



**Московский Государственный Университет
им. М.В.Ломоносова
Физический факультет
Кафедра физики колебаний**

**ОПТИЧЕСКИЕ
МЕТАМАТЕРИАЛЫ:
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ**



Г. В. БЕЛОКОПЫТОВ

2008

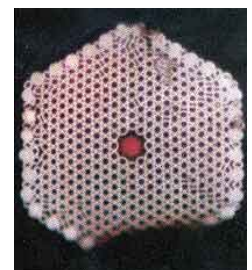
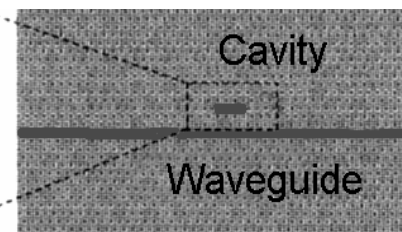
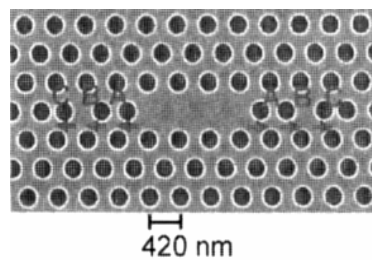
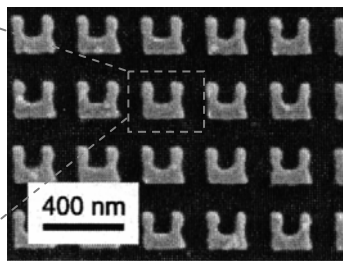
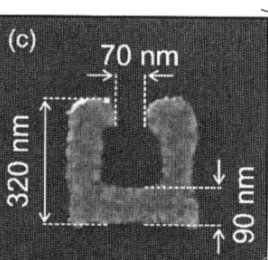
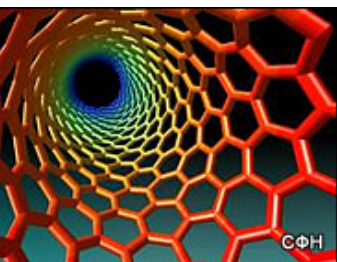
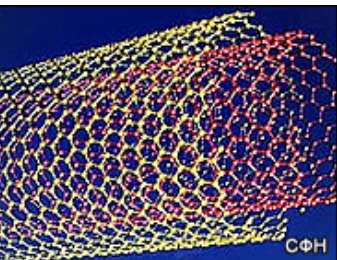
ОПТИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Обзоры:

IEEE J. Selected Topics in Quant. Electr. 2006. V.12. No.6. Pt.1. (Special Issue on Nanophotonics).

Радиотехника и электроника. 2007. Т.52. № 9. (Материалы Межд. Конференции по метаматериалам BIANISOTROPICS – 2006).

Жаров А.А., Кондратьев И.Г., Смирнов А.И.// Известия вузов. Радиофизика, 2005. т. 48. №10-11. С. 978-989.



Общие положения

Метаматериалы – неоднородные среды, состоящие из поляризуемых частиц, расположенных регулярным или хаотическим образом в матрице, которая обеспечивает механическую целостность системы.

Отклик метаматериалов на воздействие электромагнитной волны можно представить как отклик однородной среды (с помощью эффективных проницаемостей), если размеры поляризуемых частиц и расстояния между ними существенно меньше, чем длина волны.

Эффективные проницаемости метаматериала могут принимать значения, неосуществимые в природных однородных веществах (например, «левые среды»).

Если частицы образуют регулярную решетку, а их размеры и расстояния между ними сравнимы с длиной волны, такие (мета)материалы называют фотонными кристаллами.

Отличительной особенностью фотонных кристаллов является наличие чередующихся спектральных полос прозрачности и непропускания.

