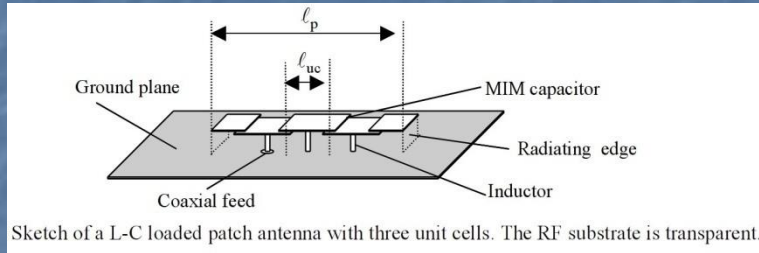
Плоский аналог (модель) метавещества



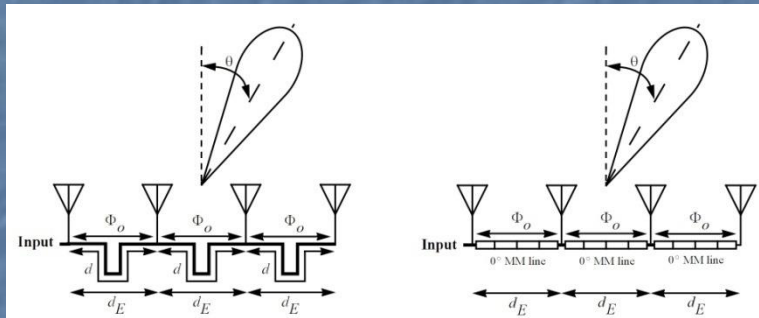
G.V. Eleftheriades et al

Метаматериалы в конструкциях антенн

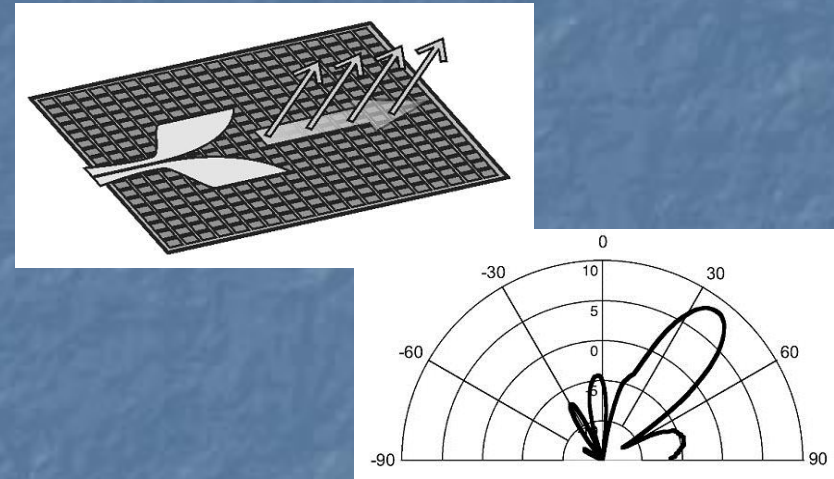
Микрополосковые антенны



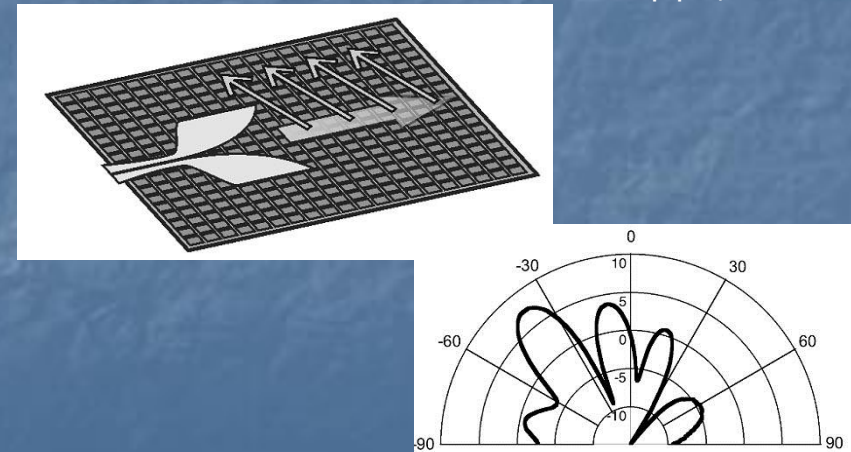
Короткие фазизирующие фидеры



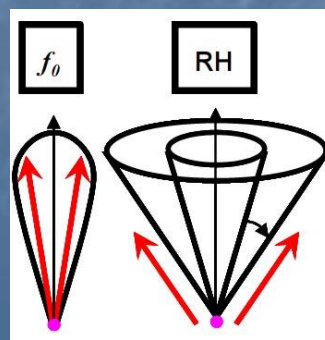
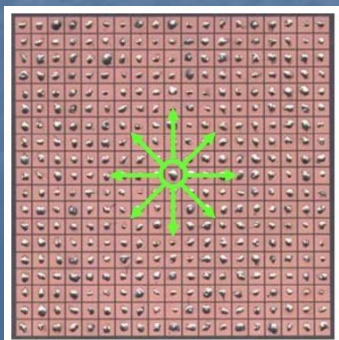
Особые типы антенн вытекающей волны



D.F. Sievenpiper, 2004



Антенны вытекающей волны с излучением по нормали



T. Itoh и др., 2004

Так ли «волшебны» метаматериалы?

РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, 2007, том 52, № 9, с. 1051–1058

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.876.4

КРИТИЧЕСКИЙ ВЗГЛЯД НА МЕТАМАТЕРИАЛЫ

© 2007 г. Р. Миттра

Пенсильванский государственный университет, Лаборатория материалов

319EE East University Park, PA, 16802, USA

e-mail: mitra@enr.psu.edu

Поступила в редакцию 23.03.2007 г.

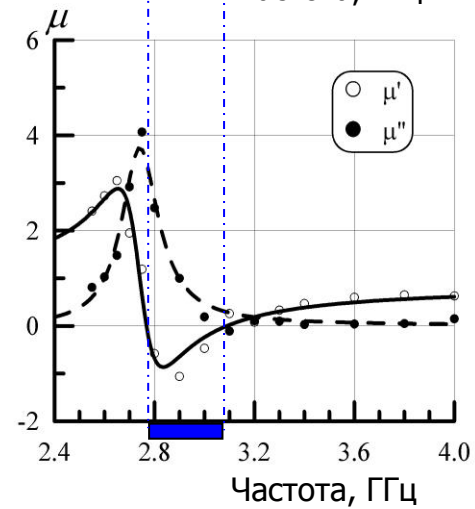
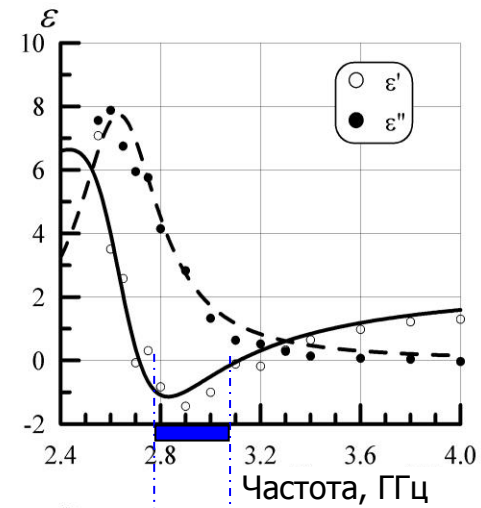
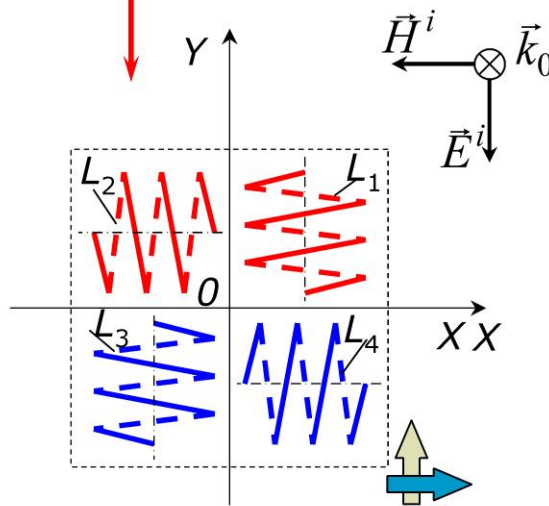
Представлен критический анализ возможных применений метаматериалов для улучшения работы антенных устройств, и указаны направления дальнейших необходимых исследований в области метаматериалов.

ВВЕДЕНИЕ

В 1968 г. Веселаго [1] рассмотрел дважды отрицательные среды (ЛОС) с отрицательными ϵ и μ и

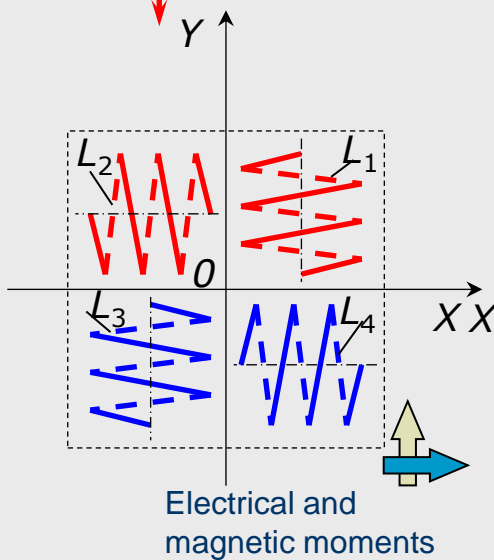
этих материалов, связанные с фокусировкой и аномальным преломлением (рис. 1). Так как ДОС редко встречаются в природе (особенно ДОС в микроволновой области), в течение некоторого

Композит с одновременно отрицательными ϵ и μ



Электродинамическое моделирование ТОНКОПРОВОЛОЧНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Model of the cell



Integral Equation :

$$ZI + i\omega\mu_0 \int_L I \left(\vec{v} \cdot \vec{v}' - \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial v \partial v'} \right) \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} dl = \vec{v} \cdot \vec{E}^i$$

(d – skin layer depth, a – wire radius),

$$Z = \frac{1+i}{2\pi a \sigma d}; \quad L = \sum L_i$$

Normalized current to calculate

$$\hat{I} = i\omega\mu_0 I / |E^i| = ikI / |H^i| \quad (\text{dimensionless})$$

*IE solution is obtained numerically by means of Galerkin's technique
(Moment Method with roof-top weighting and expansion functions)*

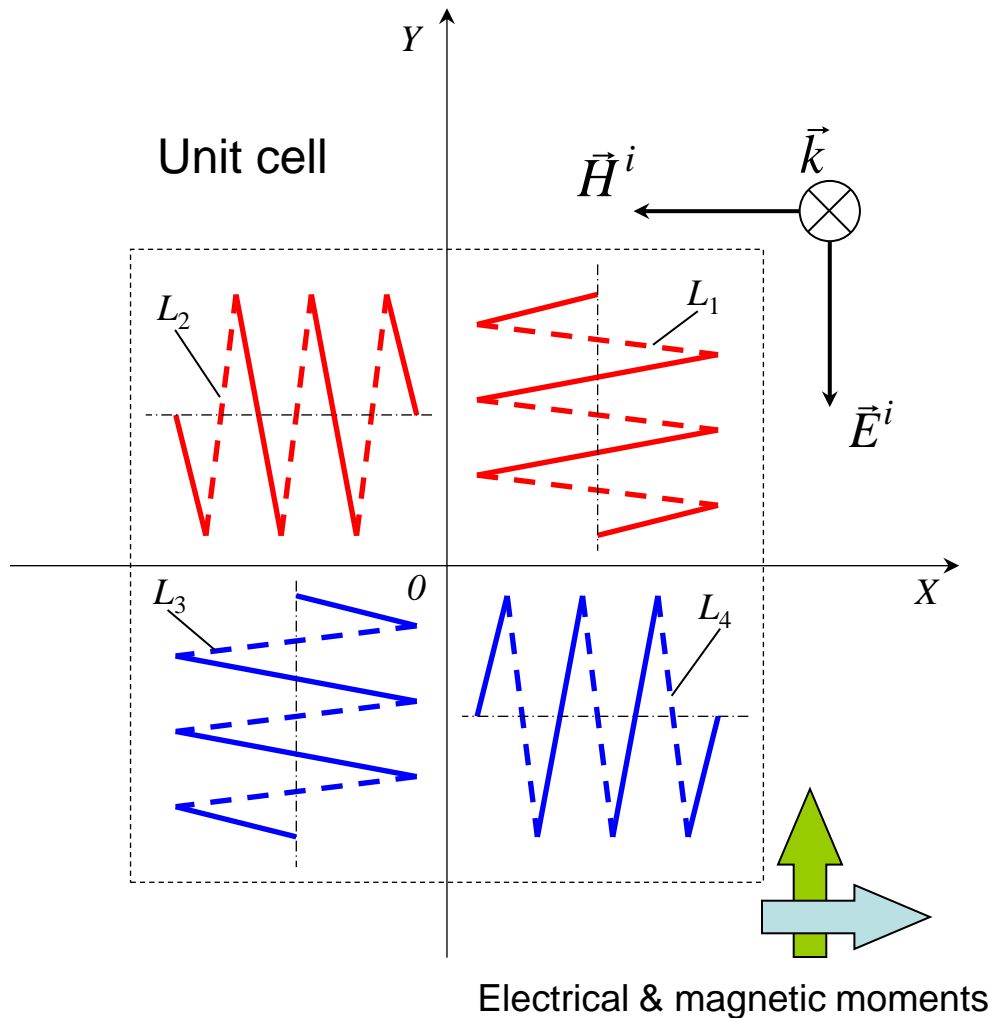
Specific normalized electric and magnetic moments (dimensionless):

$$\bar{c}^e = \frac{\bar{m}^e / |E^i|}{\varepsilon_0 V_0} = -\frac{\int \hat{I} \cdot \vec{v}' k dl}{k^3 V_0}; \quad \bar{c}^m = \frac{\bar{m}^m / |H^i|}{\mu_0 V_0} = -\frac{i}{2k^3 V_0} \int_L \hat{I} \cdot [k\vec{r}_0, \vec{v}'] k dl$$

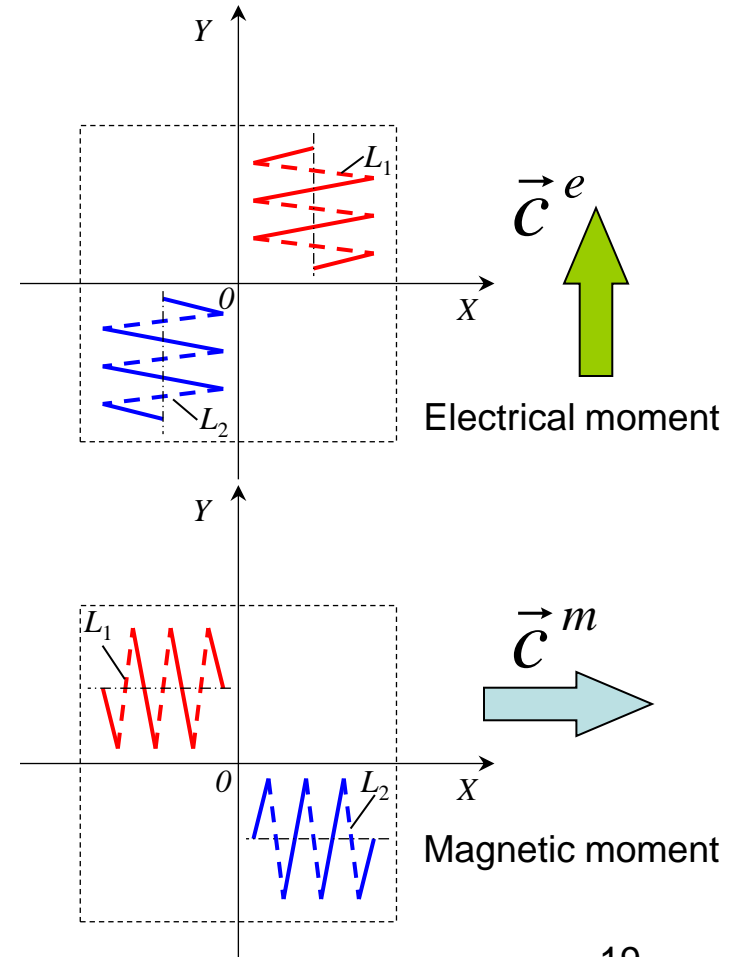
Homogenization technique to calculate ε_{eff} μ_{eff} (mixing formulae)

Electromagnetic Model Development

Problem Description

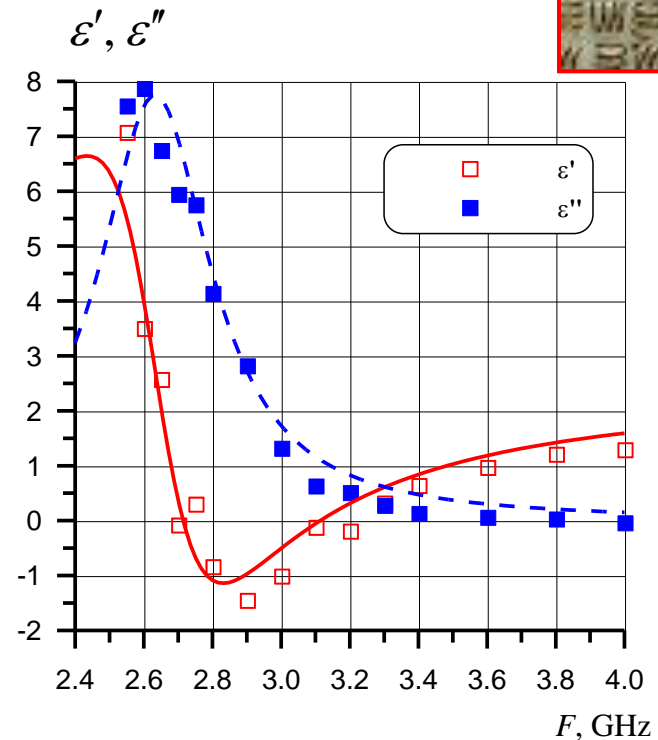
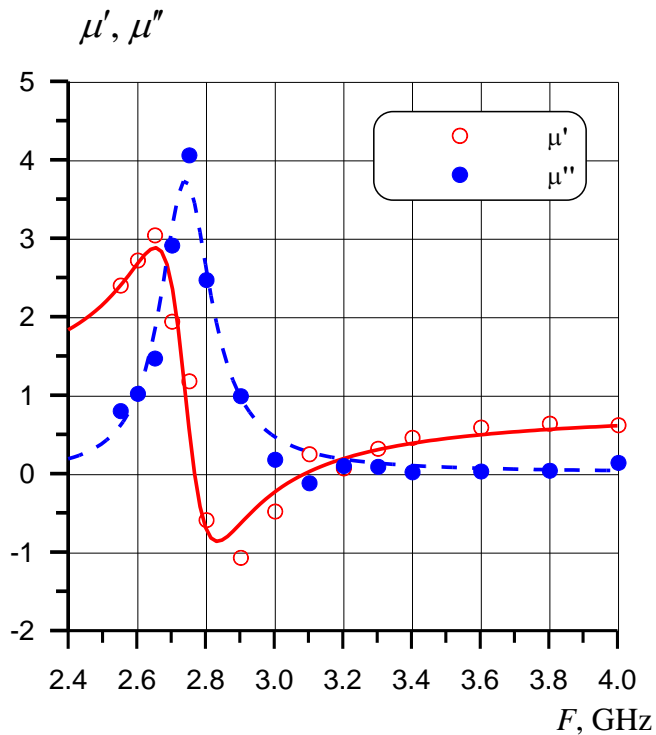


Simpler Structures to Determine Moments Separately



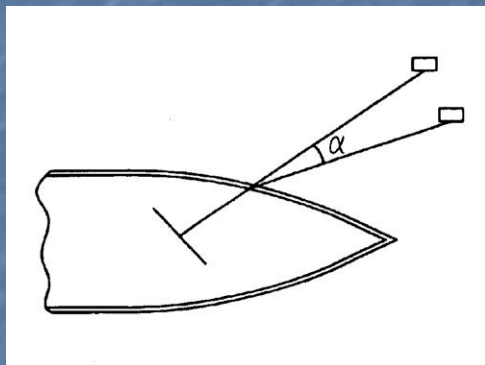
Experimental Data for the Permeability and Permittivity of the Composite Consisting of *NiCr* Wire Helixes

volume fraction of helixes $p = 48\%$, $n = 3$, $h = 2$ mm, $D = 5$ mm

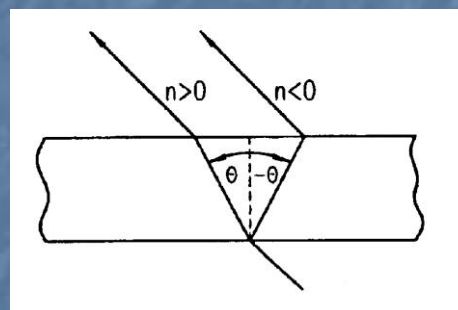


Применение метаматериала с отрицательным показателем преломления для компенсации угловых ошибок, вносимых обтекателем антенны

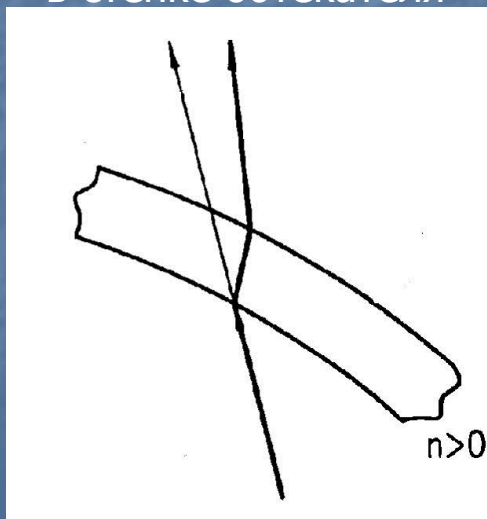
Угловая ошибка



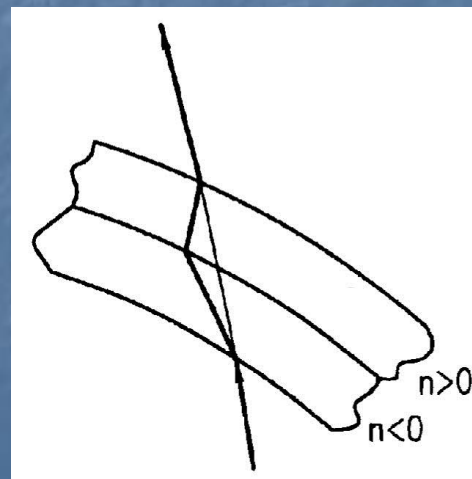
Преломленные лучи при различном n



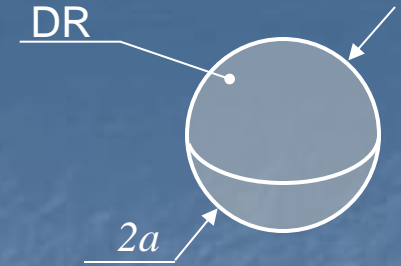
Преломление луча в стенке обтекателя



Компенсация угловой ошибки



The Basic Relationships for the Resonant Properties of the Spherical Dielectric Resonator



DR eigenfrequencies :

$$\text{for TE-modes: } \frac{\omega}{2\pi} = \frac{nc}{2a\sqrt{\epsilon}}, n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{for TM-modes: } \frac{\omega}{2\pi} = \frac{(2l+1)c}{4a\sqrt{\epsilon}}, l = 1, 2, 3, \dots$$

First *TE*-mode (H_{11m}):

$$\lambda/\sqrt{\epsilon} = 2a$$

Magnetic dipole moment and magnetic polarizability

$$\vec{m} = \alpha_m V_0 \vec{H};$$

$$\alpha_m = \frac{3}{4\pi} \gamma; \quad \gamma = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{3}{ka} \text{ctg}(ka) - \frac{3}{(ka)^2} \right)$$

Electric polarizability
(at high ϵ)

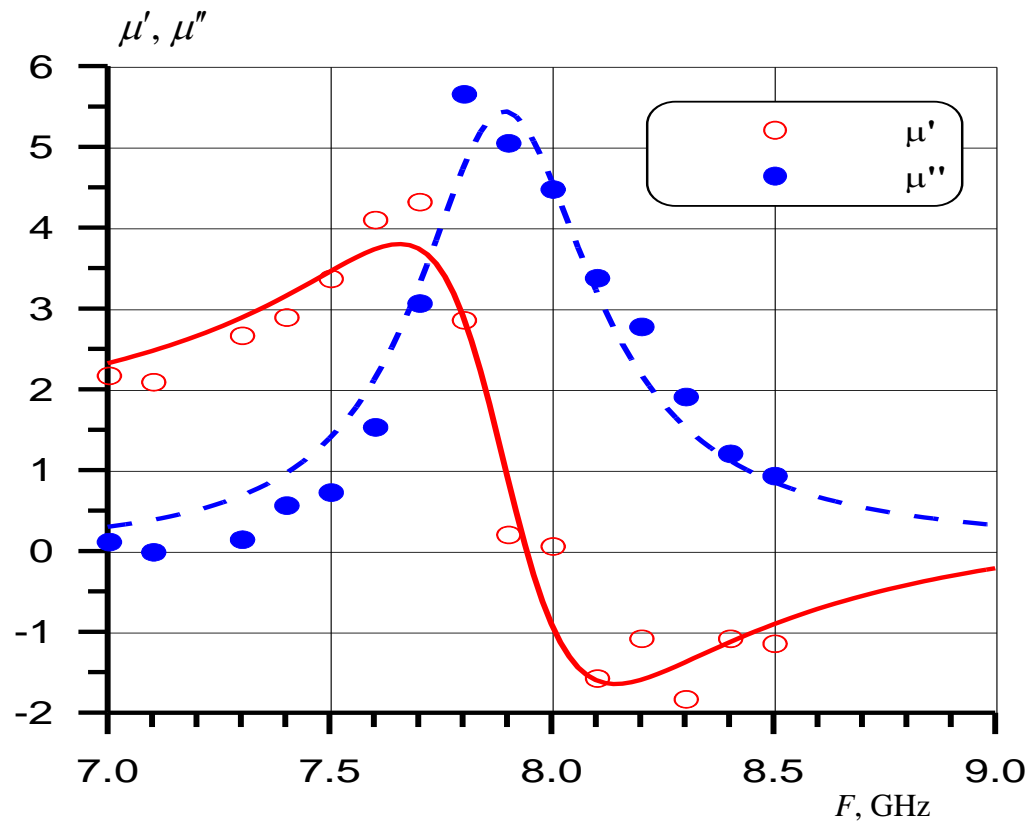
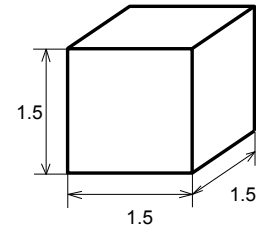
$$\alpha_e \approx 3/4\pi$$

Resonant dispersion formula
for magnetic polarizability:

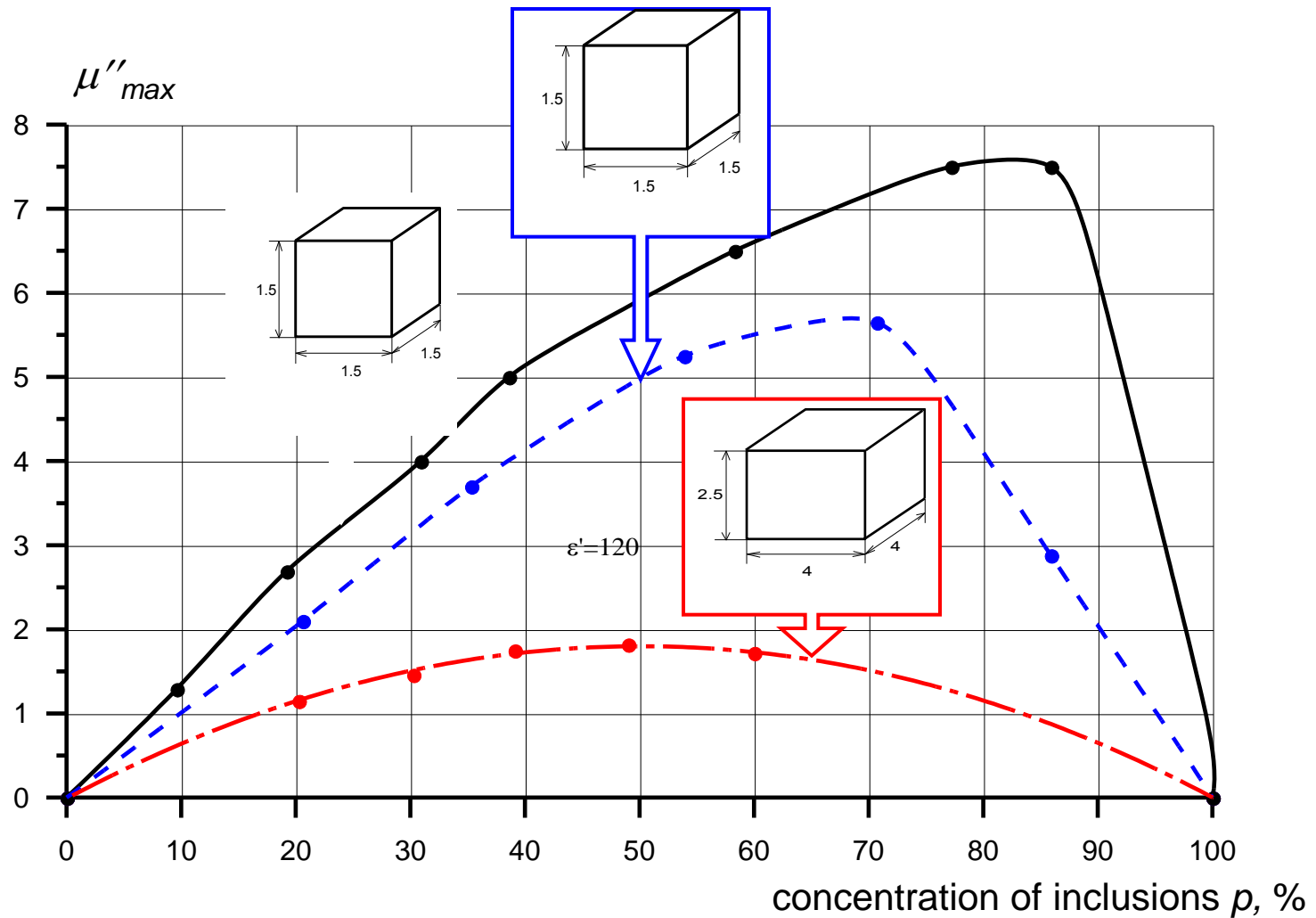
$$\alpha_m(\omega) = \sum_k A_k \frac{\beta_k}{\omega_k} \frac{\omega^2}{\omega_k^2 - \omega^2 - i\omega\beta_k}, \quad k = 1, 2, \dots$$

Experimental Data for the Permeability and Permittivity of the Composite Loaded by Cubic Ferroelectric Resonators

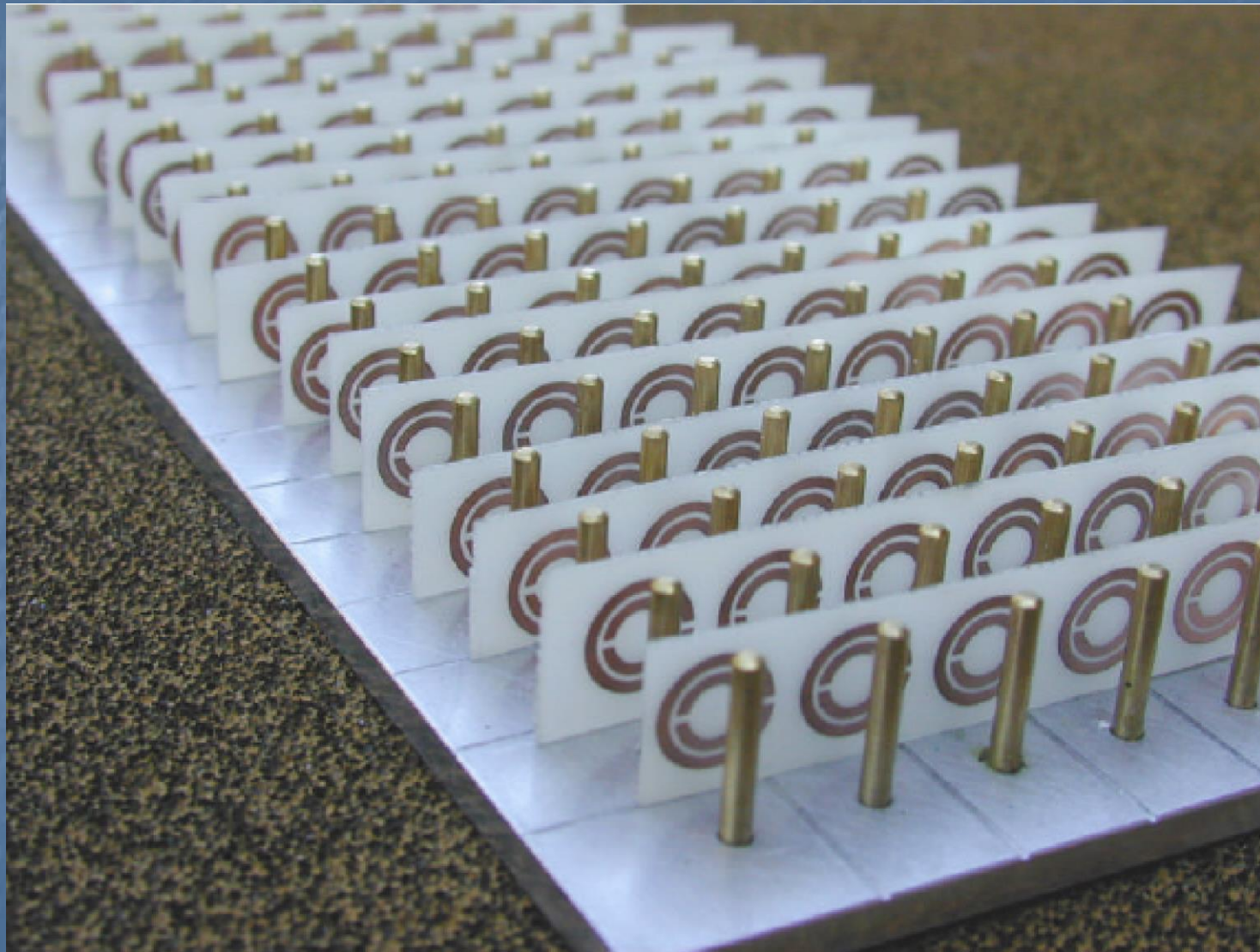
volume fraction of inclusions $p = 53\%$, $\epsilon = 500 - i20$

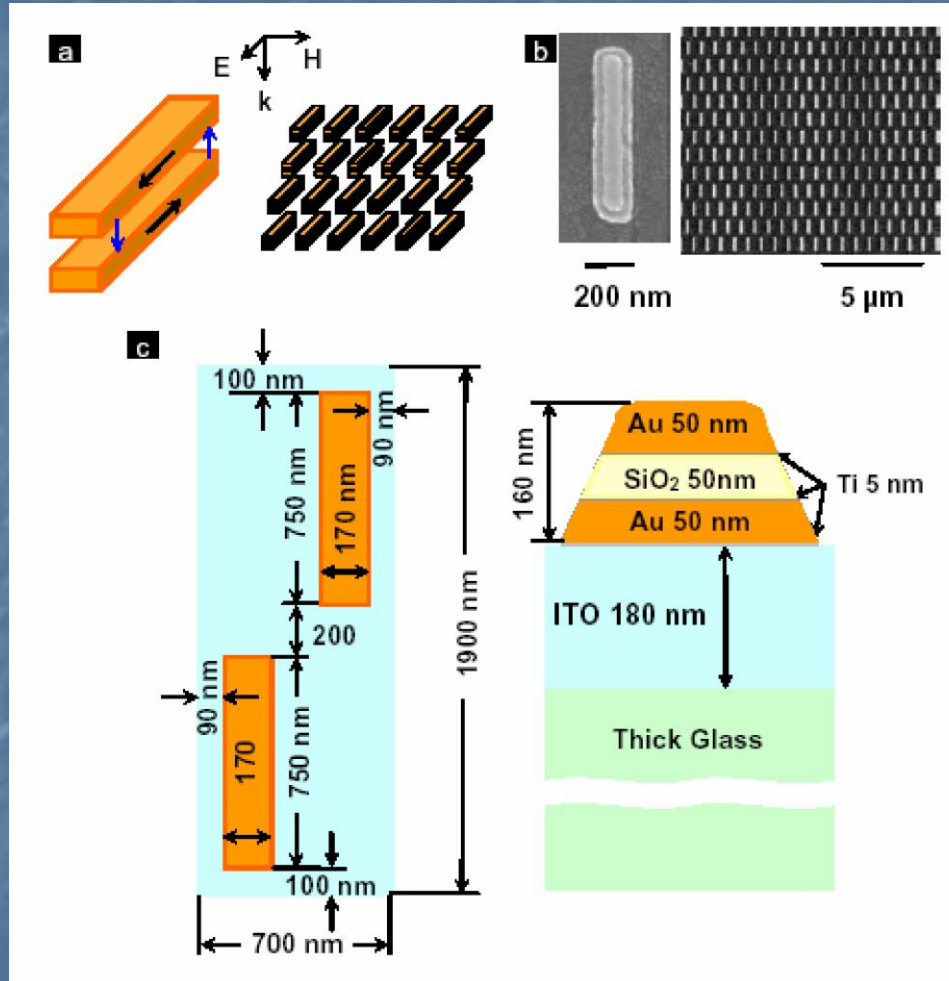


Experimental Data for the μ'' Resonance Magnitudes of the Composite Consisting of Dielectric Resonators



R.A. Shelby, D.R. Smith, S. Schultz, *Science*, **292**, 77 (2001)





V.M. Shalaev et al., *Optics Letters*, **30**, 3356 (2005)

First detection of the negative n

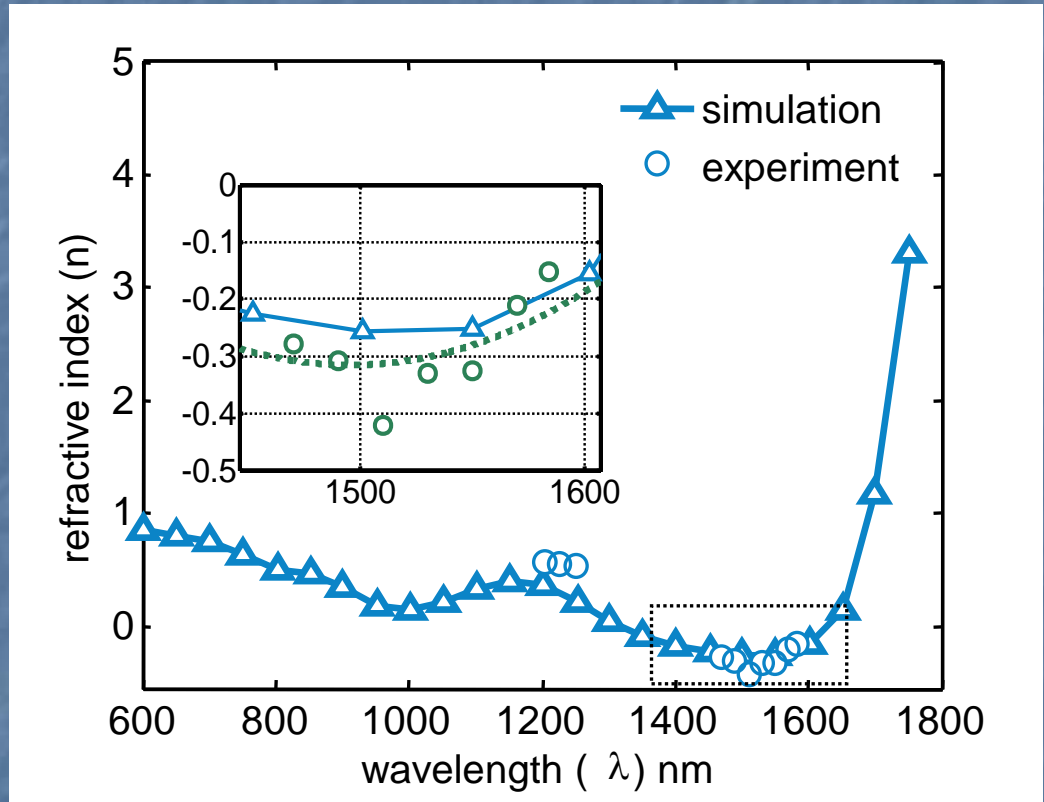
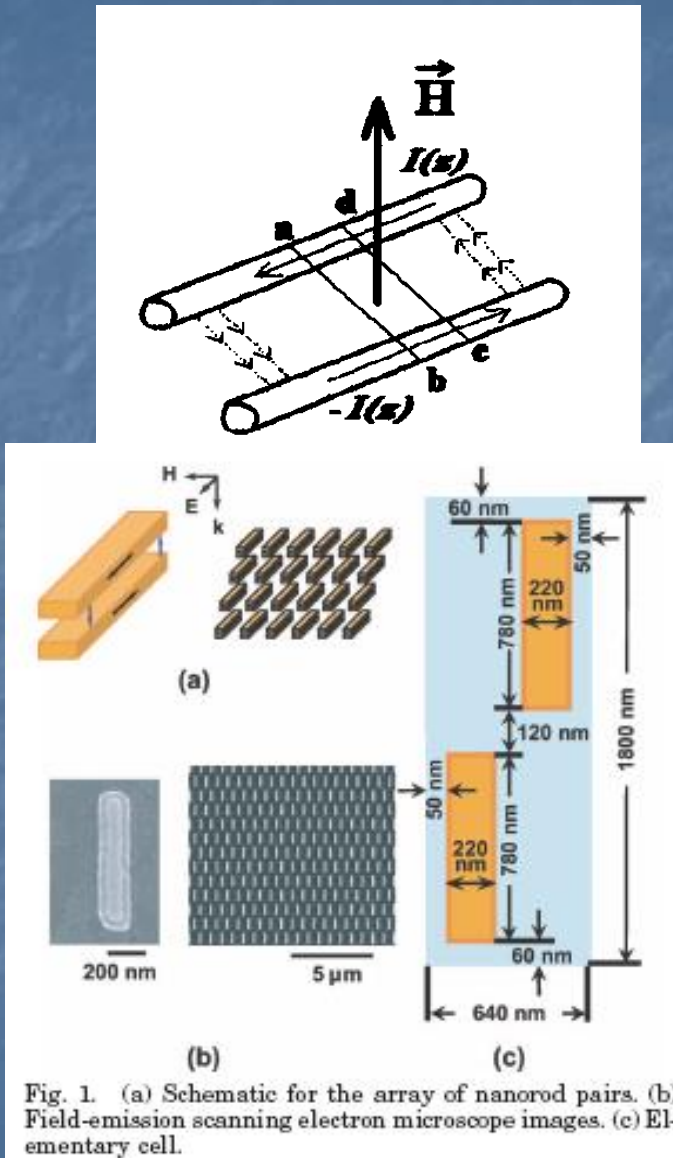
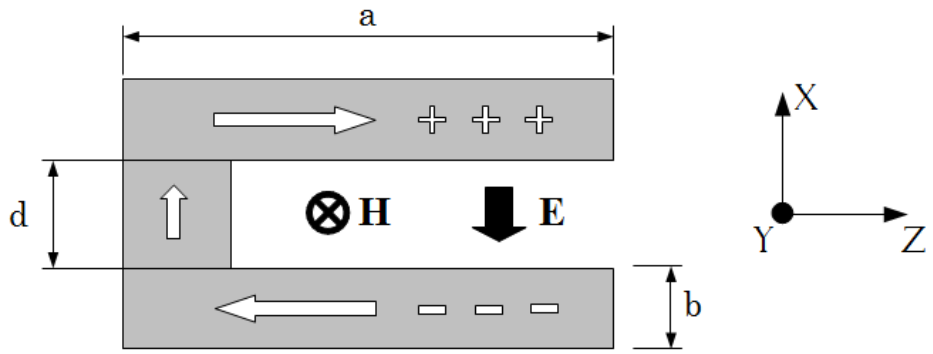


Fig. 1. (a) Schematic for the array of nanorod pairs. (b) Field-emission scanning electron microscope images. (c) Elementary cell.

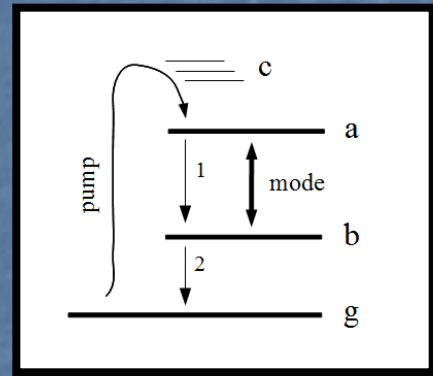
Квантовая плазмоника, нанолазер

Металлический нанорезонатор
в форме подковы

$a \ll \lambda$, Аномально большое поле



Активная среда



Энергия плазмона в нанорезонаторе

$$H = \frac{Q^2}{2(C_1 + C_2 \epsilon_b)} + \frac{p^2}{2L}$$

$$p = JL, L = m / (4\pi n e^2 C_2)$$

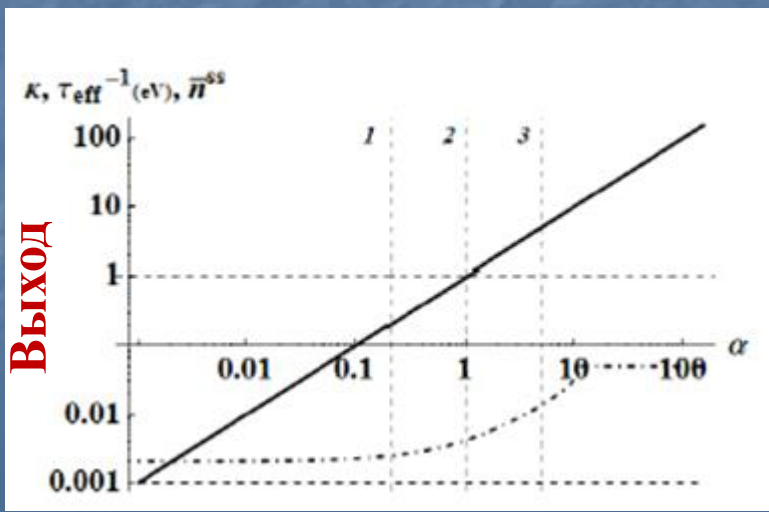
Коммутатор

$$[Q, p] = i\hbar$$

Квантовое плазмонное поле

$$E = \sqrt{\frac{2\pi\hbar b \omega_p^2}{l a^3 \omega_r}} \sin(gz)(a + a^\dagger)$$

Плазмонный нанолазер
Беспороговая генерация



Накачка

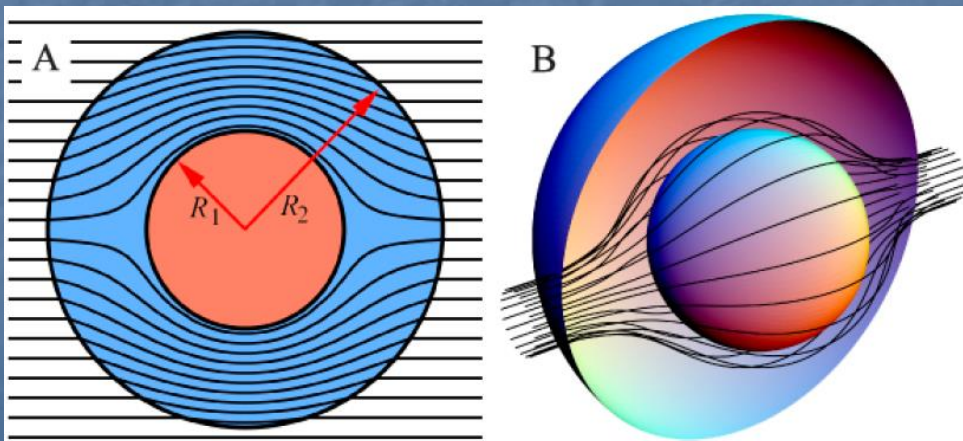
Тигран Оганесян

Объект исчез

Ученые доказали возможность создания новых материалов, способных сделать невидимым практически любой предмет. Дальнейшие исследования активно финансируются военными

ЭКСПЕРТ № 27 17 — 23 ИЮЛЯ 2006

J.B. Pendry, D. Schurig, D.R. Smith, *Scienceexpress*, 25 May, 2006



Лучевая картина рассчитана в предположении $R_2 \gg \lambda$.

Лучи соответствуют направлению переноса энергии.

Область радиуса R_1 скрыта от наблюдателя.

Любой предмет, размещенный внутри этой области, будет невидимым.

Уменьшение отражения от полости



Современный малозаметный самолет

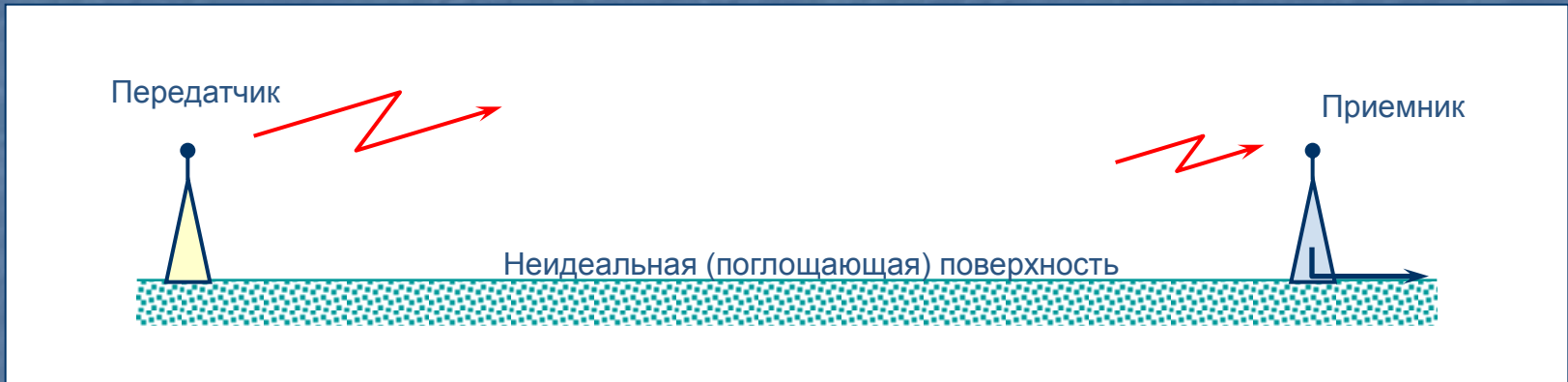


(C) aviator.ru Sergey Martirosyan

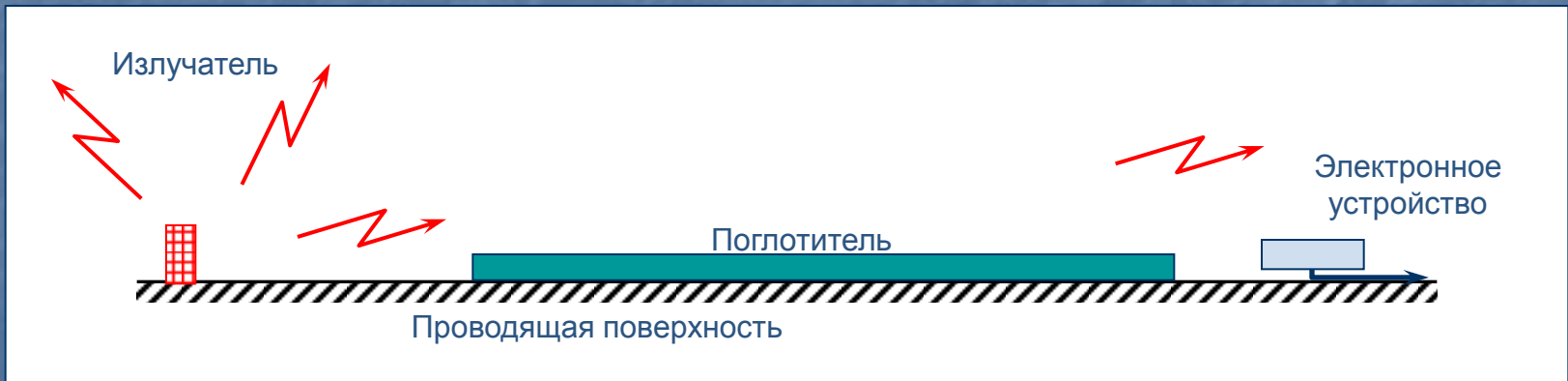
Современный малозаметный самолет

Распространение волны над плоской поверхностью

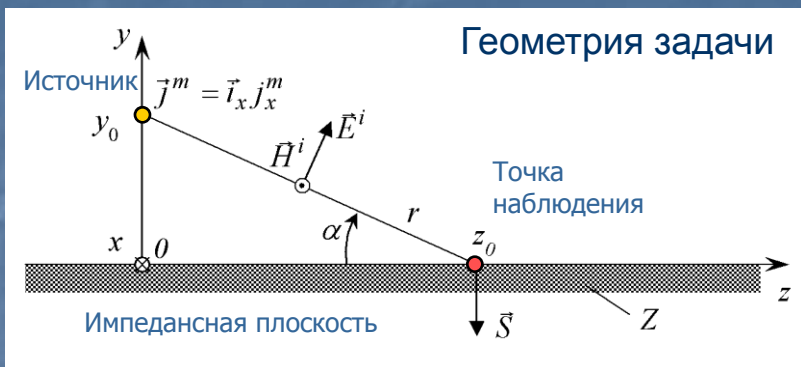
Задачи радиосвязи



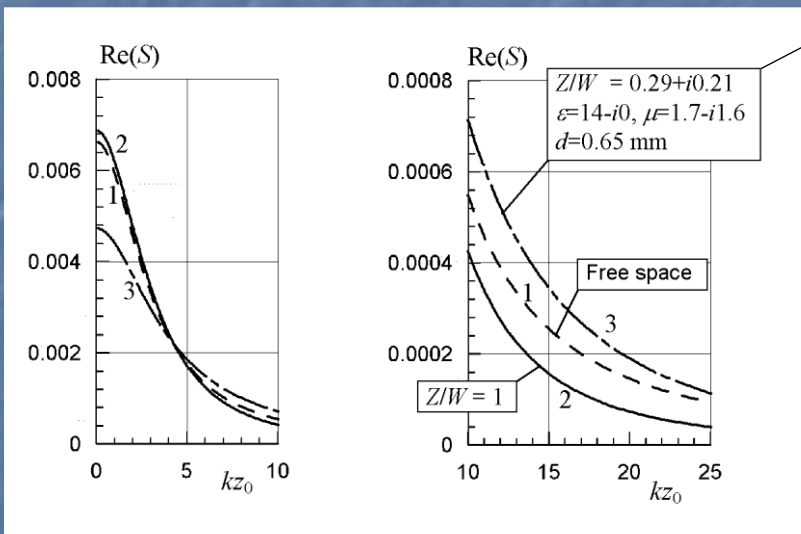
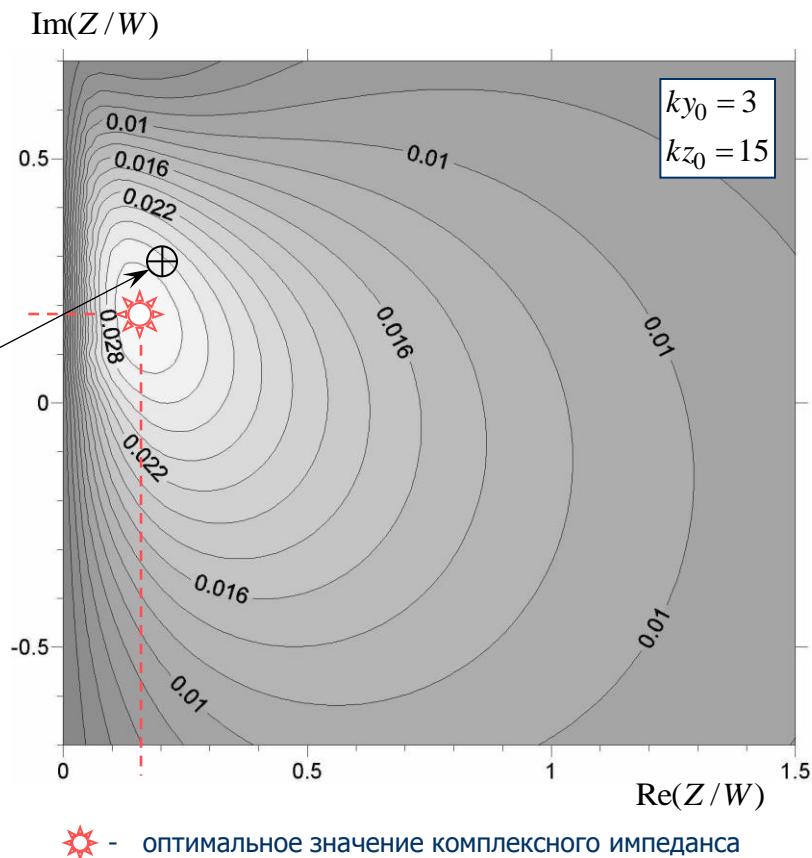
Задачи электромагнитной совместимости



Выбор оптимального импеданса покрытия



Плотность потока поглощаемой мощности



Вопросы: можно ли создать такое распределение импеданса на плоскости, чтобы она поглотила более половины мощности, излучаемой точечным всенаправленным источником?