Метаматериалы: СВЧ прототипы

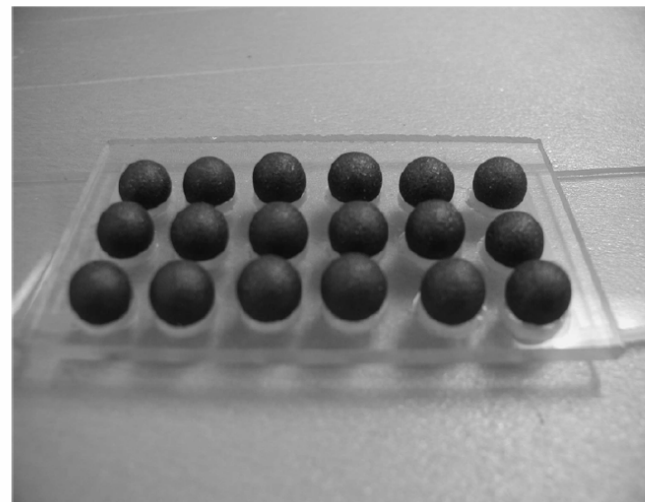
Построение метаматериала из частиц, обладающих резонансным откликом и диэлектрическим/магнитным дипольным моментом

Металлические частицы



Smith D.R., et al, Phys. Rev. Lett., 2000, Vol. 84, P.4184

Диэлектрические частицы



Holloway, et al, IEEE Trans. on Electromagn. Compatibility, Vol. 47, No. 4, 2005

Предыстория

Карпов Н., Ann. Phys. F4. 1922
Bd.69, No.18, S.112-124.
Костин М.В., Шевченко В.В.
РиЭ. 1992.Т.37. №11. С.1992.

L.Levine, 1953.
Семенов В.Н., Чистяев В.А., Рябов Д.Е.//
7-я Межд. Крымская микроволн. Конф.
КрыМиКо'97, С.113 -116. Севастополь. 1997.

Метаматериалы: «сосредоточенные контура» и магнетизм на оптических частотах

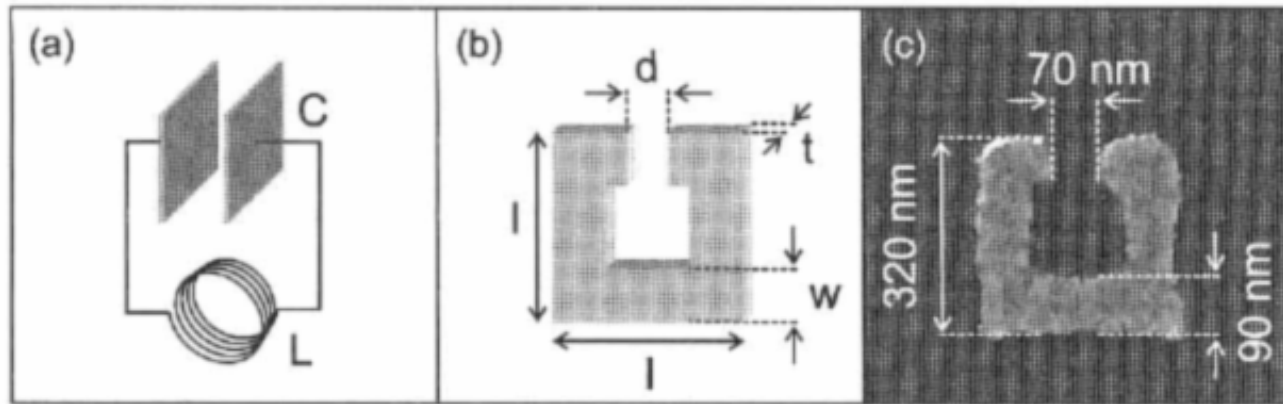


Fig. 1. Illustration of the analogy. (a) A usual LC circuit. (b) SRR. (c) Electron micrograph showing an actually fabricated structure, a gold SRR ($t = 20$ nm) on a glass substrate. Taken from [6].

[6] -Linden S., Enkrich C., Wegener M., Zhou J., Koschny T., Soukoulis C.M. Science. 2004. Vol 306, P.1351-1353.

Linden S et al. IEEE J. Select. Topics in Quant. Electronics, 2006. V. 12, No.6, P.1097 – 1105.

Влияние кинетической индуктивности

$$W_E = \frac{1}{2C} q^2, \quad W_M = \frac{1}{2} LI^2, \quad \{I = \omega q\} \quad W_M = \frac{1}{2} \omega^2 L q^2$$

$$W_E = W_M \Rightarrow \omega_r^2 = \frac{1}{LC} \quad L \sim 10^{-13} \text{ Гн}, C \sim 10^{-17} \text{ Ф}$$

$$W_K = \frac{1}{2} Mv^2, \quad \{M = nm_e V, \quad I = nevS\} \quad W_K = \frac{1}{2} \omega^2 \frac{m_e}{ne^2} \frac{V}{S^2} q^2 = \frac{1}{2} \omega^2 L_{\text{кин}} q^2$$

$$W_E = W_M + W_K \quad \frac{1}{\omega^2} = \left(LC + \frac{4\pi VC}{S^2} \frac{m_e}{4\pi ne^2} \right)$$

$$\sim \omega_r^{-2} \quad \sim \omega_{\text{III}}^{-2} \quad \left(\omega_{\text{III}}^2 = \frac{4\pi ne^2}{m_e} \right)$$

$$L \sim \frac{4\pi S}{l}, \quad C \sim \frac{\epsilon S}{4\pi d}, \quad \left\{ \frac{S}{l^2} = \text{const}, \frac{d}{l} = \text{const} \right\} \quad LC \sim l^2$$

$$\frac{1}{\omega^2} = \left(\frac{1}{\omega_r^2} + \frac{\epsilon V}{V_C} \frac{1}{\omega_{\text{III}}^2} \right)$$

$$\lambda^2 = \left(\lambda_r^2 + \frac{\epsilon V}{V_C} \lambda_{\text{III}}^2 \right)$$

$$\lambda_{\text{III}} \sim 200 \text{ нм (Au, Ag, Al)}$$

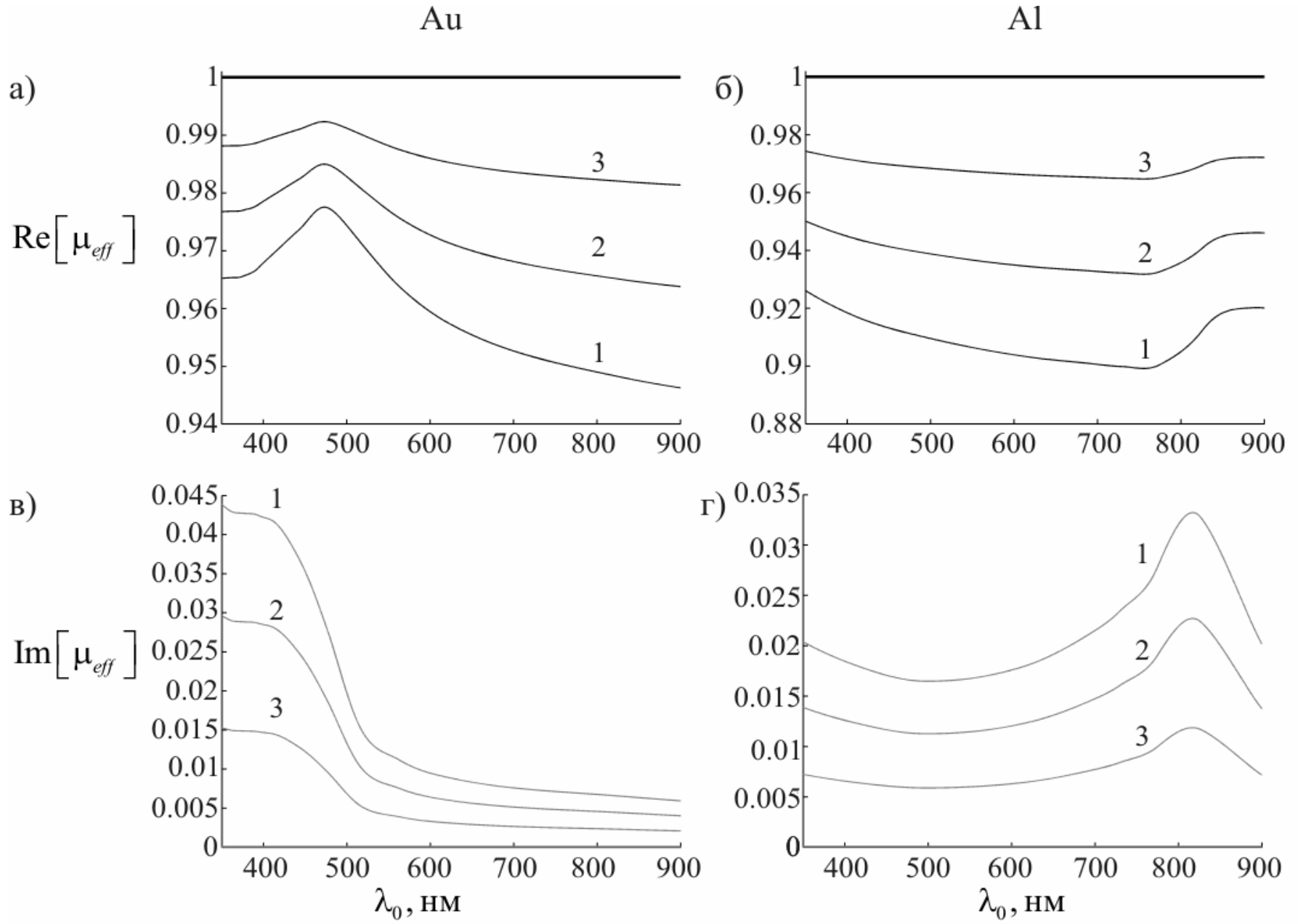
Нерезонансный диамагнитный отклик решетки металлических наночастиц