Если да, то каково предельное значение доли поглощенной мощности?

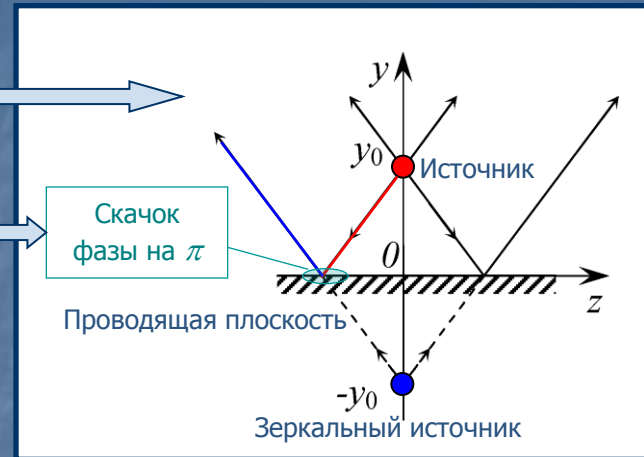
Полное поглощение энергии излучения точечного источника

Поле над проводящей плоскостью определяется интерференцией полей истинного и зеркального источников

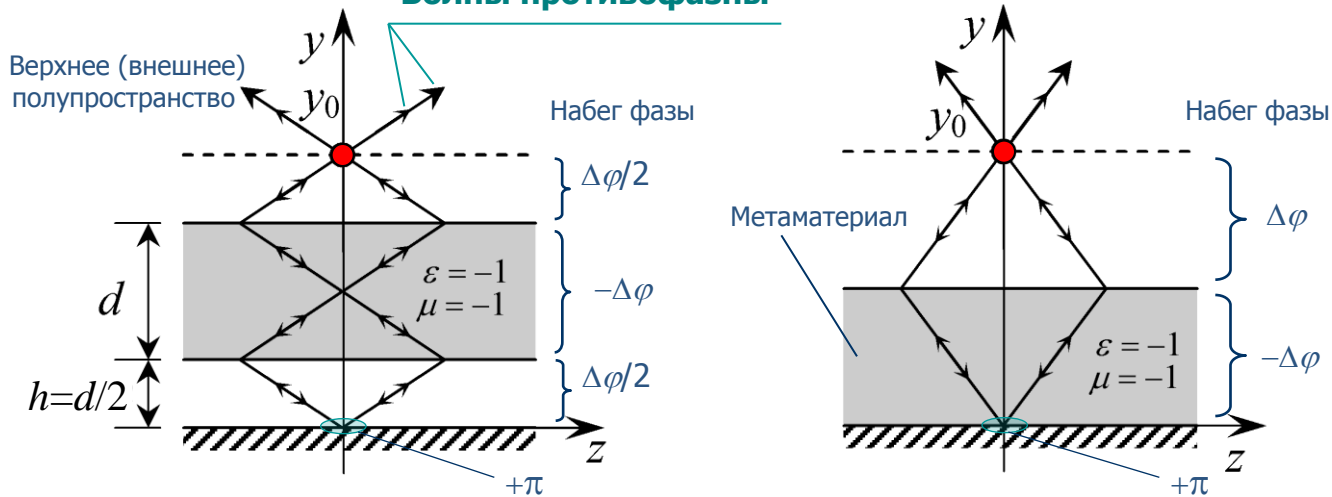
Излучение зеркального источника противофазно по отношению к полю электрического излучателя



С помощью пластины из метаматериала, расположенной между источником и проводящей плоскостью, можно полностью подавить излучение во внешнее полупространство

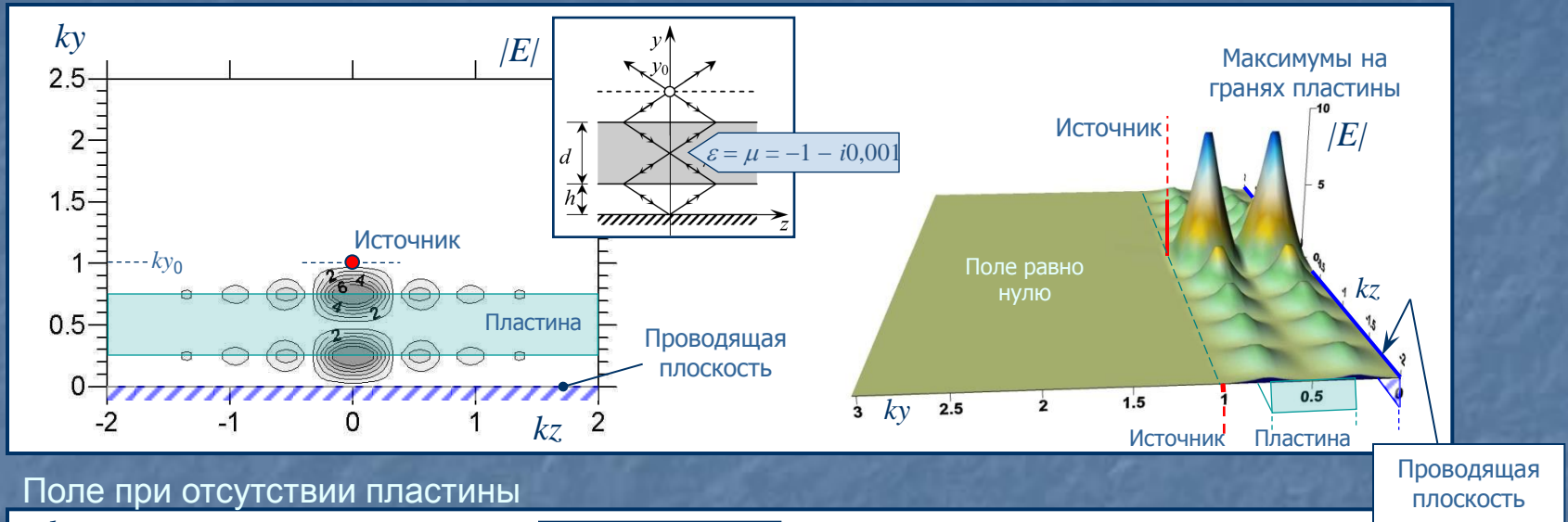


Волны противофазны

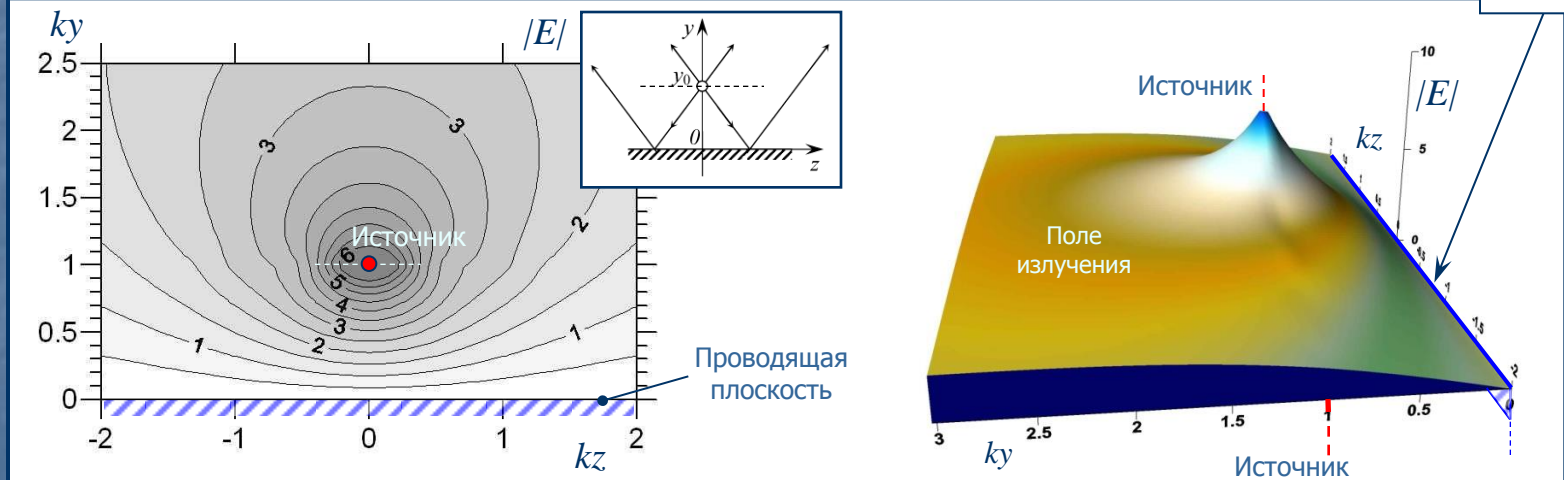


Поле нитевидного источника: результаты расчетов

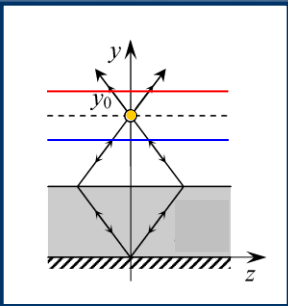
Поле при наличии пластины из метаматериала



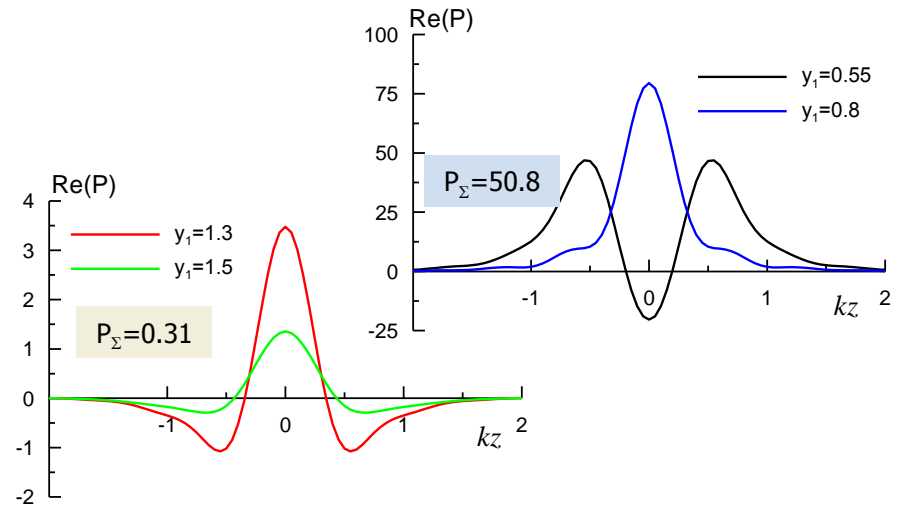
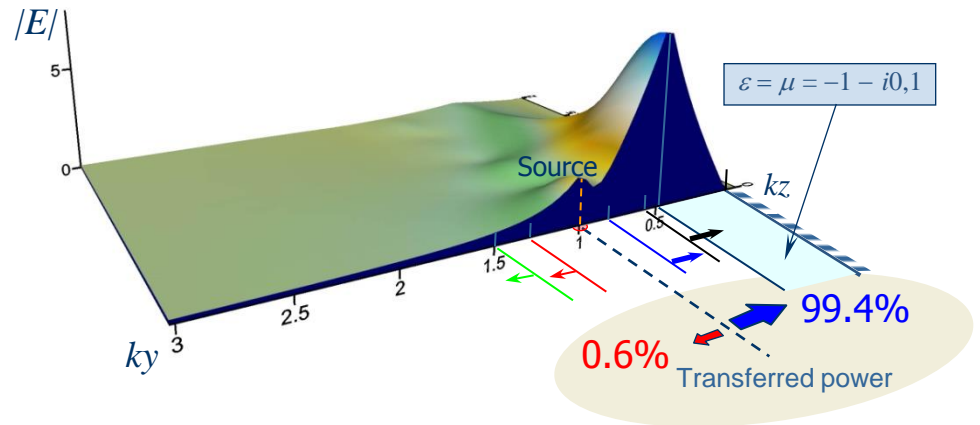
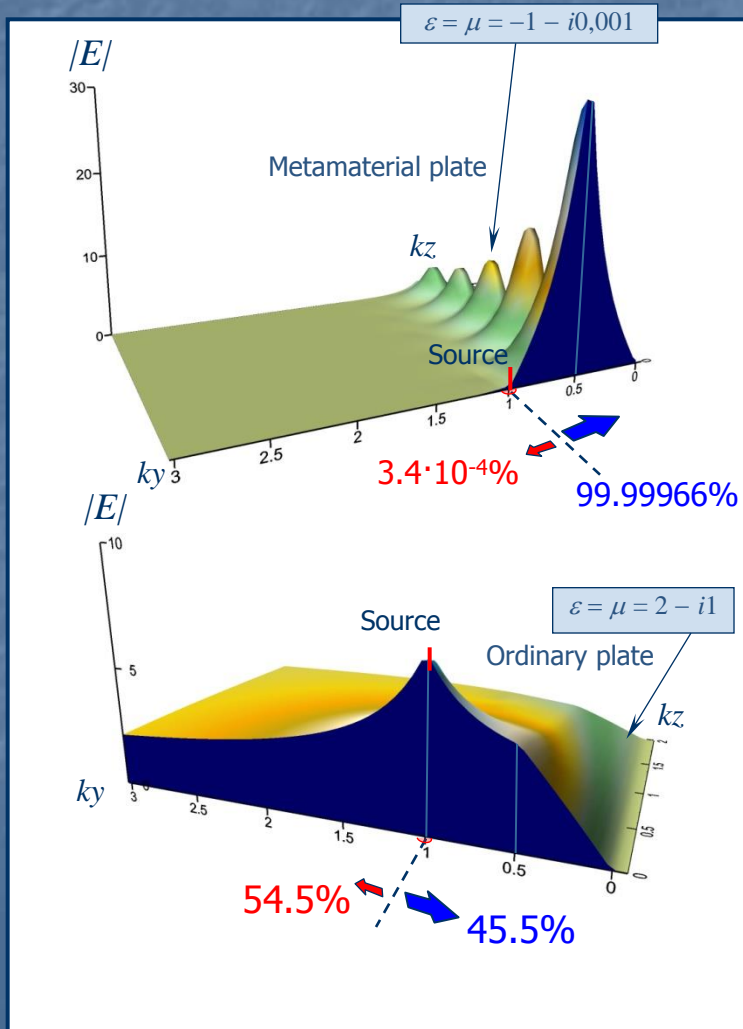
Поле при отсутствии пластины



Перенос энергии поля через плоскости, расположенные выше и ниже источника



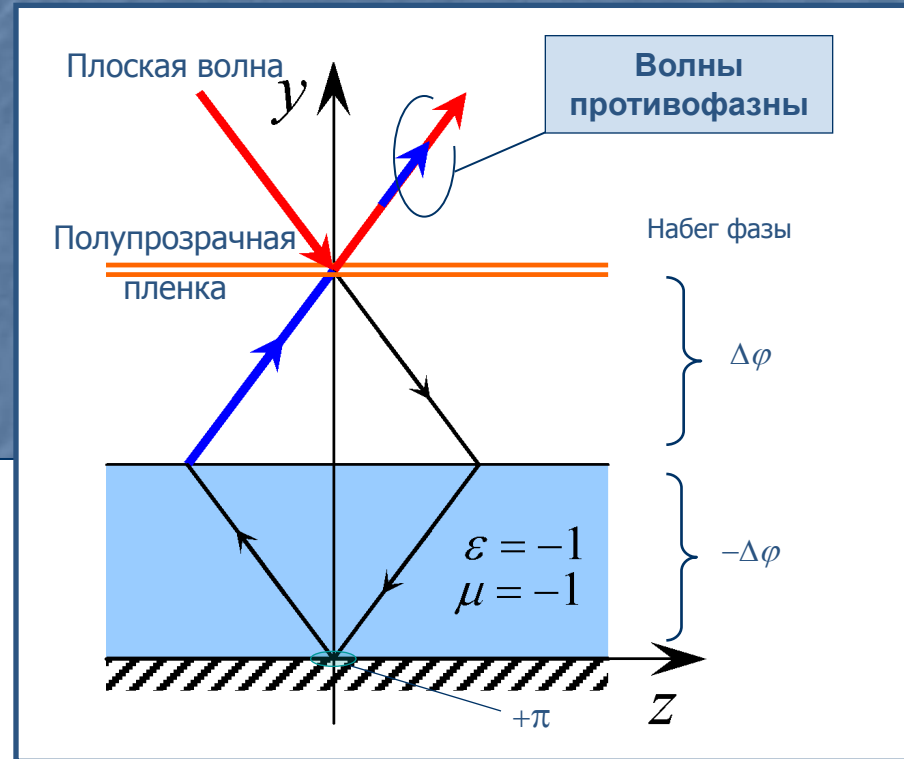
Перенос энергии в присутствии реальной мета-пластины с потерями



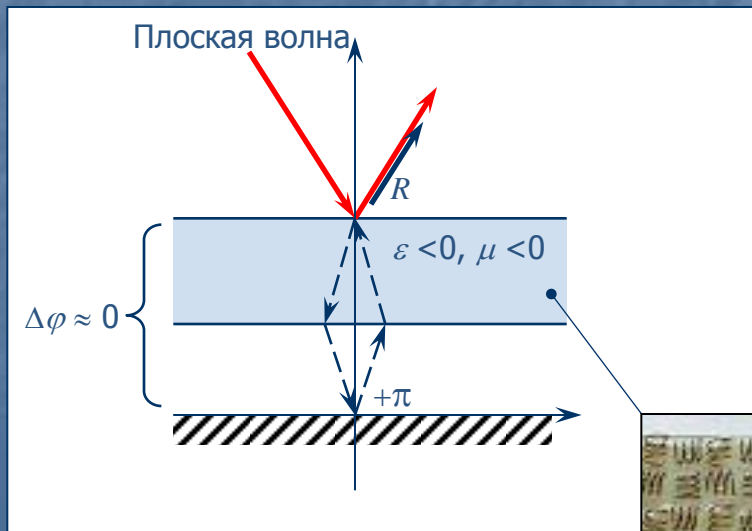
Облучение плоской волной. Поглотитель на основе метаматериала

Можно создать тонкие покрытия с широким угловым диапазоном

Поглотитель энергии плоской волны



Прием проектирования поглотителя



Метаматериал



A.N. Lagarkov, V.N. Kisel, V.N. Semenenko, *PIER Letters*, **1**, 35-44 (2008)

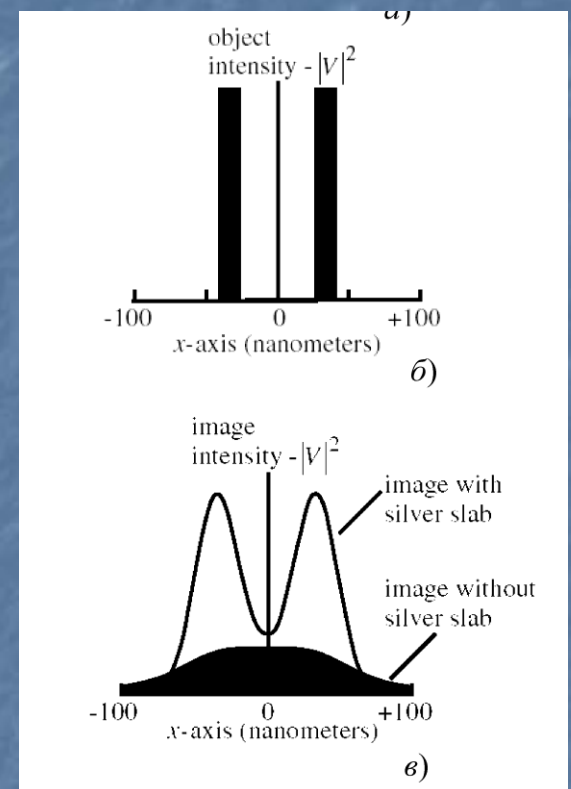
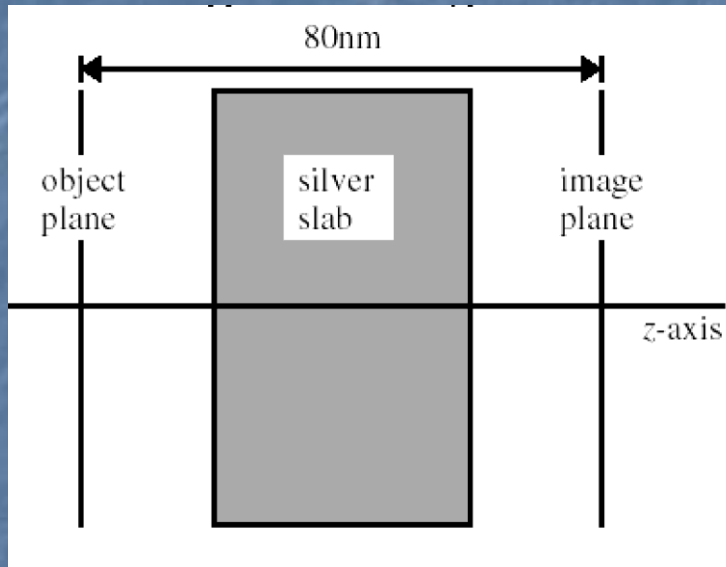
Сверхразрешение

Negative refraction makes a perfect lens

J.B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 3966 (2000).

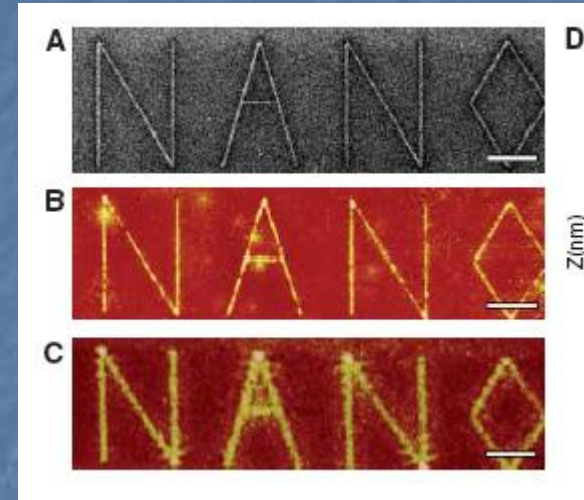
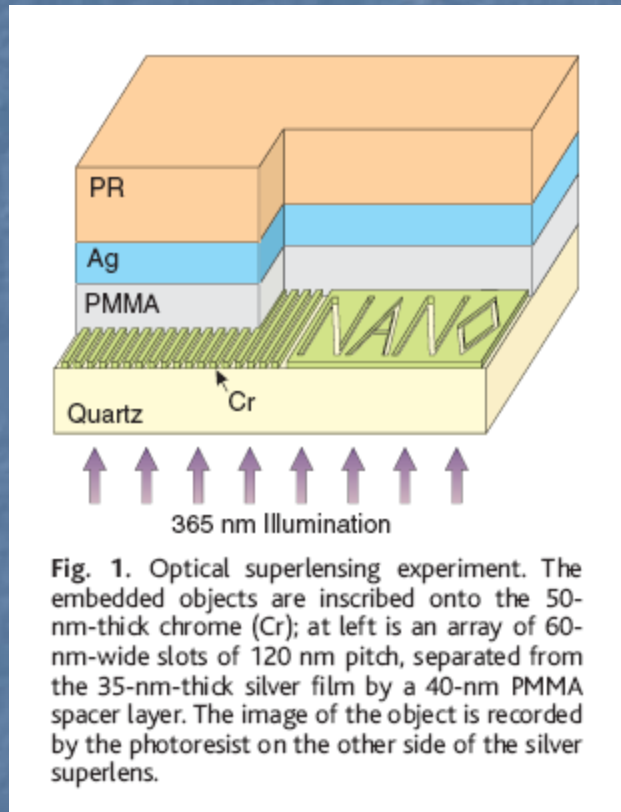
- Линза Веселаго – «суперлинза»
- Теоретический анализ:
критическая роль потерь
- Экспериментальное
подтверждение эффекта
сверхразрешения

Сверхразрешение при отрицательном ϵ



J.B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 3966 (2000).

Фотолитография с использованием тонкой серебряной пленки



An arbitrary object “NANO” was imaged by silver superlens. (A) FIB image of the object. The linewidth of the “NANO” object was 40 nm. Scale bar in (A) to (C), 2 μm . (B) AFM of the developed image on photoresist with a silver superlens. (C) AFM of the developed image on photoresist when the 35-nm-thick layer of silver was replaced by PMMA spacer as a control experiment.

Поле точечного источника

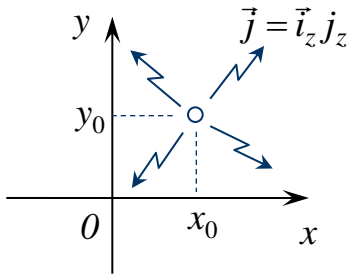
$$\nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\vec{j}$$

$$j = \delta(r') \Rightarrow A = G(r, r')$$

$$G(r, r') = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\xi_1(x-x') - i\xi_2(y-y') - i\xi_3(z-z')}}{\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2 - k^2} d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-ikR}}{R}$$

Двухмерная задача
(излучение нити тока)

$$E_z \cong A_z = G(x, y)$$



$$G(x, y) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{e^{-i\xi(x-x_0)} e^{-\sqrt{\xi^2 - k^2}|y-y_0|}}{\sqrt{\xi^2 - k^2}} \right] d\xi =$$

$$= \frac{1}{4\pi} \left(\int_{-\infty}^{-k} [\dots] d\xi + \int_{-k}^k [\dots] d\xi + \int_k^{\infty} [\dots] d\xi \right) = G_e + G_p$$

$$\xi^2 > k^2$$

$$\sqrt{\xi^2 - k^2} > 0$$

Evanescent modes

$$\xi^2 < k^2$$

$$\sqrt{\xi^2 - k^2} = i\sqrt{k^2 - \xi^2}$$

Propagating modes

$$\xi^2 > k^2$$

$$\sqrt{\xi^2 - k^2} > 0$$

Evanescent modes

Поле нитевидного источника, расположенного в начале координат

$x_0 = y_0 = 0$ (источник – в начале координат):

$$G_p = \frac{-i}{4\pi} \int_{-k}^k \left[\frac{e^{-i\xi x} e^{-\sqrt{k^2 - \xi^2} |y|}}{\sqrt{k^2 - \xi^2}} \right] d\xi$$

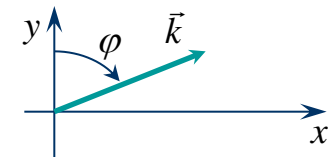
Замена переменной интегрирования:

$$\xi = k \sin \varphi; \quad d\xi = k \cos \varphi d\varphi$$

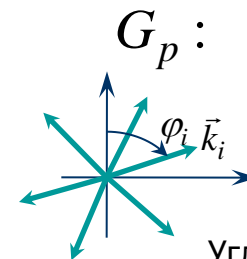
$$\sqrt{k^2 - \xi^2} = k \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} = \pm k \cos \varphi$$

$$G_p = \mp \frac{i}{4\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{e^{-ikx \sin \varphi} e^{\mp iky \cos \varphi}}{\cancel{\cos \varphi}} \cancel{\cos \varphi} d\varphi$$

$$e^{-ik(x \sin \varphi + y \cos \varphi)} :$$



Плоская волна



Угловой спектр плоских волн

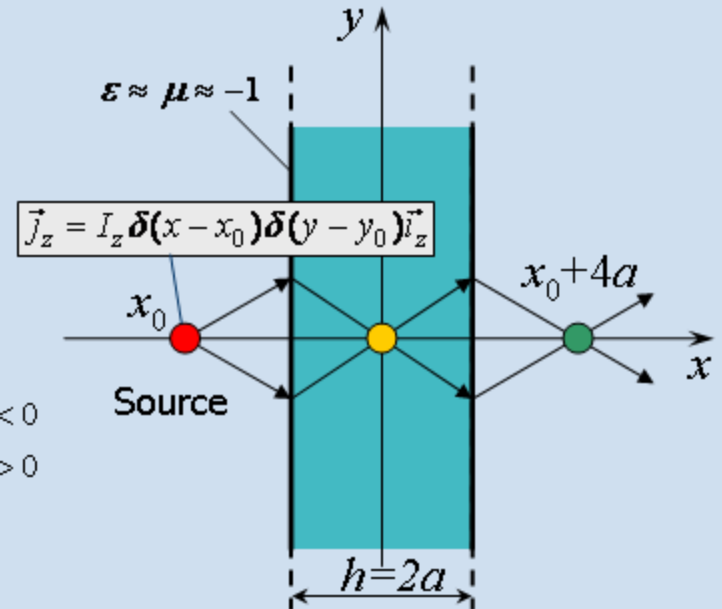
Representation of the fields of filamentary source

$$\vec{A}^i(x, y, z) = \int_V \vec{j}(x', y', z') G(x, y, z, x', y', z') dV'$$

$$G(x, y, z, x', y', z') = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-i\xi_1(x-x') - i\xi_2(y-y'))}{\xi_1^2 + \xi_2^2 - k^2} d\xi_1 d\xi_2$$

$$k^2 = \omega^2 \epsilon_a \mu_a$$

$$G(x, y, z, x', y', z') = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-i\xi(y-y') \pm \sqrt{\xi^2 - k^2}(x-x'))}{\sqrt{\xi^2 - k^2}} d\xi, \quad \begin{cases} x-x' < 0 \\ x-x' > 0 \end{cases}$$



Evanescent modes: $\xi^2 > k^2$

Propagating modes: $\xi^2 < k^2$

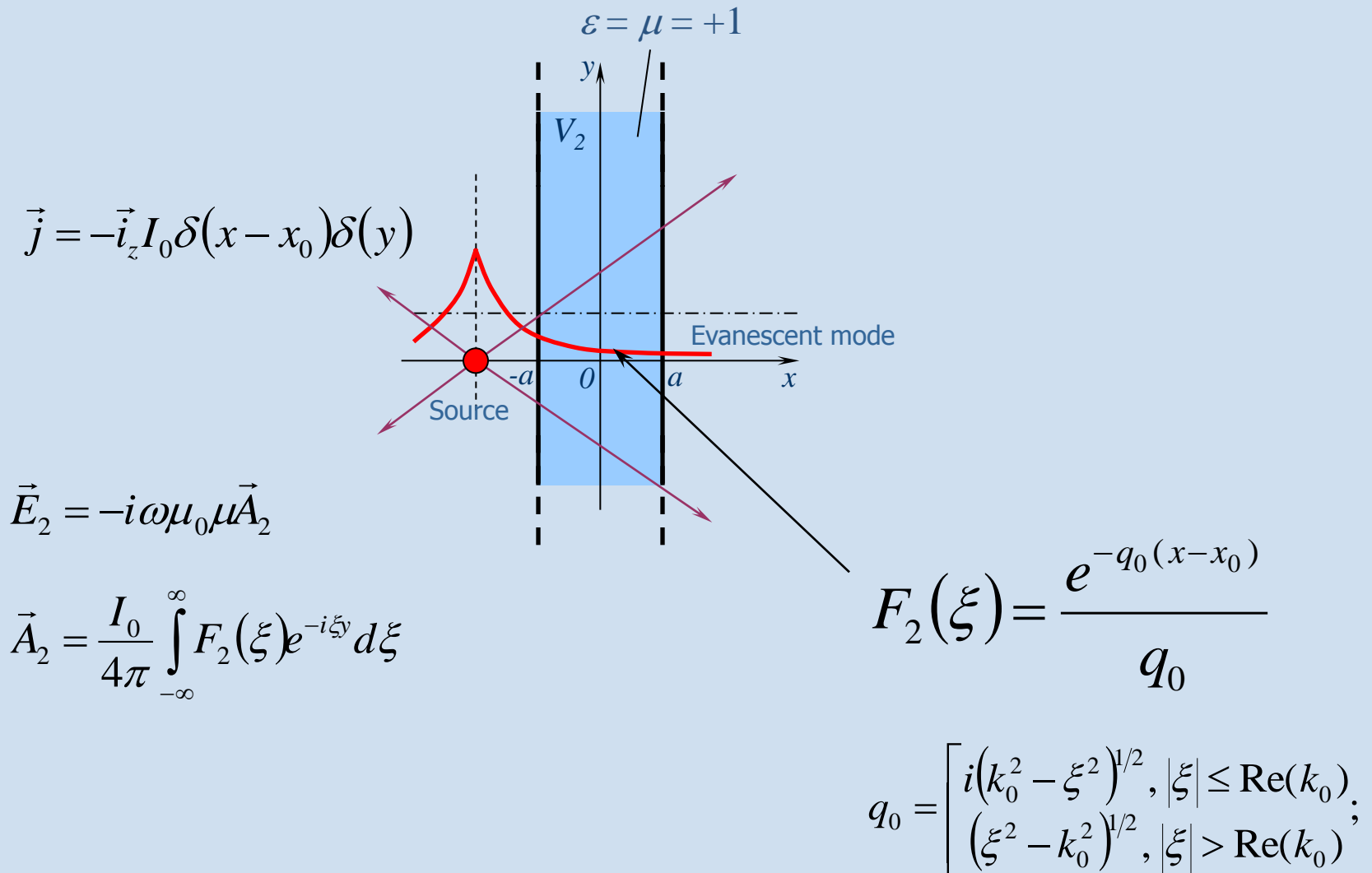
Incident field:

$$\vec{A}^i = \frac{I_z}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-i\xi(y-y_0) \pm \sqrt{\xi^2 - k^2}(x-x_0))}{\sqrt{\xi^2 - k^2}} d\xi$$

Field at $x > a$:

$$A = \frac{I_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-i\xi y) F(\xi) d\xi$$

Decay of the evanescent modes

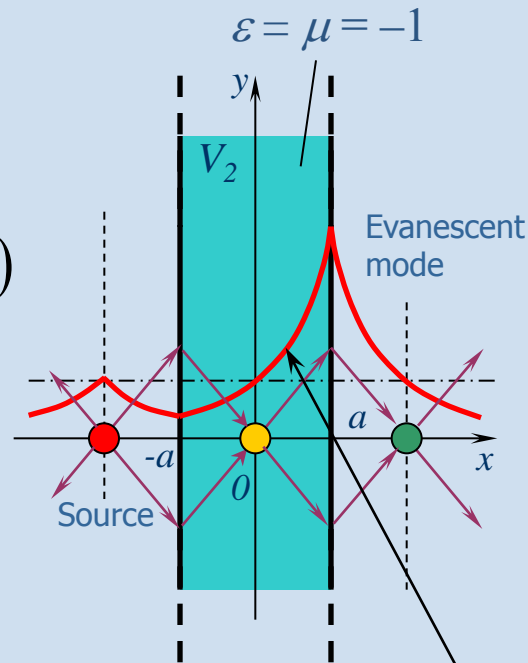


Growth of the evanescent modes

$$\vec{j} = -i_z I_0 \delta(x - x_0) \delta(y)$$

$$\vec{E}_2 = -i\omega\mu_0\mu\vec{A}_2$$

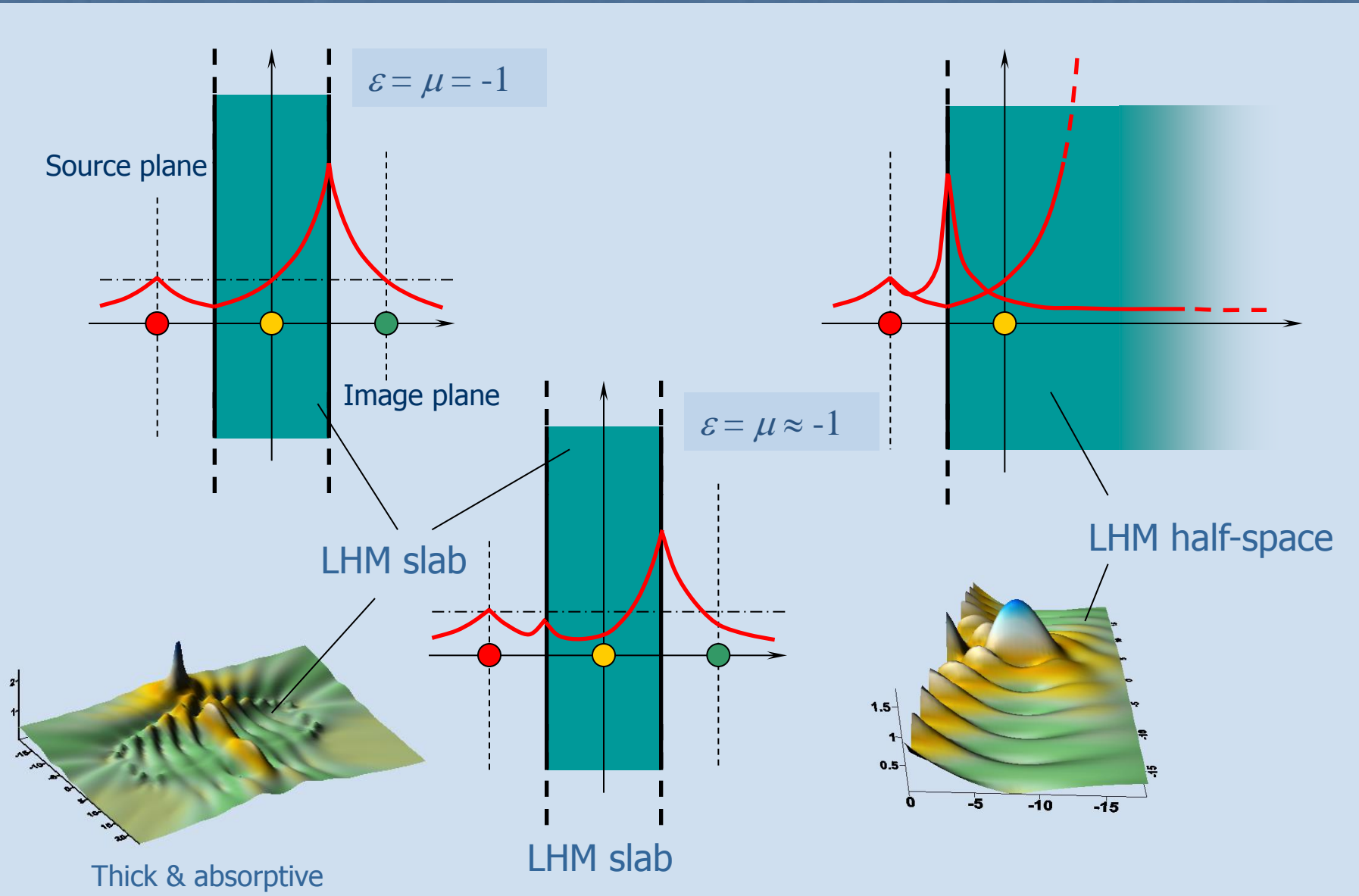
$$\vec{A}_2 = \frac{I_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_2(\xi) e^{-i\xi y} d\xi$$



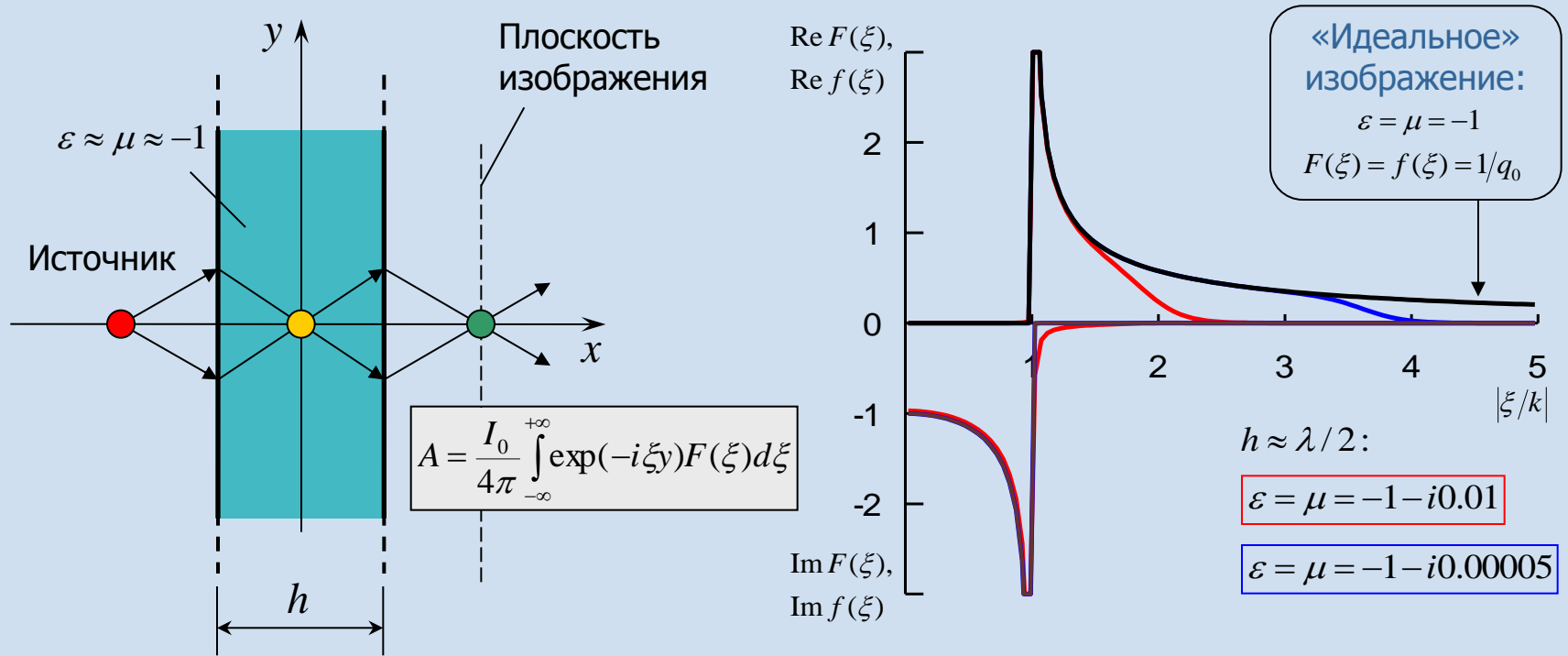
$$F_2(\xi) = -\frac{e^{q_0(x+2a+x_0)}}{q_0}$$

$$q_0 = \begin{cases} i(k_0^2 - \xi^2)^{1/2}, & |\xi| \leq \text{Re}(k_0); \\ (\xi^2 - k_0^2)^{1/2}, & |\xi| > \text{Re}(k_0); \end{cases}$$

Evanescent modes nearby LHM slab and half-space



Ограничения на качество фокусировки электромагнитного поля



Спектральная плотность прошедшего поля, рассчитанная в плоскости изображения

$$F(\xi) = \frac{-4\mu q \exp(q_0(x_0 - x)) \exp(2aq_0)}{(\mu q_0 - q)^2 \exp(-2aq) - (\mu q_0 + q)^2 \exp(2aq)}$$

$$q_0 = \begin{cases} i(k_0^2 - \xi^2)^{1/2}, & |\xi| \leq \text{Re}(k_0) \\ (\xi^2 - k_0^2)^{1/2}, & |\xi| > \text{Re}(k_0) \end{cases}; \quad q = \begin{cases} i(k^2 - \xi^2)^{1/2}, & |\xi| \leq \text{Re}(k) \\ (\xi^2 - k^2)^{1/2}, & |\xi| > \text{Re}(k) \end{cases}$$

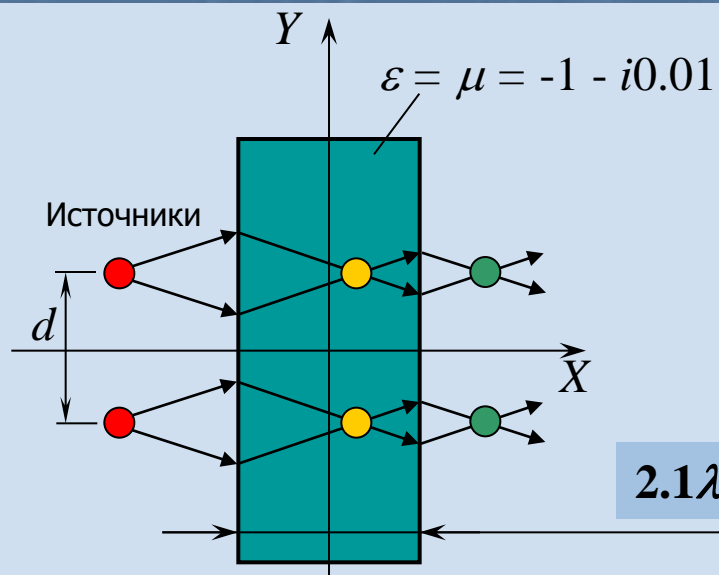
Случай малых потерь

$$\mu = -1, \quad \varepsilon = -1 - i\alpha, \quad \alpha \ll 1$$

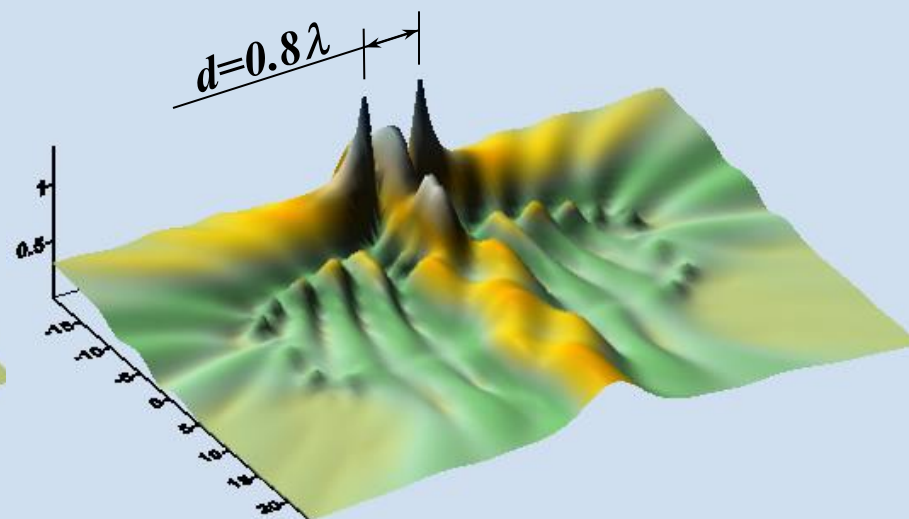
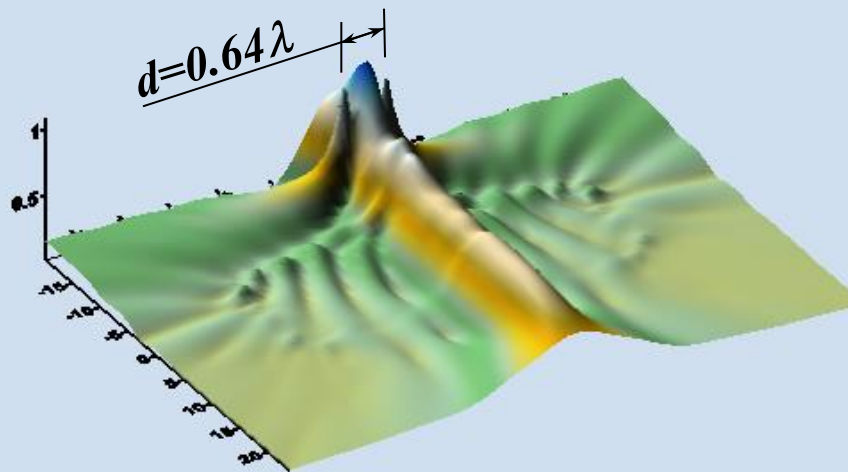
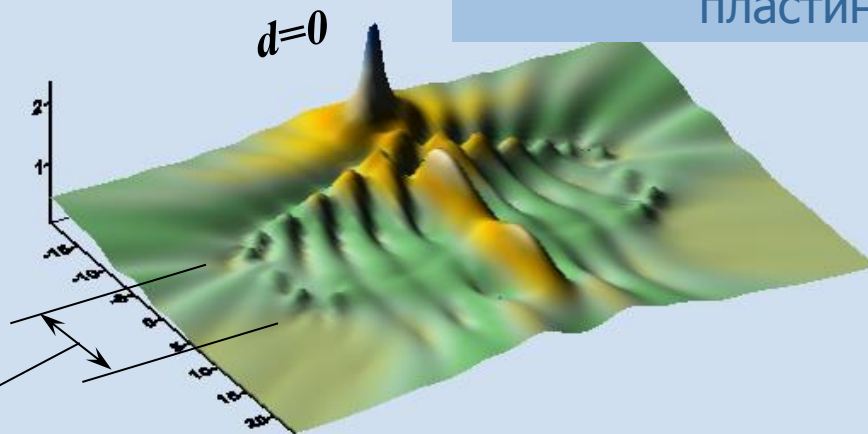
$$F(\xi) \approx f(\xi)(1 + \Delta)^{-1}$$

$$\Delta = \alpha^2 (2q_0)^{-4} \exp(4aq_0)$$

Фокусировка поля пластиной из метаматериала



Случай «толстой»
пластины



Роль потерь в проявлении эффектов сверхразрешения и отрицательного преломления

N.Fang, X.Zhang, Appl. Phys. Lett., **82**, 161 (2003)

D.Smith et al., Appl. Phys. Lett., **82**, 1506 (2003)

C.Ong, X.Rao, Proc.Symp. F. Electromagnetic Materials. Int.Conf. on Materials for Advanced Technologies 2003 (ICMAT-2003). Singapore: World Scientific Publishing Co., 2003. P. 123.

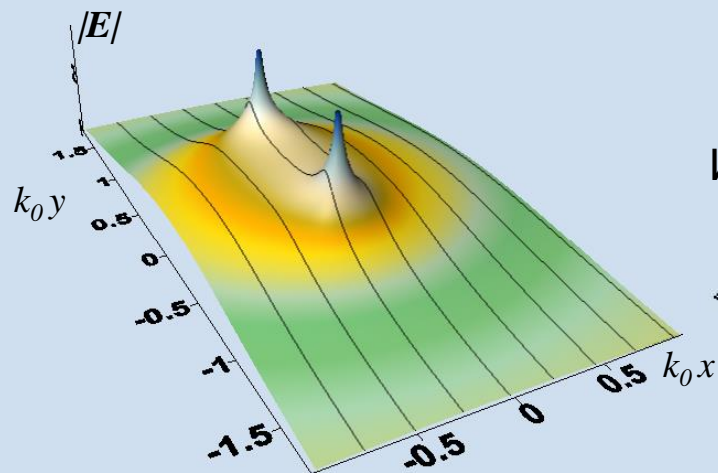
X.Rao, C.Ong, Phys. Rev. E., **68**, 067601 (2003)

V.Kissel, A.Lagarkov. Proc.Symp. F. Electromagnetic Materials. Int.Conf. on Materials for Advanced Technologies 2003 (ICMAT-2003). Singapore: World Scientific Publishing Co., 2003. P.145.

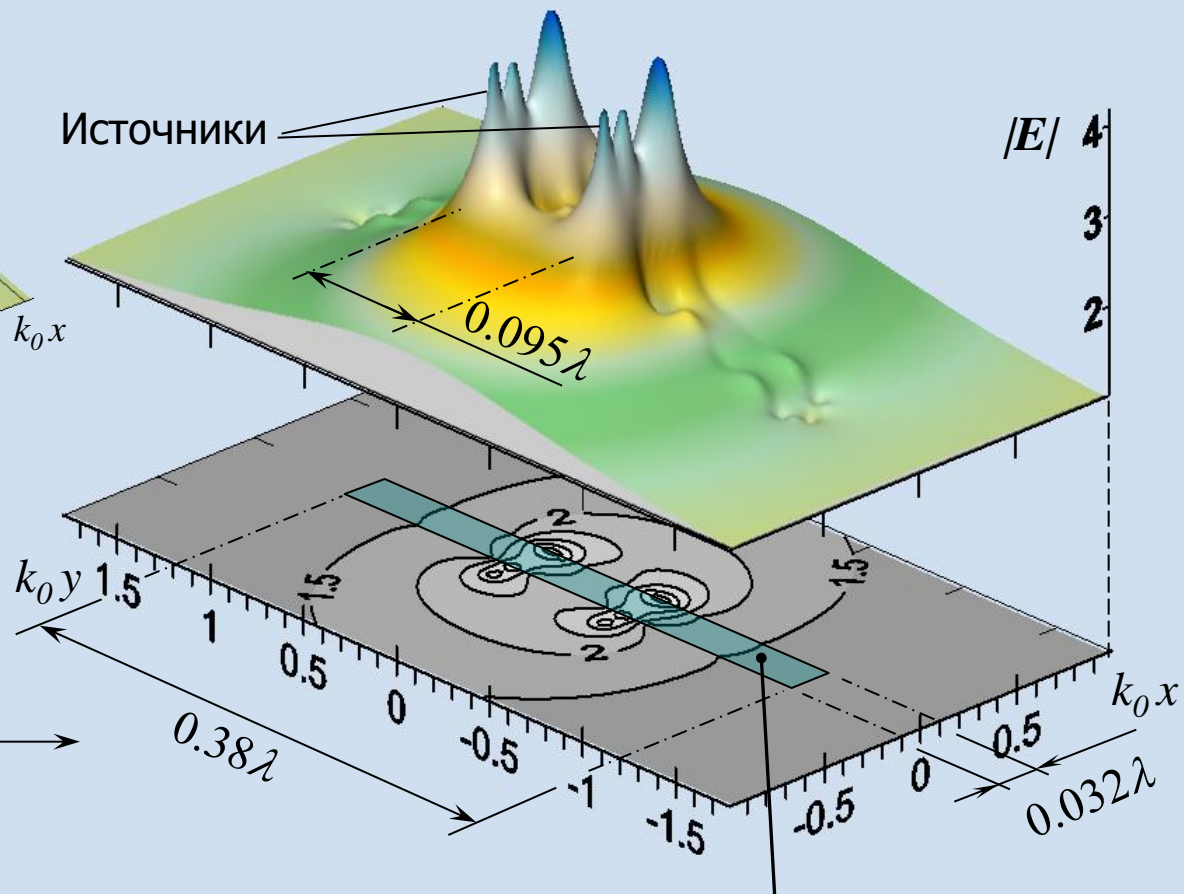
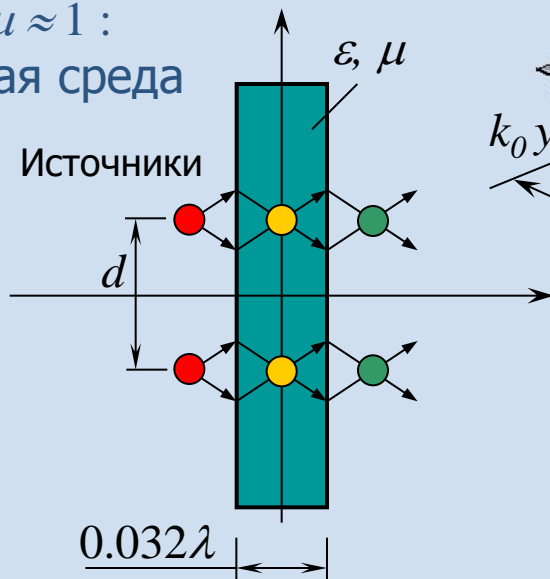
A.Lagarkov, V.Kisel, Dokl. Phys., **49**, 5 (2004)

M. Stockman, Phys. Rev. Lett., **98**, 177404 (2007)

Электродинамическое моделирование Излучение двух нитевидных источников



$\epsilon \approx 1, \mu \approx 1$:
обычная среда



ЛНМ-пластина
 $Re(\epsilon) < 0, Re(\mu) < 0$

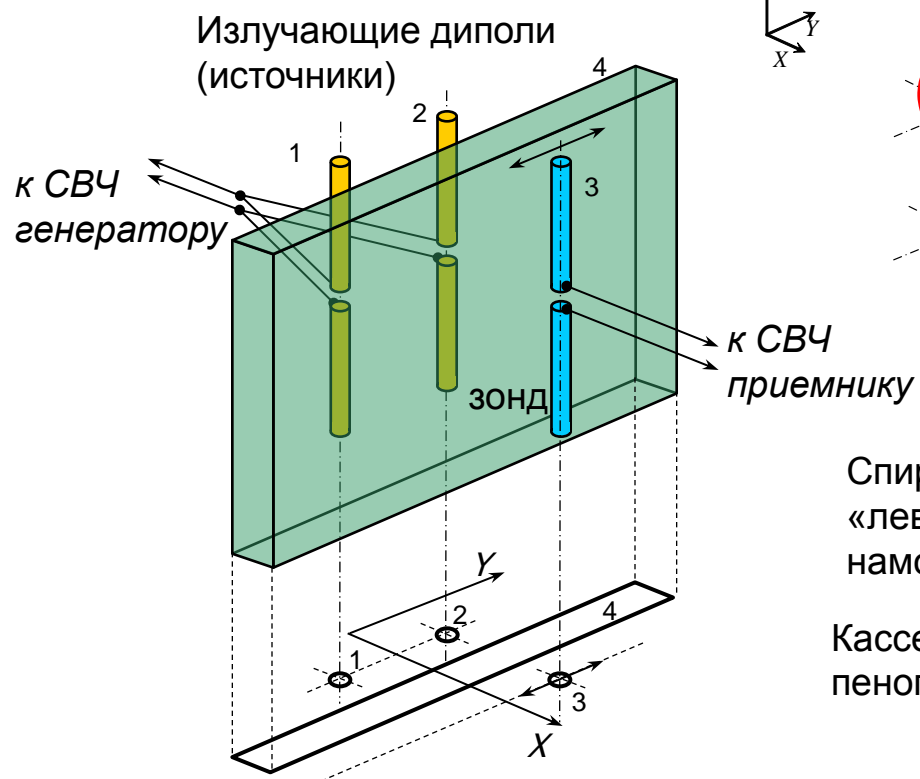
2003 г., ИТПЭ РАН

1. Впервые в специально поставленном эксперименте получено отдельное изображение источников, расстояние между которыми существенно меньше длины волны.
2. Установлены причины, ограничивающие разрешающую способность фокусирующей системы на основе плоской пластины из материалов с отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями.

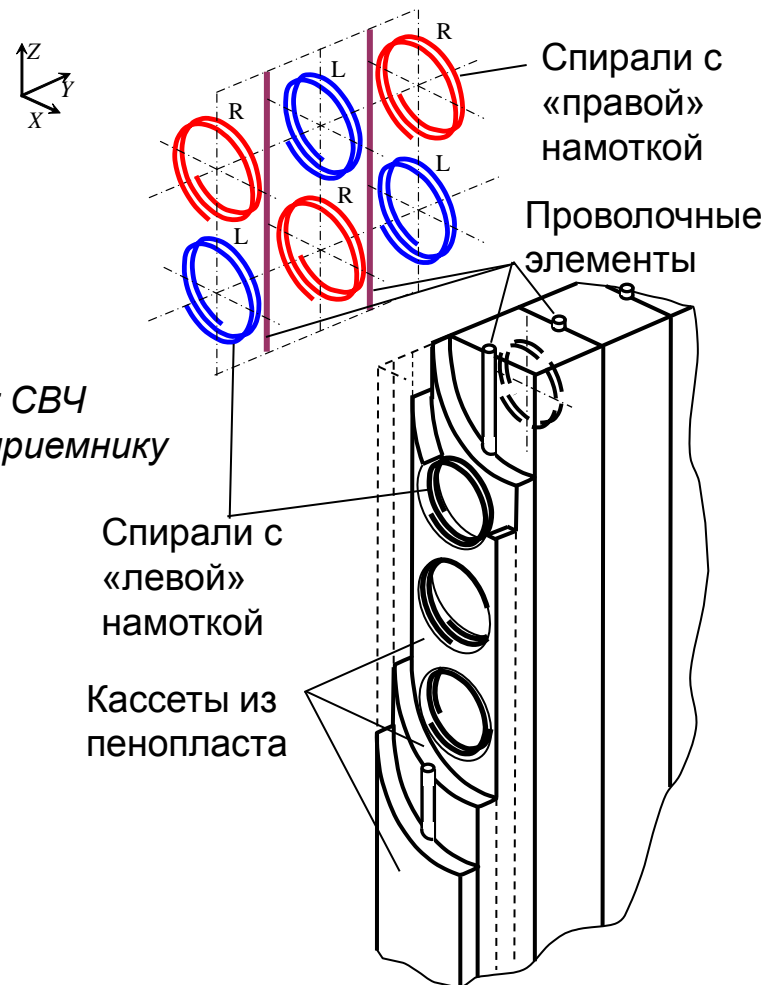
A.N. Lagarkov, V.N. Kissel, Proc. of ICMAT2003, Singapore (2003),
A.N. Lagarkov, V.N. Kissel, *Phys.Rev.Lett.*, **92**, 077401 (2004)

Эксперимент в диапазоне СВЧ

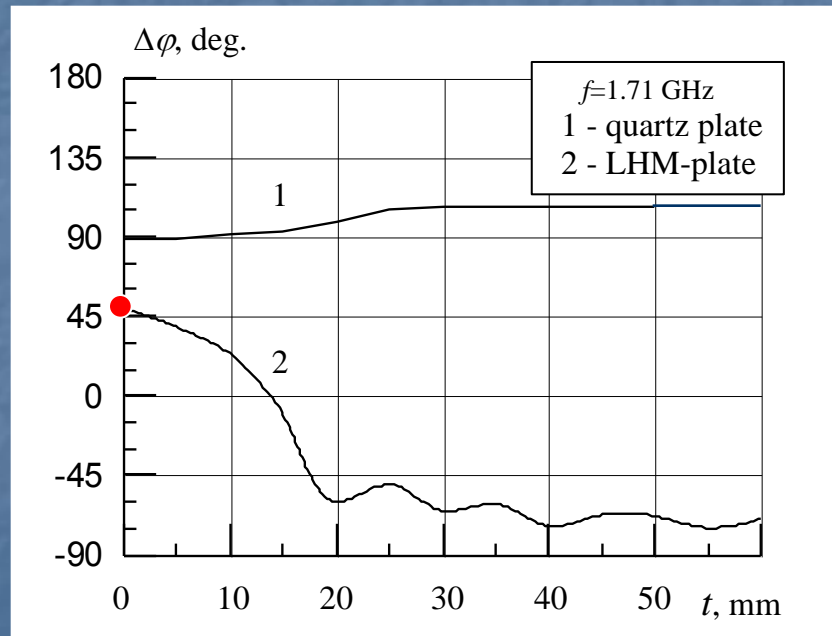
Размещение пластины в составе установки



Структура пластины из LHM композита

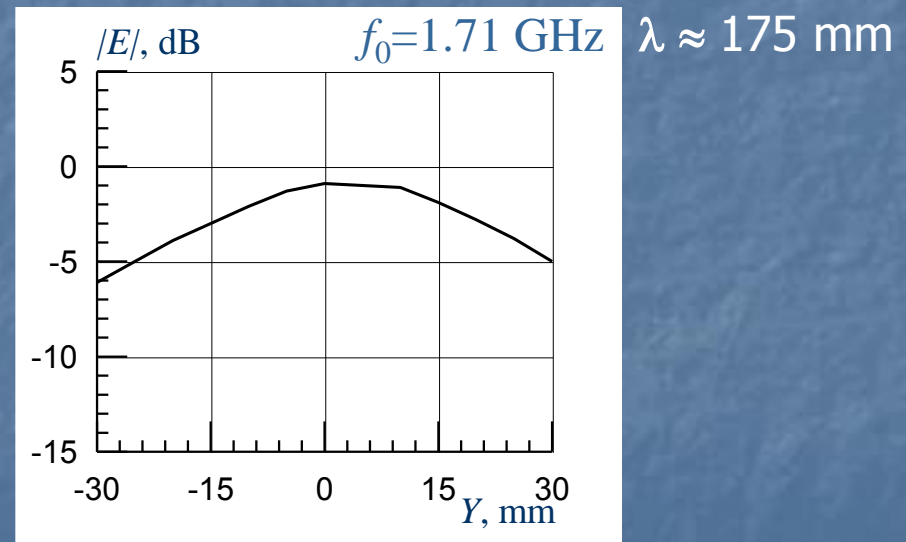
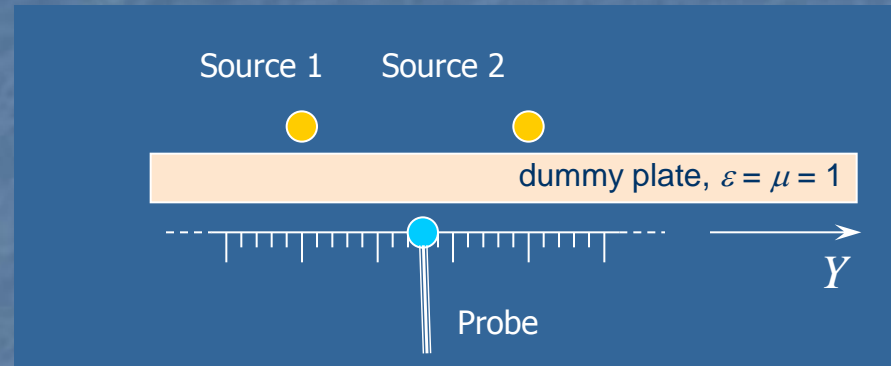
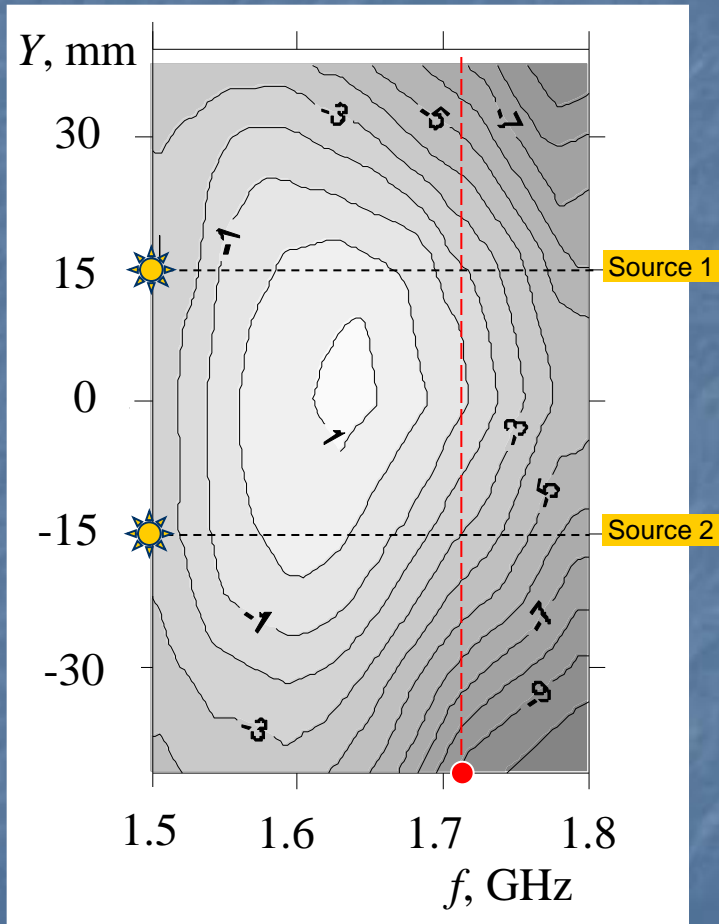


Измерение набега фазы

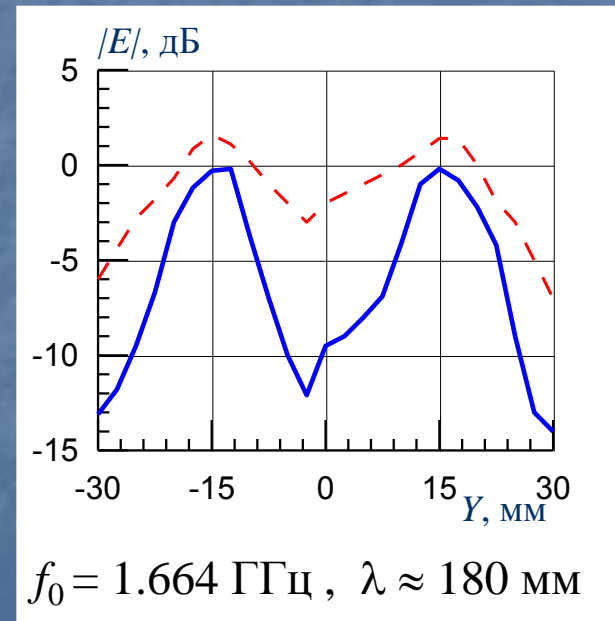
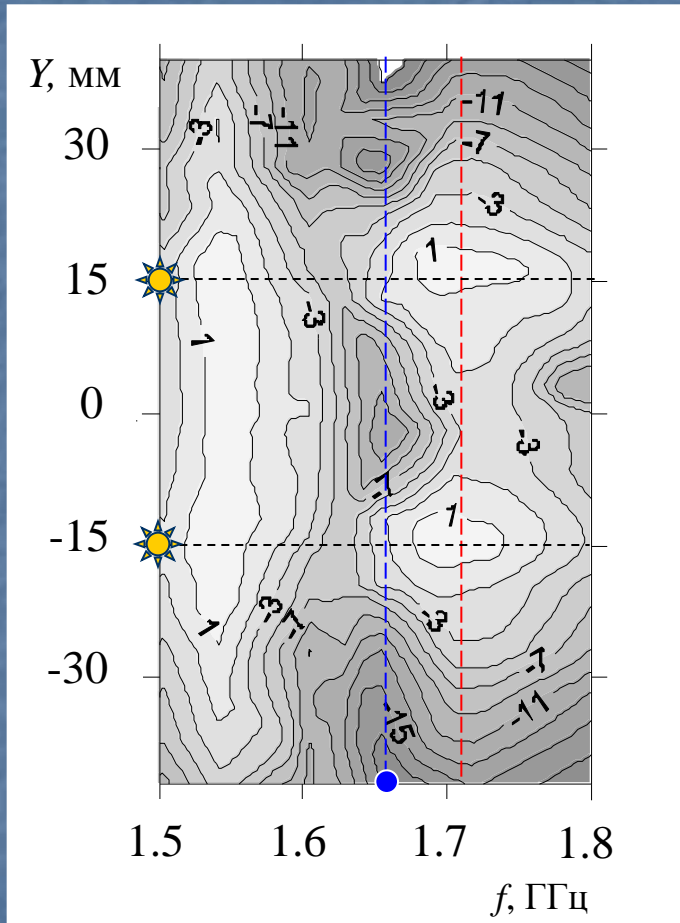


Measurement of the field behind the plate

Case 1: dummy material plate ($\epsilon=\mu=1$)



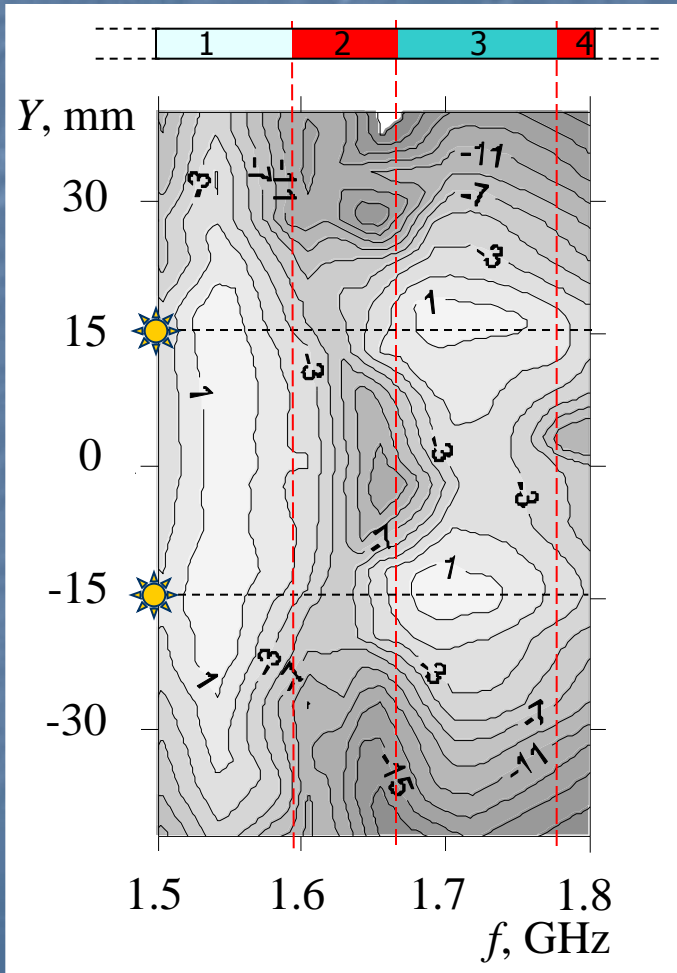
Измерение поля за ЛНМ-пластиной



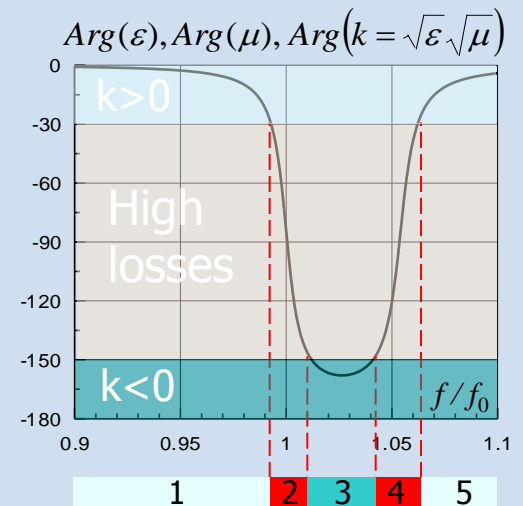
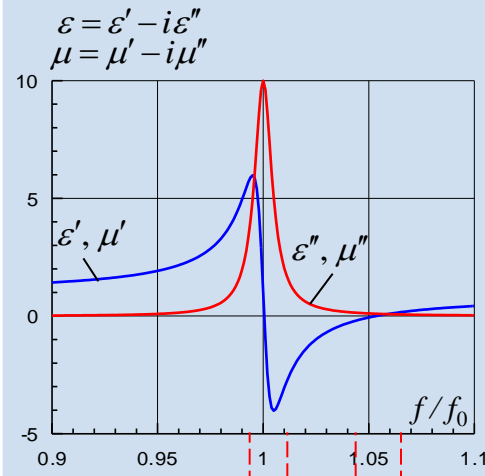
A.N. Lagarkov, V.N. Kissel, *Phys.Rev.Lett.*, **92**, 077401 (2004)
see also Proc. of ICMAT2003, Singapore (2003)

Частотная зависимость коэффициента прохождения

Метаматериал с резонансными включениями



Соответствие теоретическим предпосылкам

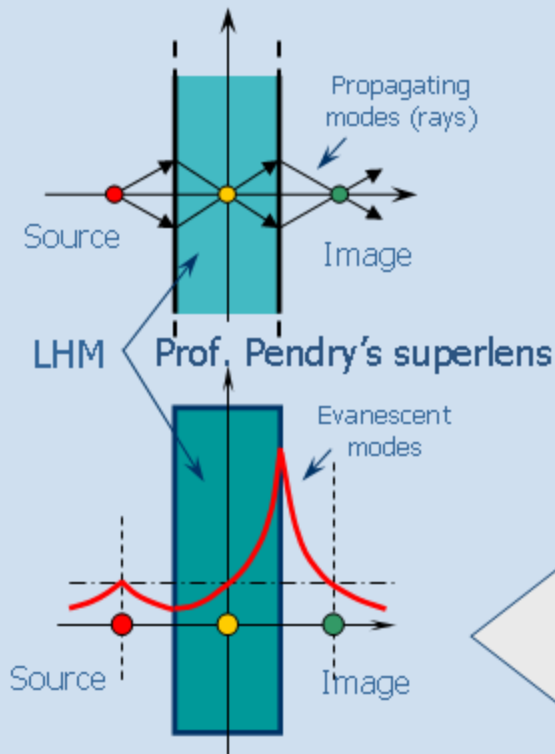


$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ \mu \end{bmatrix} = 1 + \frac{\alpha \tilde{\omega}^2}{1 - \tilde{\omega}^2 - i\beta \tilde{\omega}}; \quad \tilde{\omega} = \omega/\omega_0 = f/f_0; \quad \begin{array}{l} \alpha = 0.1; \\ \beta = 0.01 \end{array}$$

- Каково соответствие между явлениями в реальных образцах метаматериалов (композитов) и процессами в идеальных однородных средах с отрицательными ϵ и μ ?

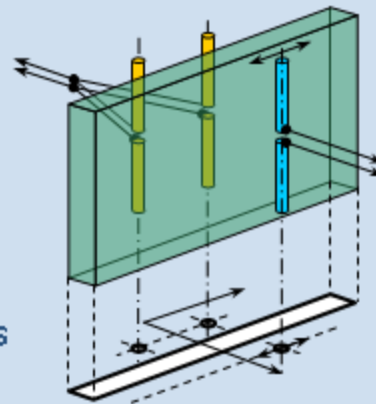
Metamaterials and Superresolution: From Homogenization to Rigorous Approach

Homogenized model

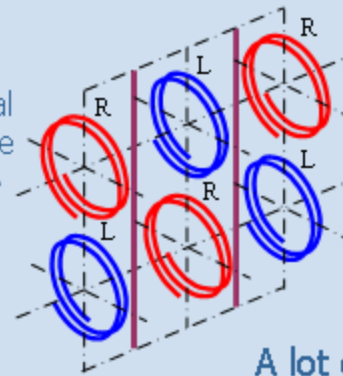


Established phenomena,
terminology etc.

Experimental sample

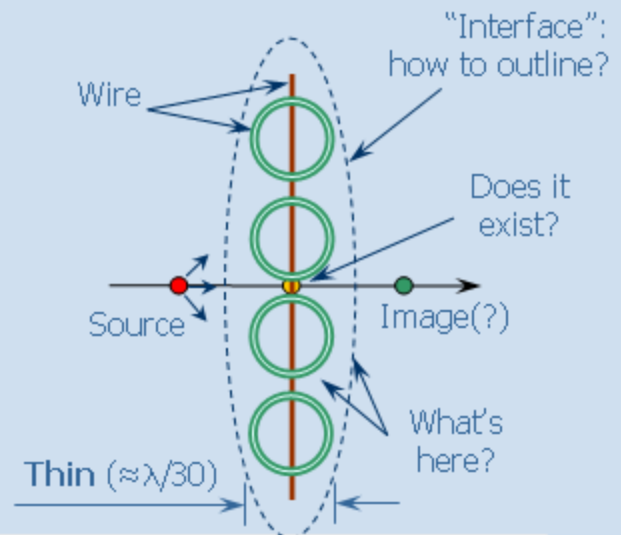


Real structure



More realistic
thin wire model

A lot of questions...



What is the correspondence
between the models?



How an image appears?
What is the "LHM-free space" interface"?
What should replace a ray representation?

Интегральное уравнение относительно тока в проводниках

Для большинства метаматериалов использование материальных уравнений
 $D = \epsilon \epsilon_0 E$, $B = \mu \mu_0 H$ сомнительно

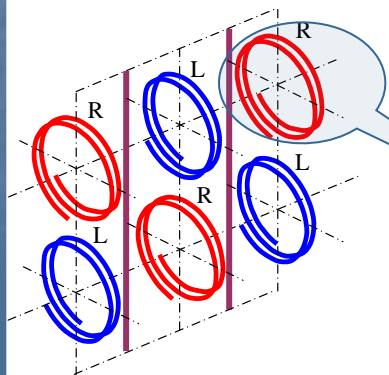
Уравнение Поклингтона

$$ZI + i\omega\mu_0 \int_L I \left(\vec{v} \cdot \vec{v}' - \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial v \partial v'} \right) \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} dl = \vec{v} \cdot \vec{E}^i$$

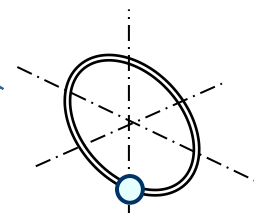
$$L = \sum L_i$$

Учет конечной проводимости проволоки
и скин-эффекта:

$$Z = \frac{1 + i}{2\pi a \sigma d}$$

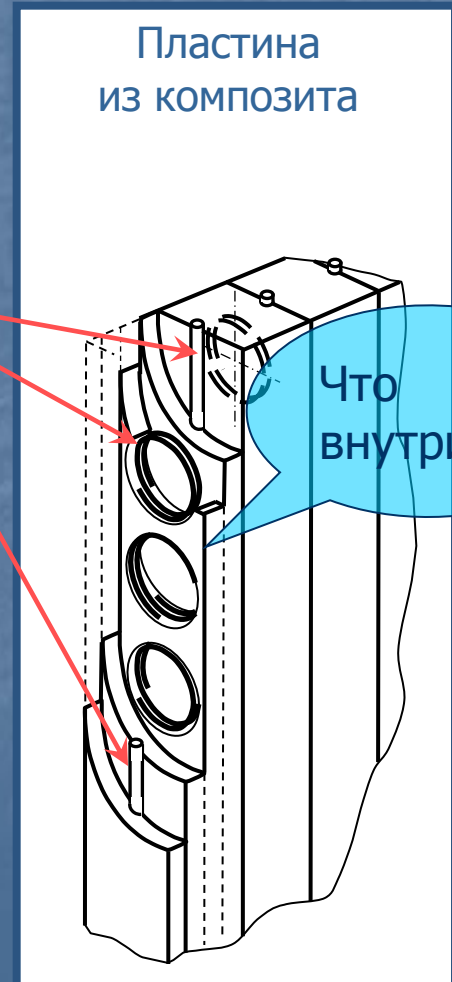


Переход от спирали к кольцу с
нагрузкой:



Эквивалентный импеданс (емкость)

Пластина
из композита

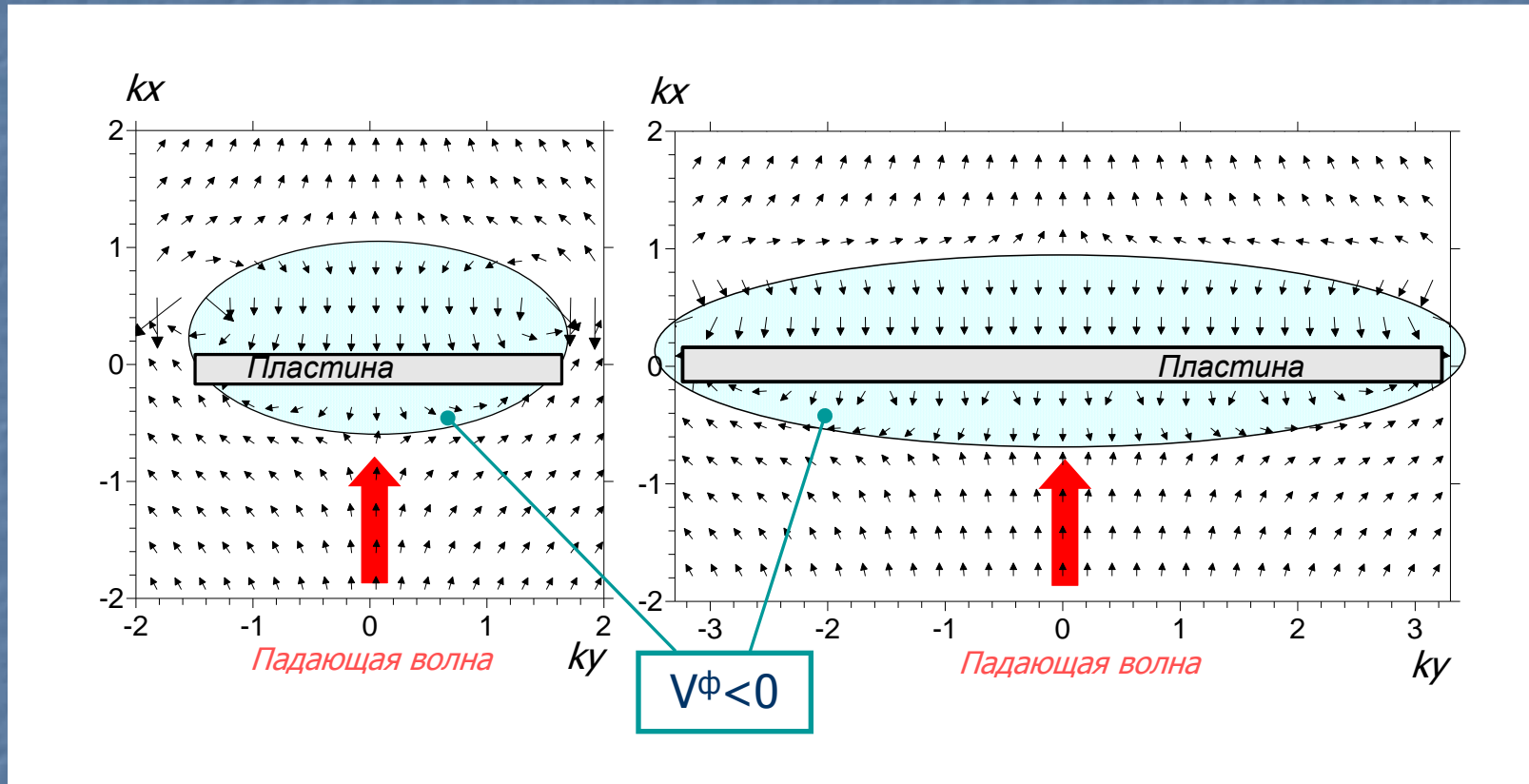


Что
внутри ?



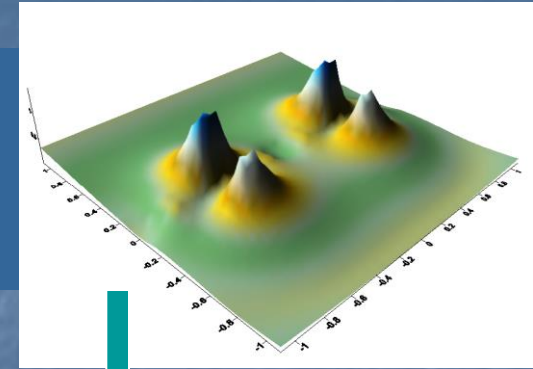
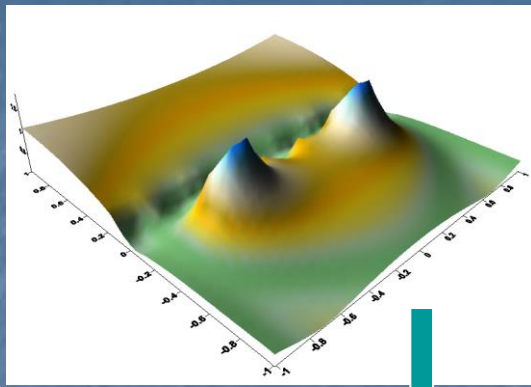
Падение плоской волны на пластины из метаматериала

Фазовая скорость волны

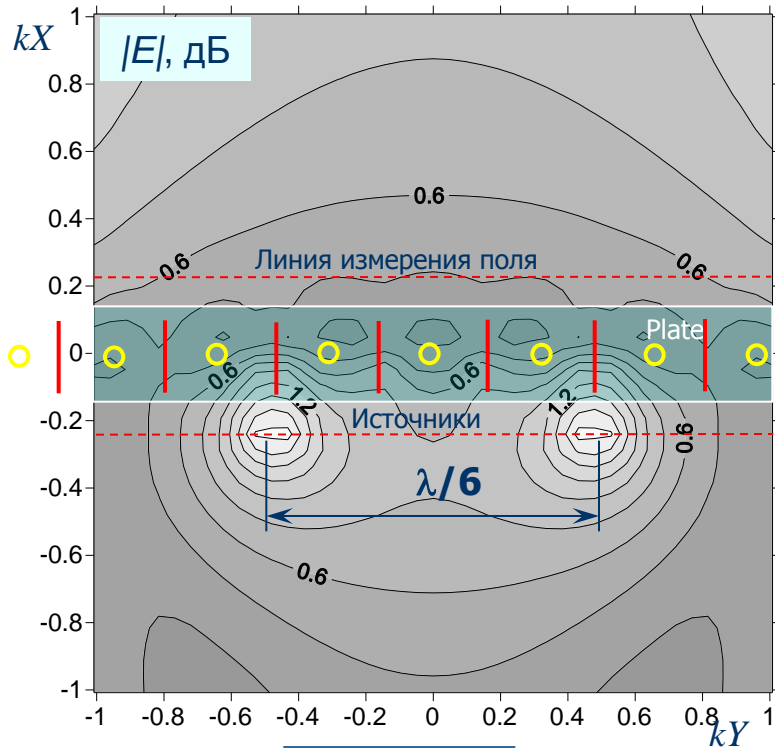


Увеличение ширины пластины не приводит к росту ее эффективной толщины

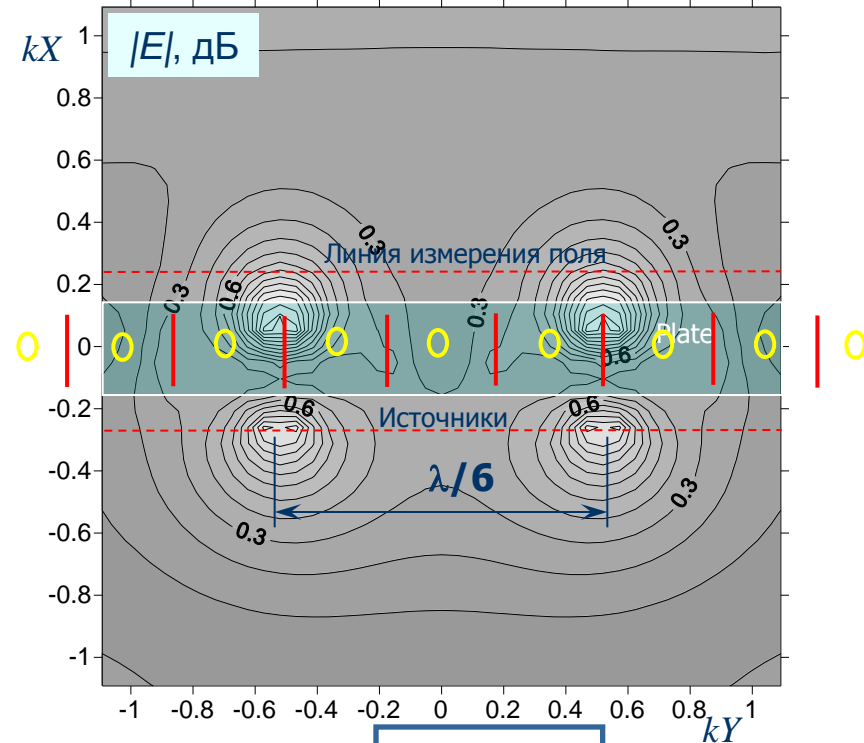
Поле, рассчитанное вблизи экспериментальной пластины



$\lambda \approx 180$ мм



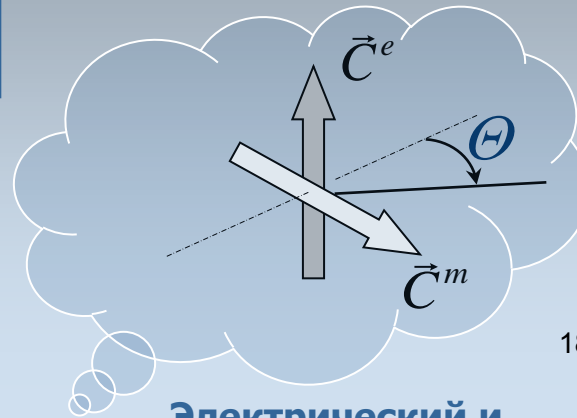
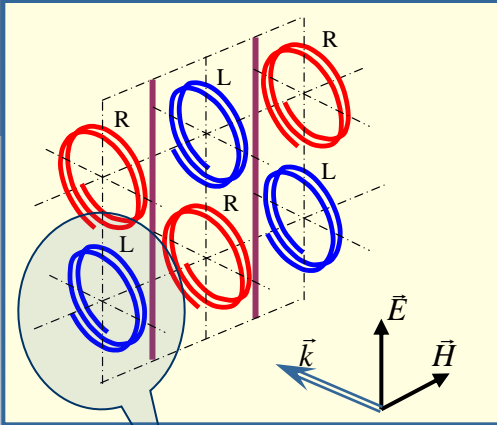
$f = 0.96 f_0$



$f = 1.04 f_0$

Свойства системы «Линейный проводник + кольцо»

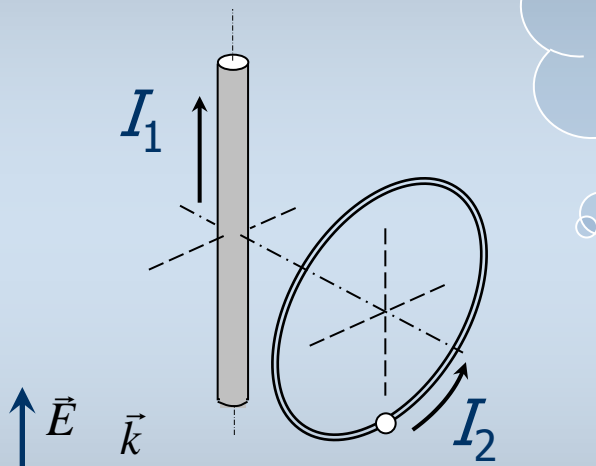
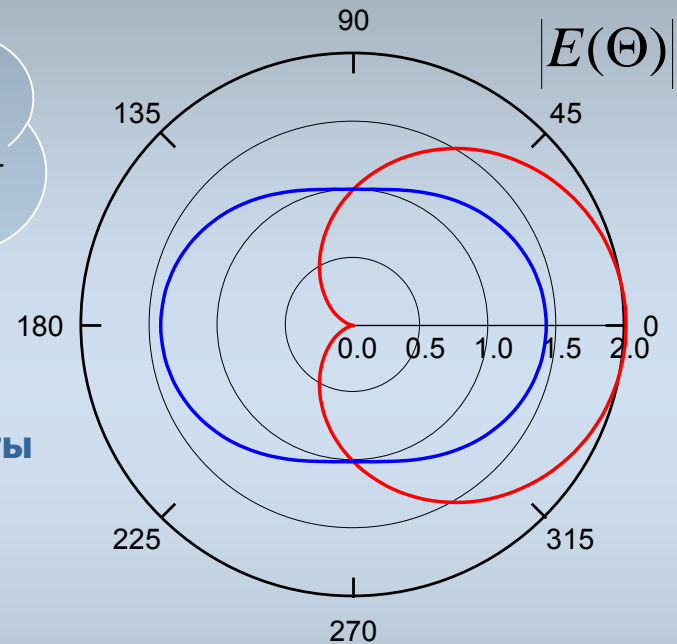
Зависимость поля от разности фаз возбуждающих токов



Электрический и магнитный моменты

$$\vec{C}^e \sim I_1 \sim \vec{E}$$

$$\vec{C}^m \sim I_2 \sim \vec{H}$$



Элемент системы

РГ: $|\text{Arg}(E) - \text{Arg}(H)| = 0^\circ$

ЗГ: $|\text{Arg}(E) - \text{Arg}(H)| = 90^\circ$

Возбуждение полем гармоник

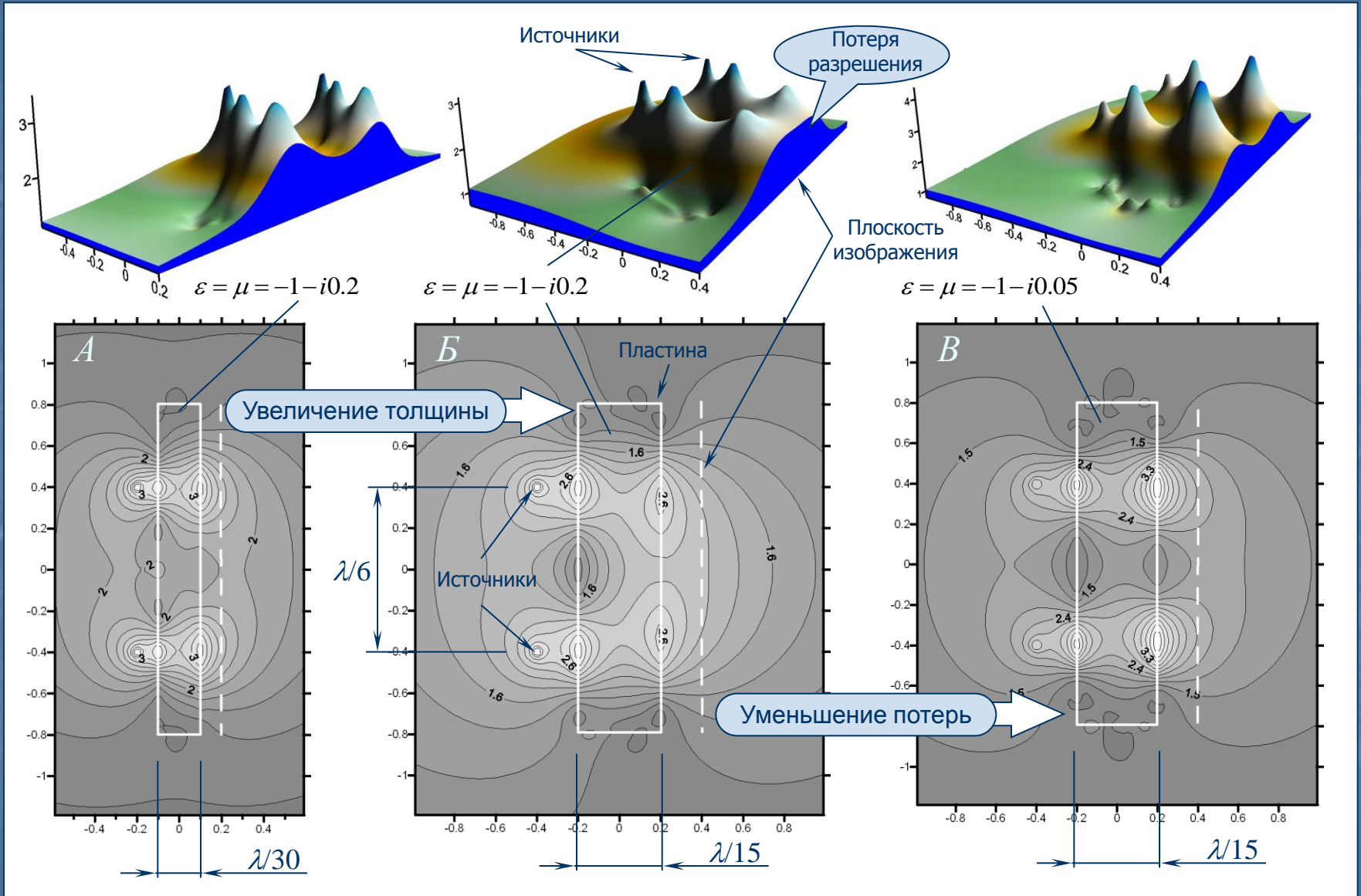
- *затухающих*
- *распространяющихся*

$$\text{Arg}(\vec{C}^e) - \text{Arg}(\vec{C}^m) = \begin{cases} 0^\circ & \text{— (red line)} \\ 90^\circ & \text{— (blue line)} \end{cases}$$

Другие задачи, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение

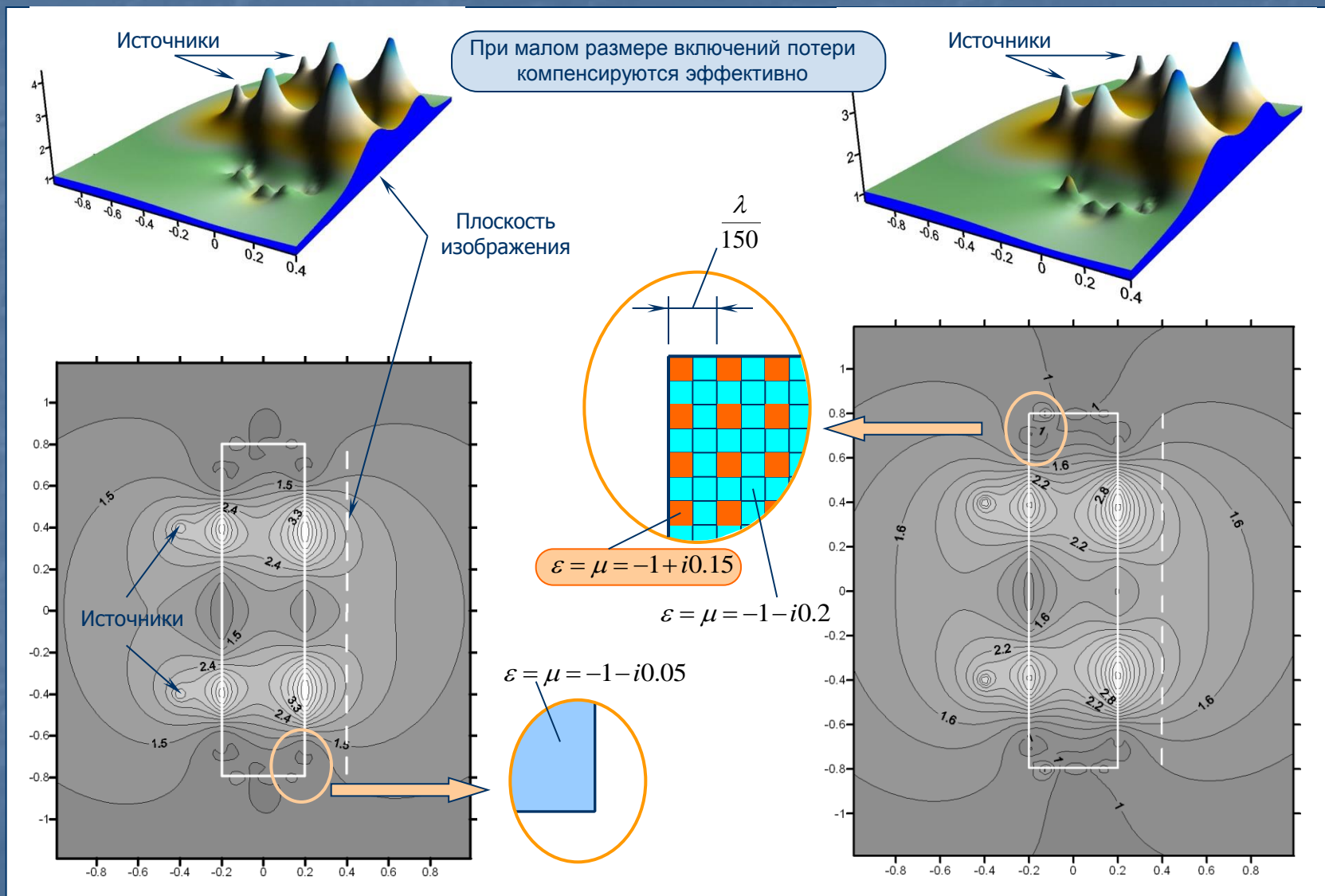
- Возможность компенсации потерь в метаматериалах при помощи активных сред
- Поглощение энергии всенаправленного источника
- Беспроводная передача энергии в системах с метаматериалами

Поле вблизи пластины из метавещества с потерями



Можно ли с помощью «активных» включений компенсировать потери в пластине «Б» и получить качество «В» ?

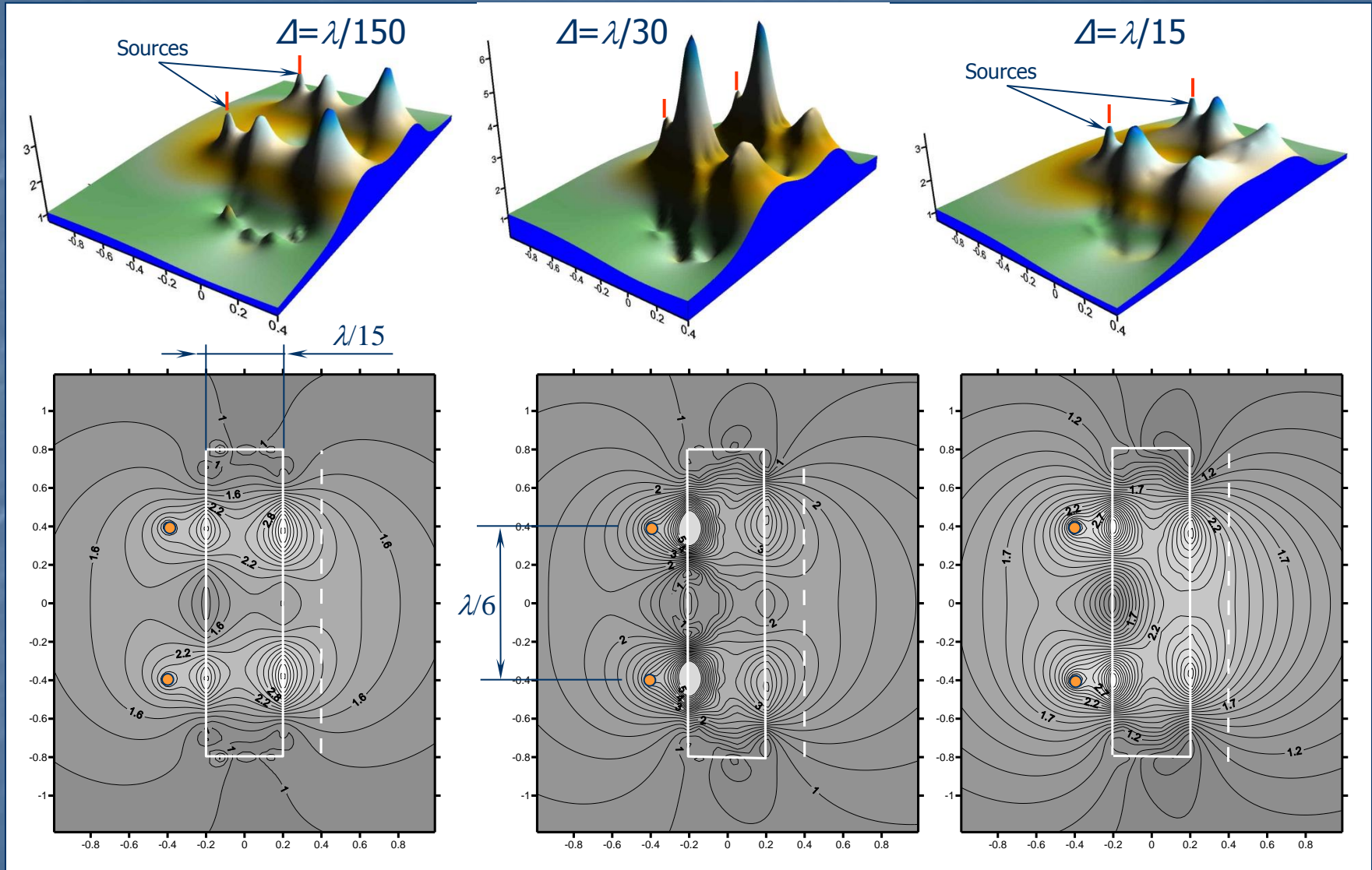
Компенсация потерь в метавеществе при использовании активных включений малого размера



Расчет методом объемных интегральных уравнений

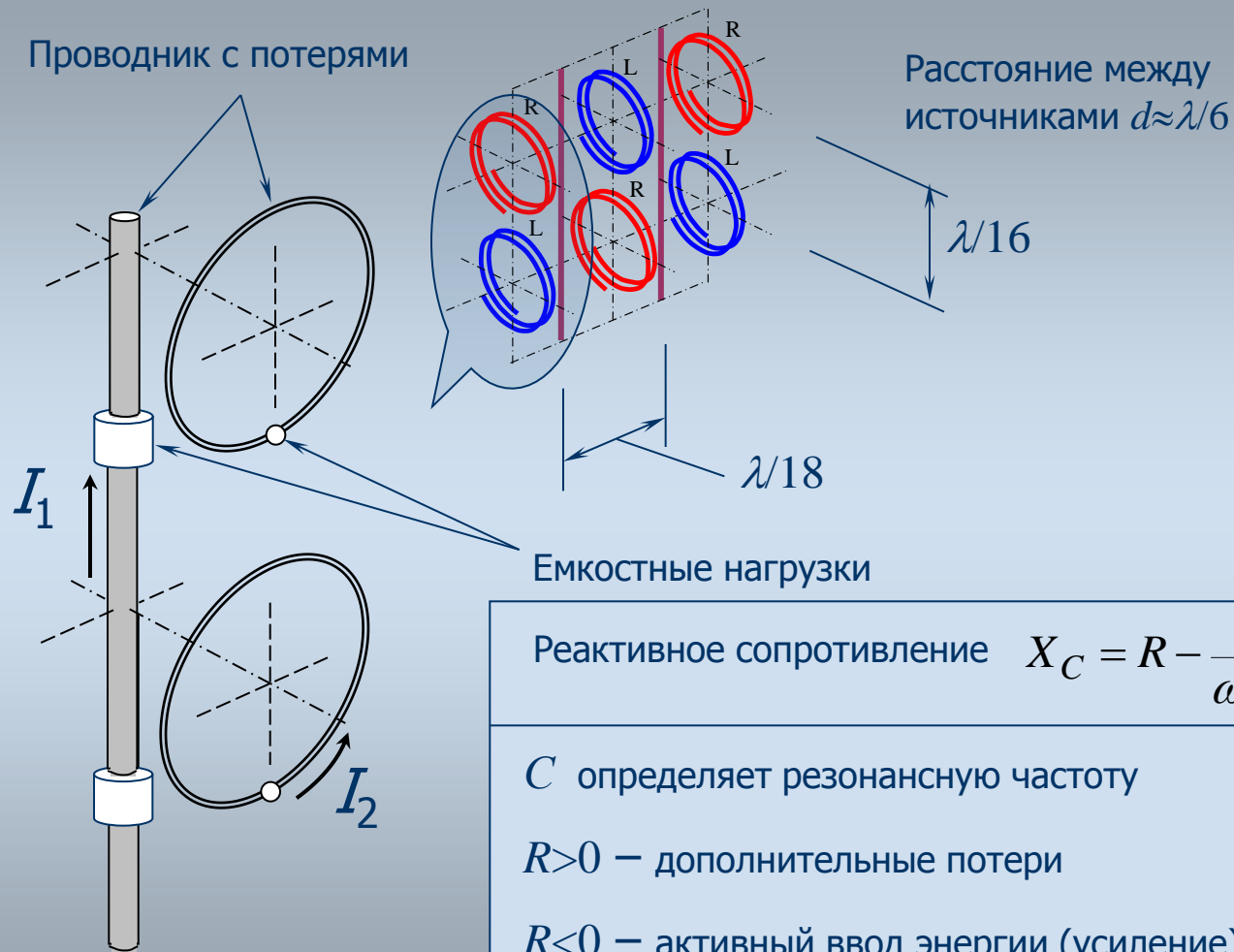
Deterioration of resolution at increasing the overall size of inclusions

Substance: $\varepsilon = \mu = -1 - i0.2$ (75% vol.), active portion: $\varepsilon^* = \mu^* = -1 + i0.15$ (25% vol.)



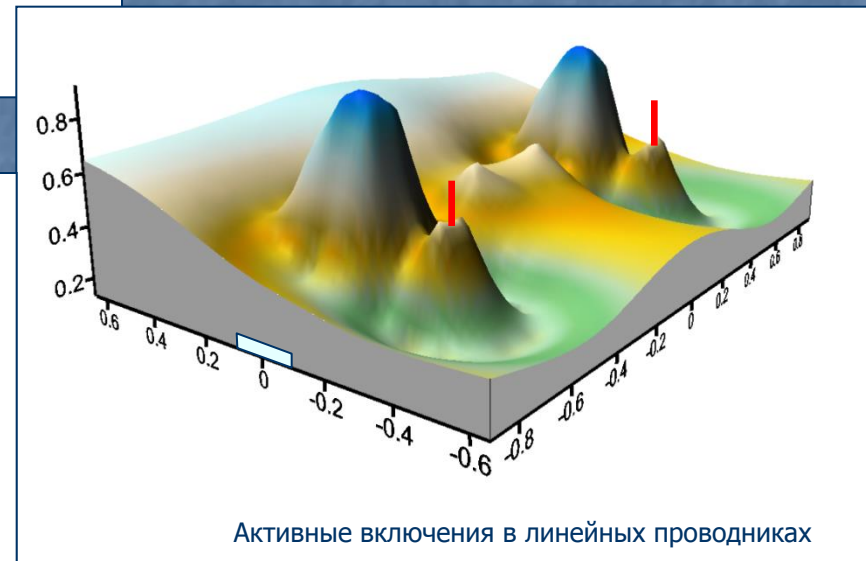
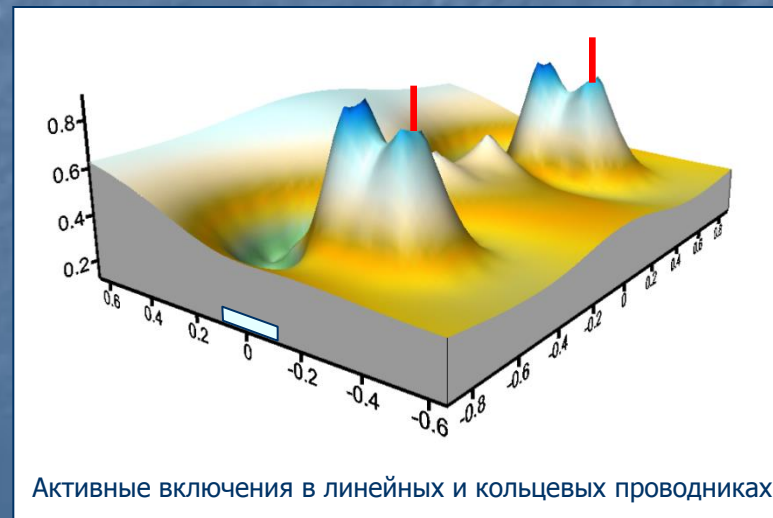
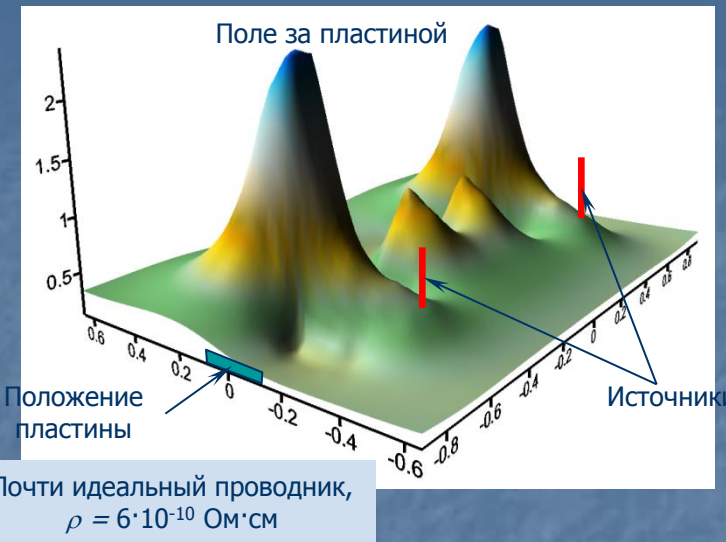
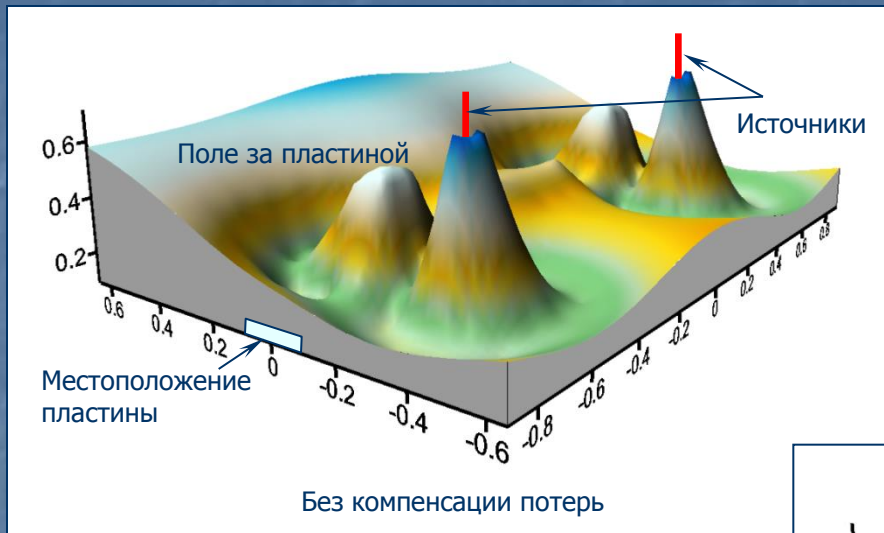
Active compensation may be efficient if the size of inclusion is at least few times less than the resolution interval

Модель метаматериала (композита) с активными включениями



Поле вблизи пластины с активными включениями

Медные включения, $F = 1.05 f_0$



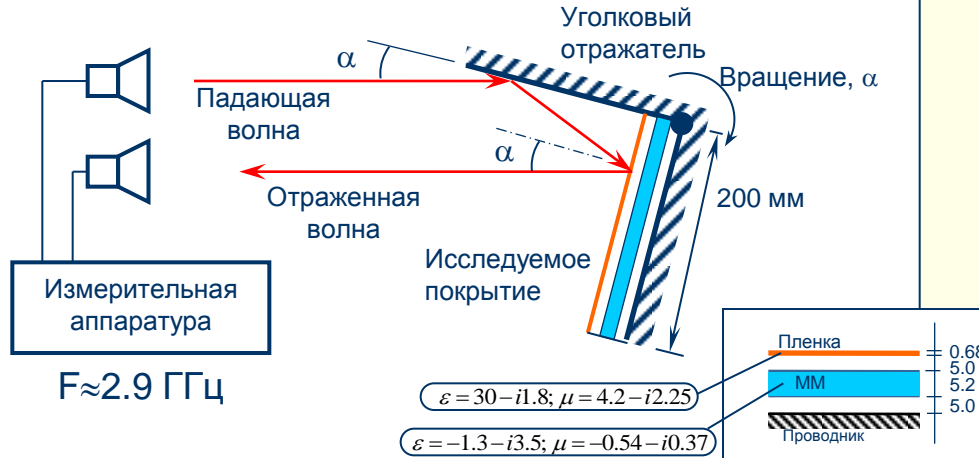
Возможности компенсации потерь в композите с относительно крупными включениями довольно ограничены

Другие задачи, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение

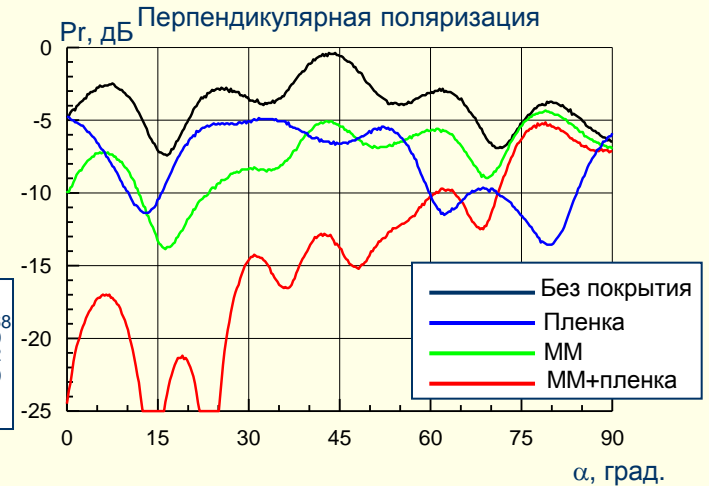
- Возможность компенсации потерь в метаматериалах при помощи активных сред
- Поглощение энергии всенаправленного источника
- Беспроводная передача энергии в системах с метаматериалами

Измерение характеристик поглотителя на основе метаматериала

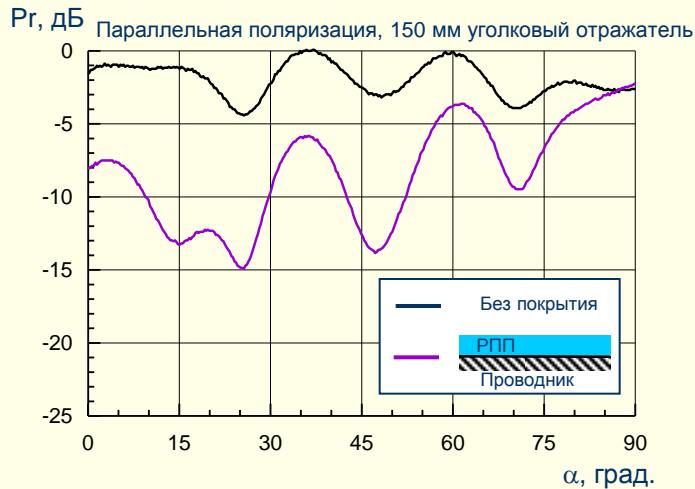
Экспериментальная установка для измерения угловых зависимостей



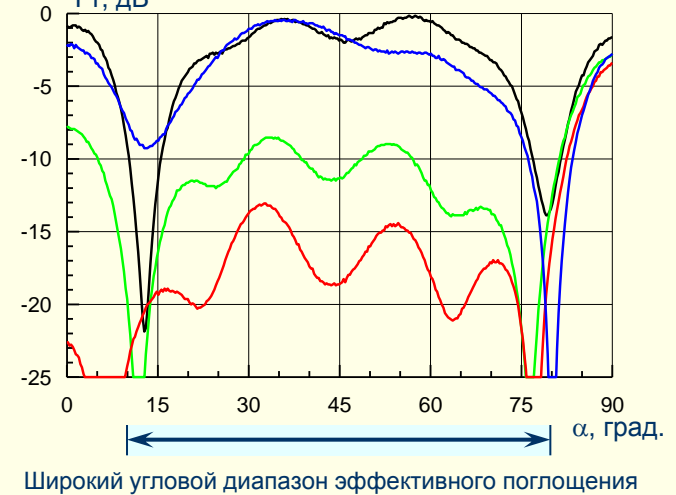
Покрытие на основе метаматериала (ММ)
Общая толщина покрытия $\approx \lambda/6$



Обычное покрытие



Параллельная поляризация



Другие задачи, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение

- Возможность компенсации потерь в метаматериалах при помощи активных сред
- Поглощение энергии всенаправленного источника
- Беспроводная передача энергии в системах с метаматериалами

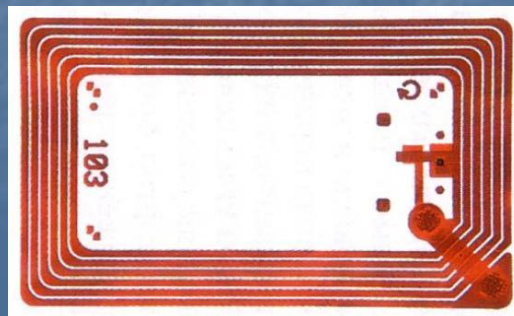
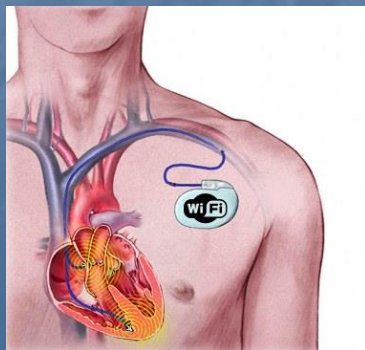
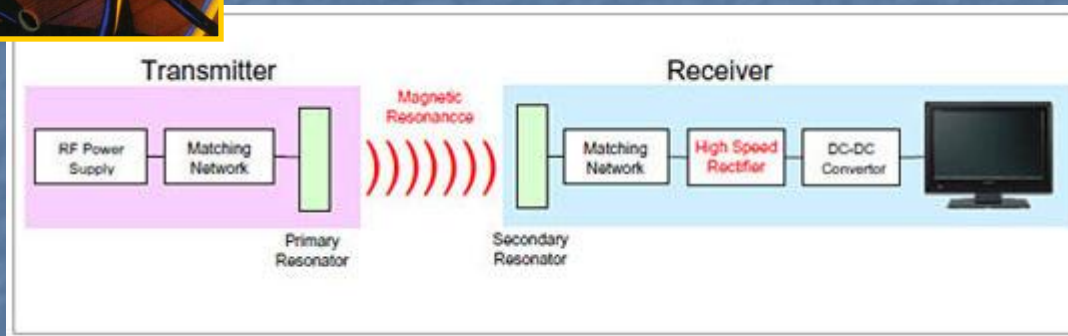
Беспроводная передача энергии



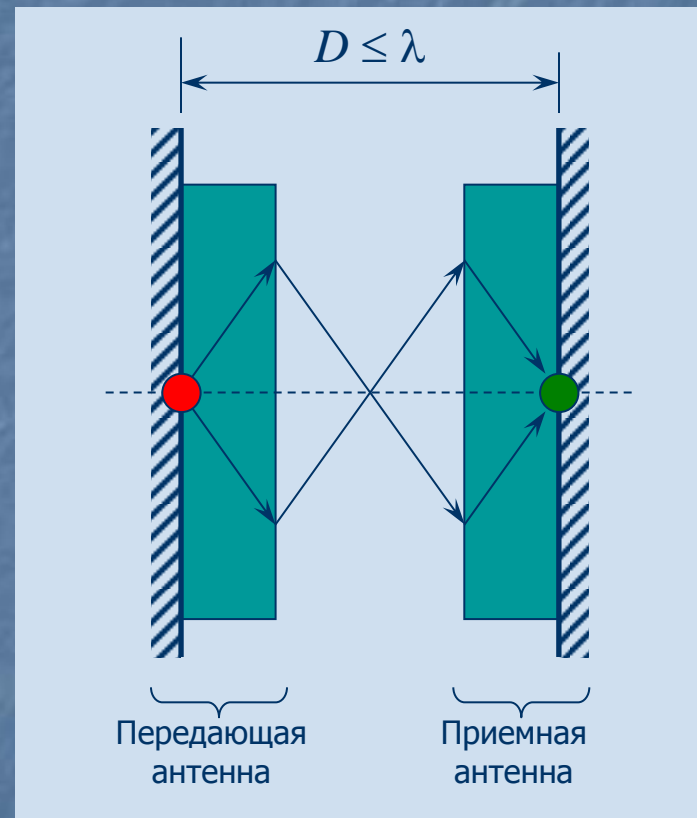
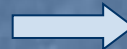
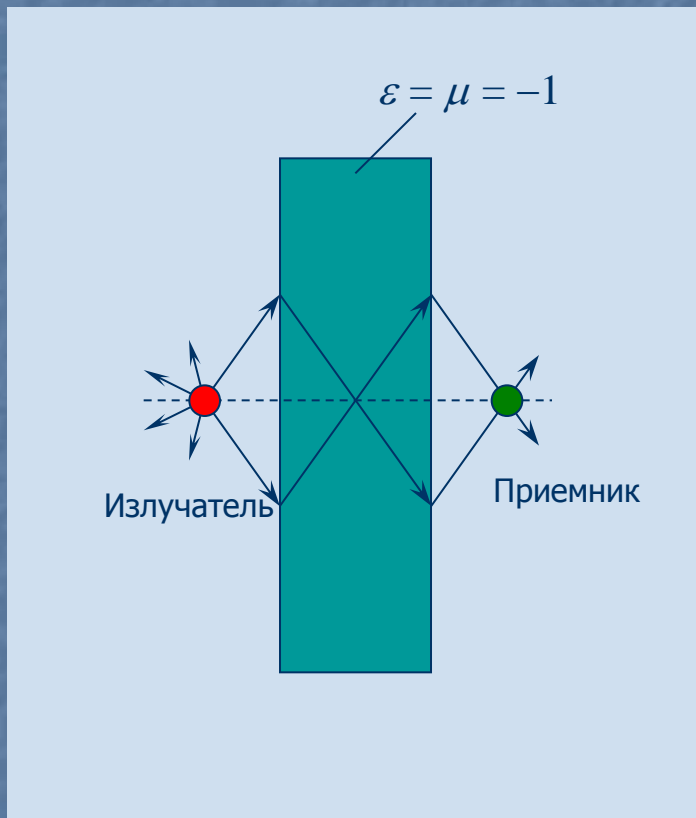
Зарядка мобильных телефонов, плееров, фотоаппаратов и т.п.



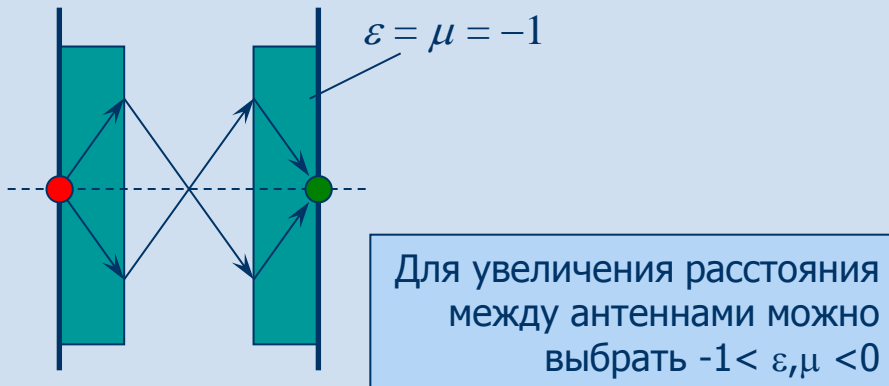
Беспроводное питание бытовой техники
ТВ Sony: $R=0,5 \text{ м}$,
 $P=60 \text{ Вт}$, $\text{КПД}=60..80\%$



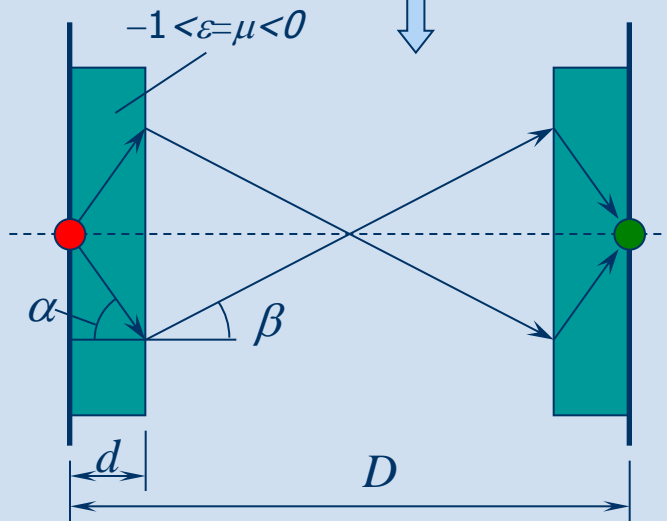
Передача энергии с использованием метаматериалов



Модификация устройства

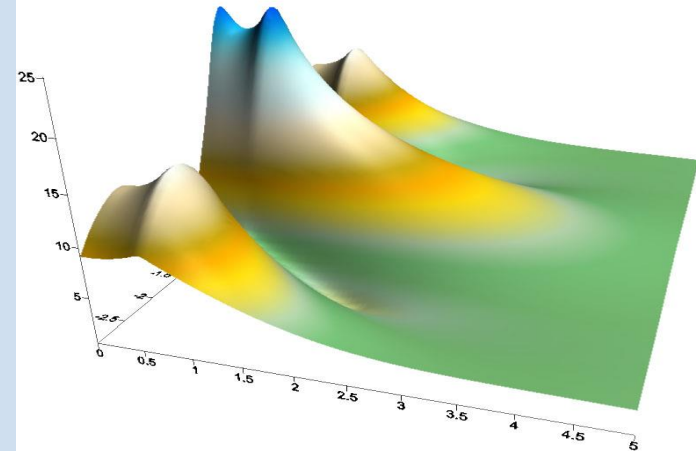


Для увеличения расстояния между антеннами можно выбрать $-1 < \varepsilon, \mu < 0$

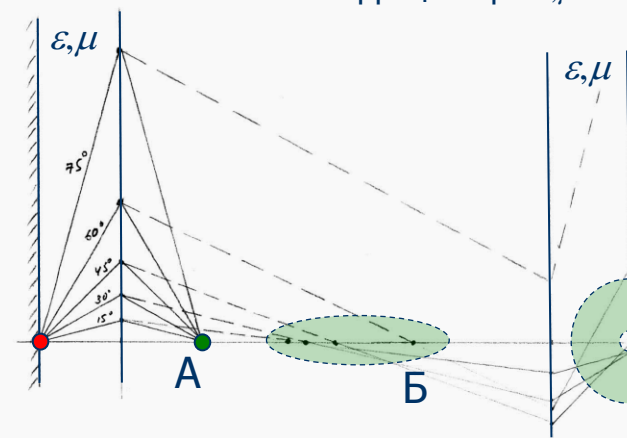


При этом $\beta < \alpha$, $D \gg d$,
но возникают специфические искажения фокусировки

Концентрация ближних полей у границы

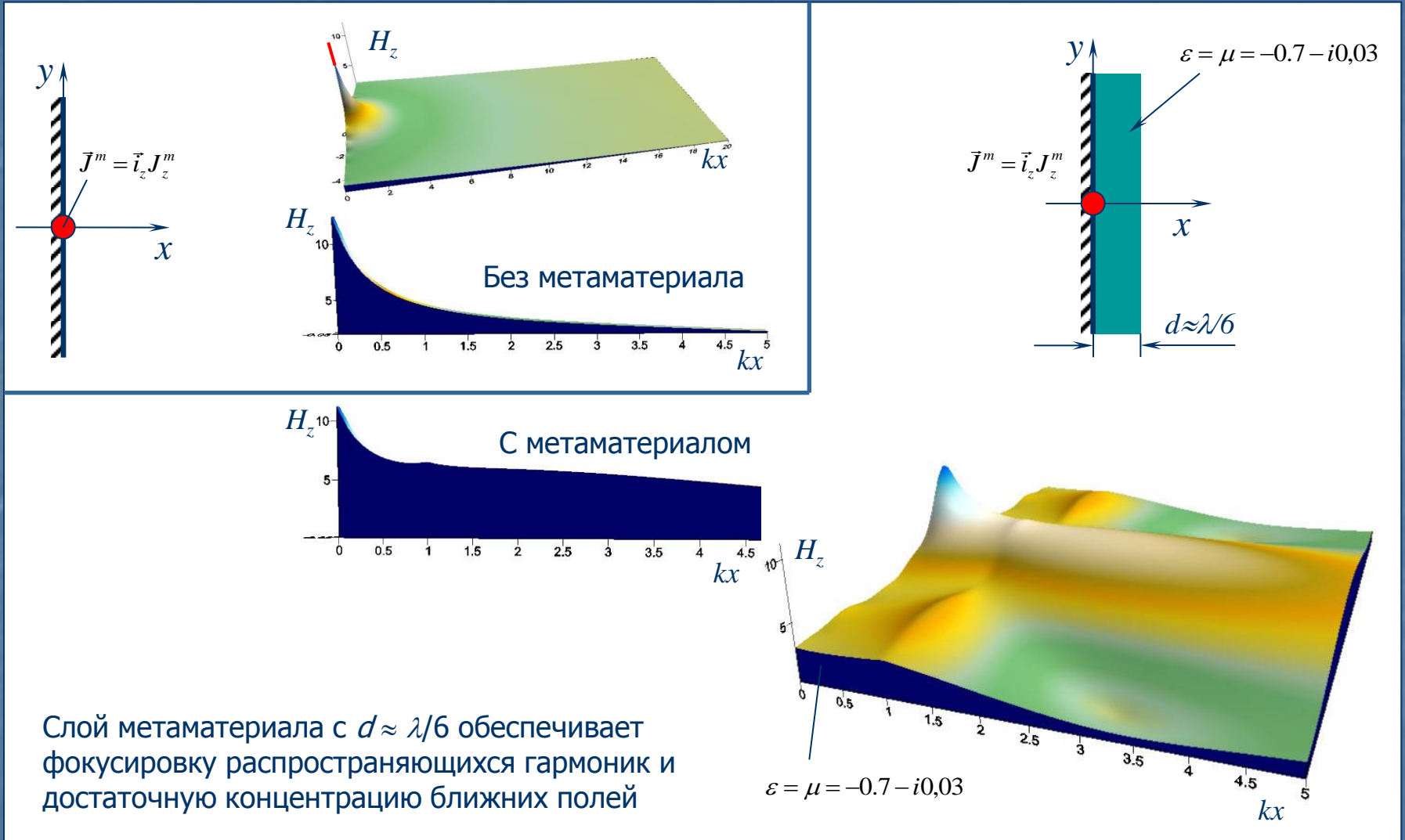


Аберрация при $\varepsilon, \mu \neq -1$

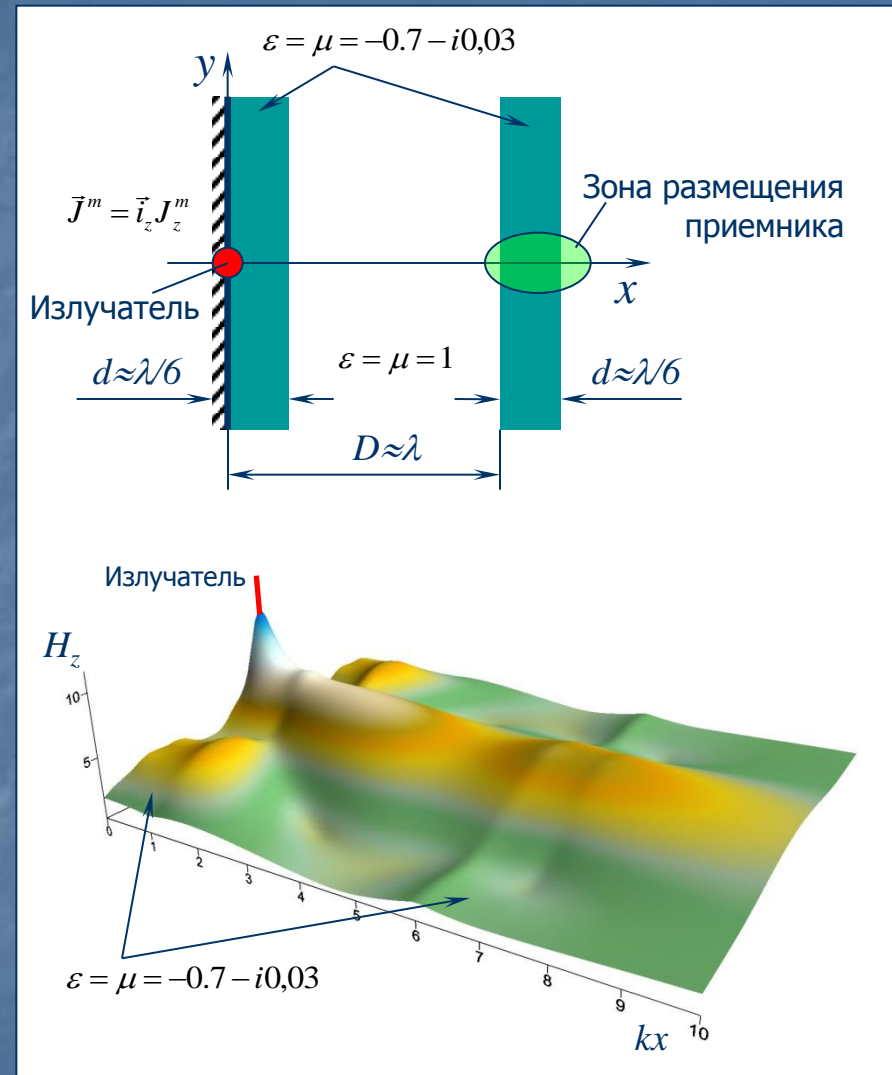
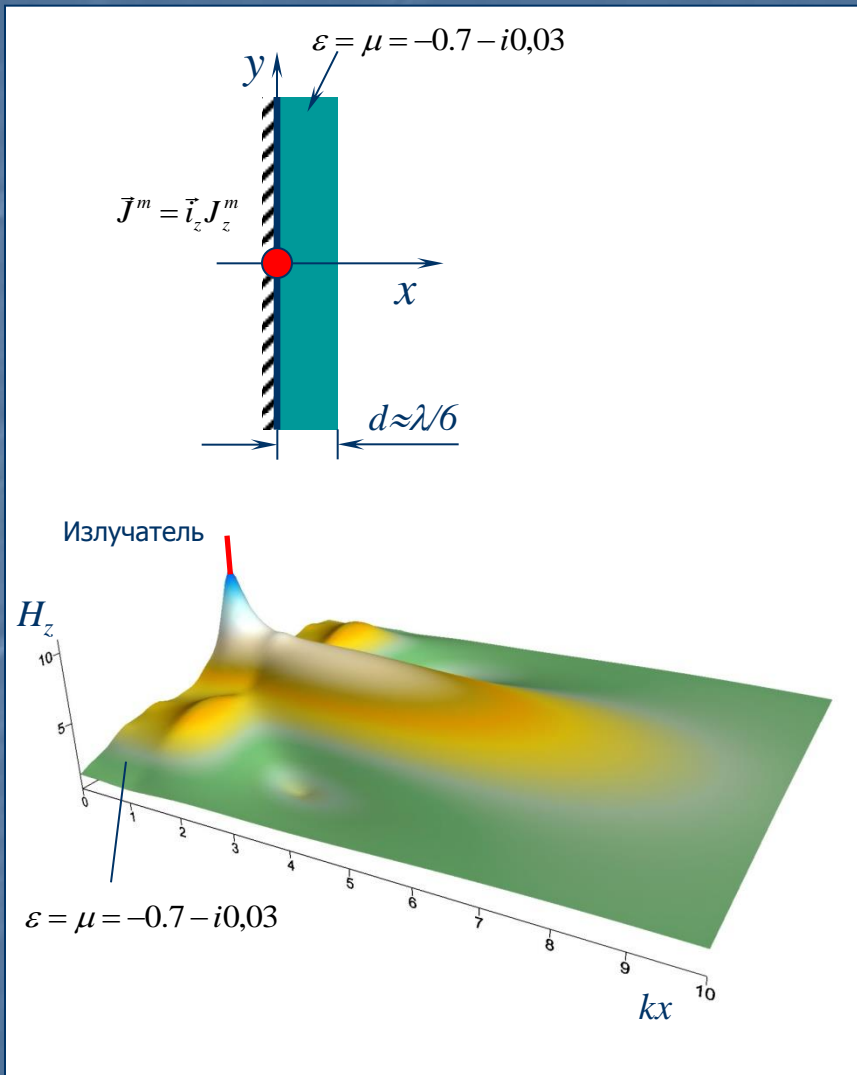


$A: \varepsilon = \mu = -1$; $B: \varepsilon = \mu = -0.5$

Применение слоя метаматериала толщиной около $\lambda/6$



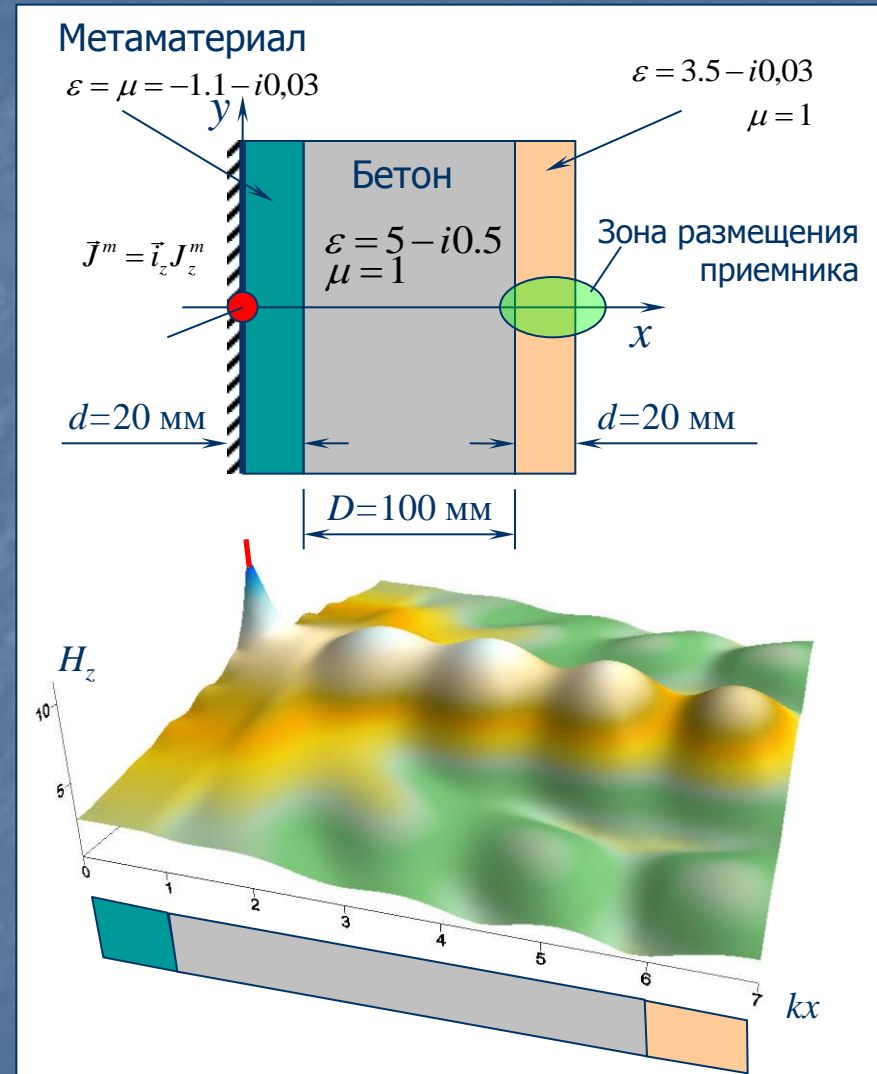
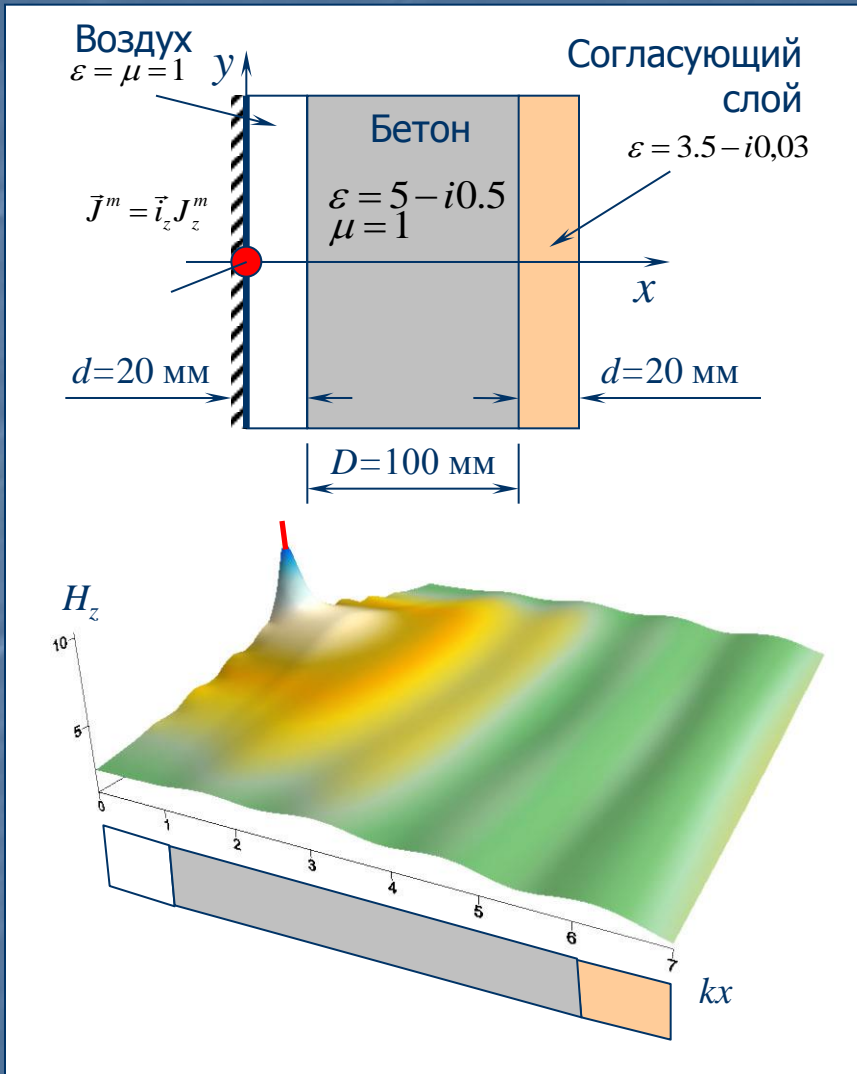
Применение дополнительного слоя



Дополнительный слой метаматериала, размещенный вблизи приемного устройства, обеспечивает увеличение дальности передачи энергии

Ближнее поле магнитного источника в среде с диэлектрическими потерями

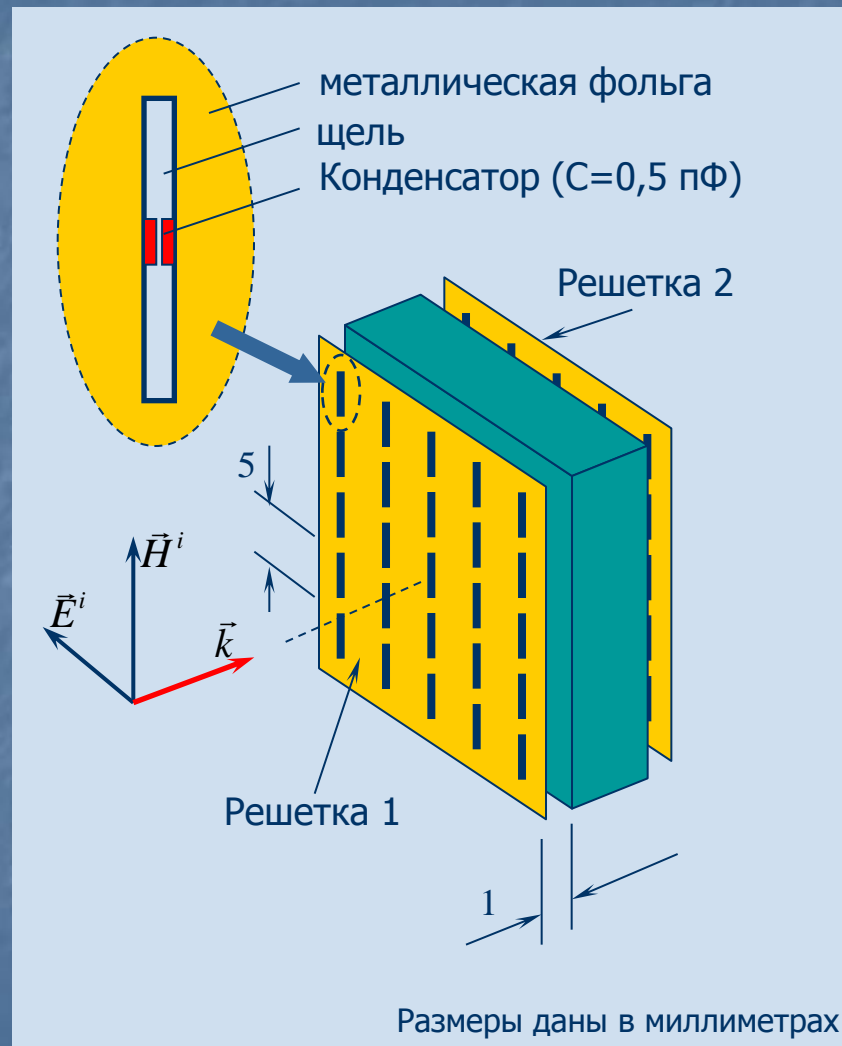
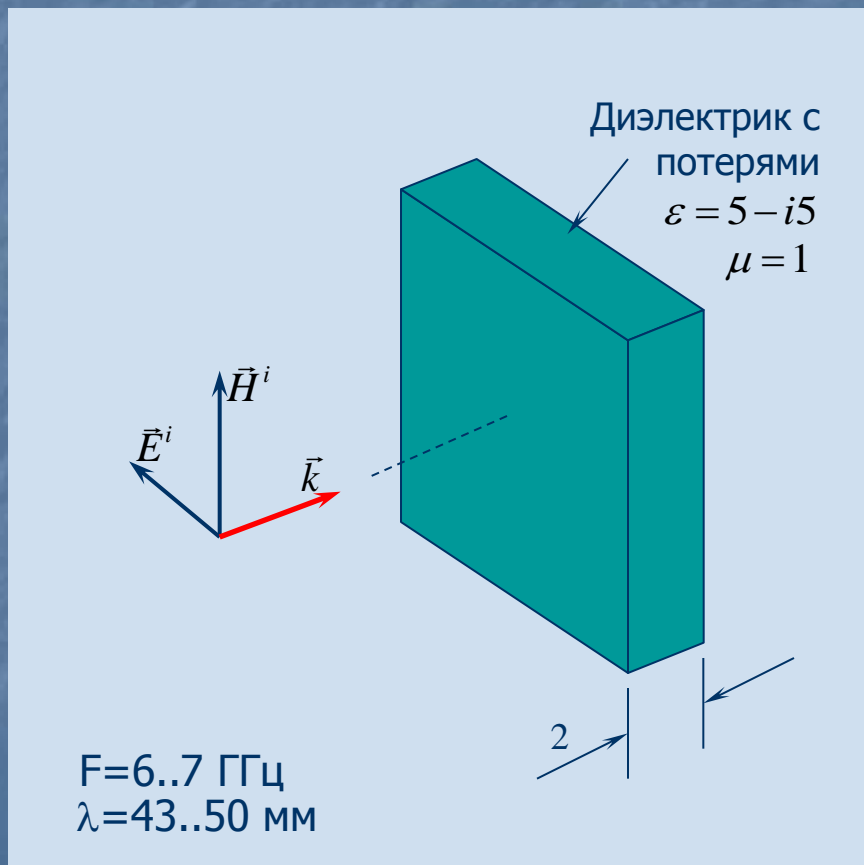
$F=2,4 \text{ ГГц}$
 $\lambda=125 \text{ мм}$



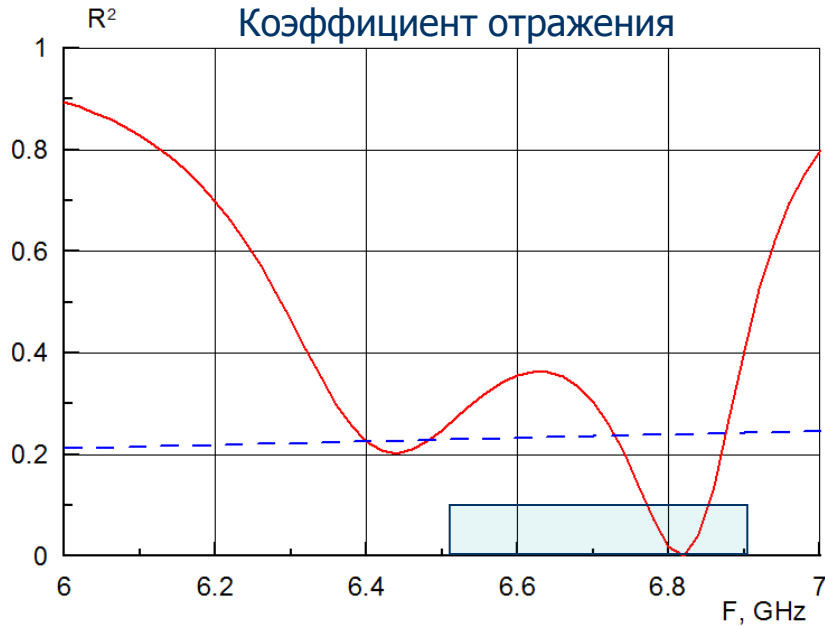
Применение метаматериала позволяет улучшить радиопрозрачность слоя с потерями

Применение тонкослойного метаматериала (щелевой решетки) для улучшения передачи энергии

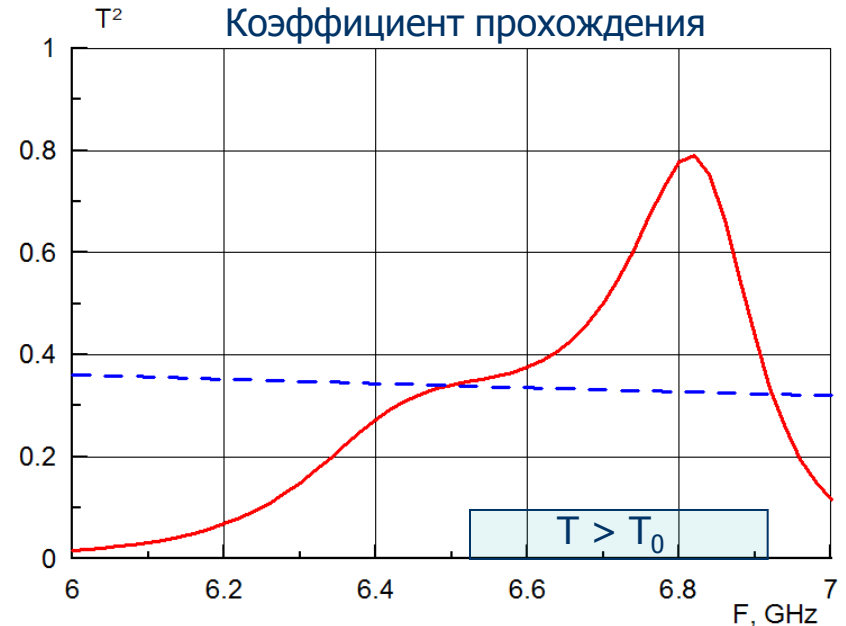
Падение плоской волны на поглощающий диэлектрический слой



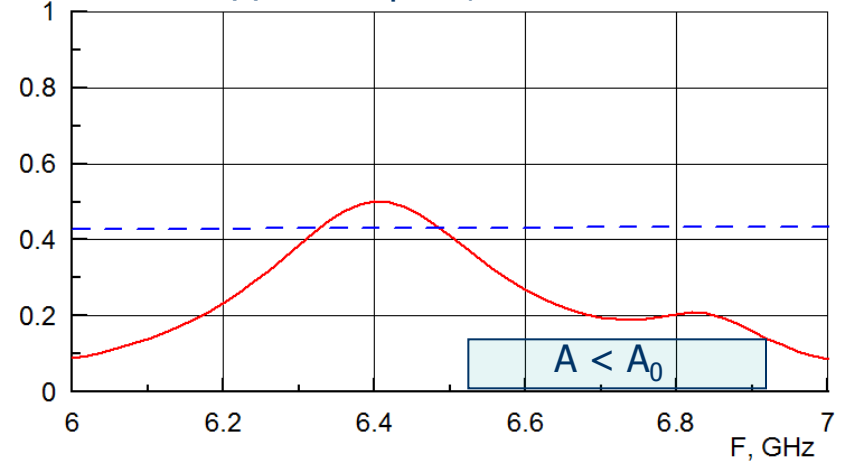
Просветляющее свойство системы магнитных излучателей (щелей)



----- Слой без решеток
————— Слой с решетками



$A^2=1-T^2-R^2$ Доля энергии, поглощенной слоем



Применение щелевых решеток позволило увеличить прозрачность слоя и снизить потери энергии

Метаматериал – сильно диспергирующая среда