Если вклад кинетической индуктивности существенно больше, чем «геометрической», то метаматериал, составленный из таких частиц, будет обладать нерезонансным диамагнитным откликом.

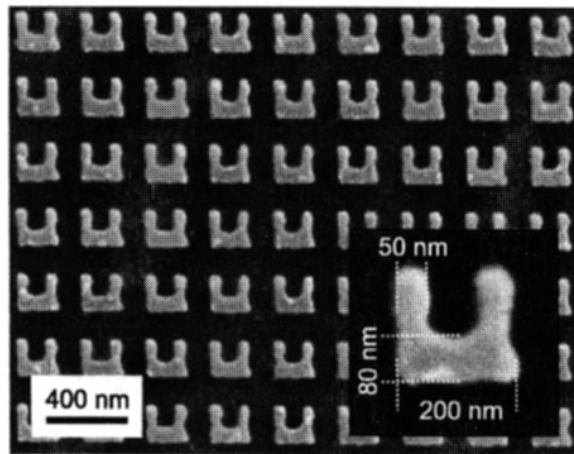
Пример расчета для кубической решетки сферических наночастиц из золота и алюминия. Диаметр частиц $d=100$ нм, расстояние между соседями $1,4d$ (1), $1,6d$ (2), $2d$ (3).

А.В.Журавлев, 2008

Магнитная проницаемость решетки наночастиц



Метаматериалы на оптических частотах: Коэффициенты пропускания и отражения

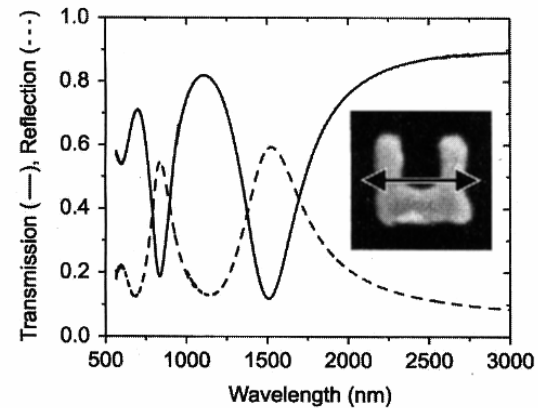


(a)

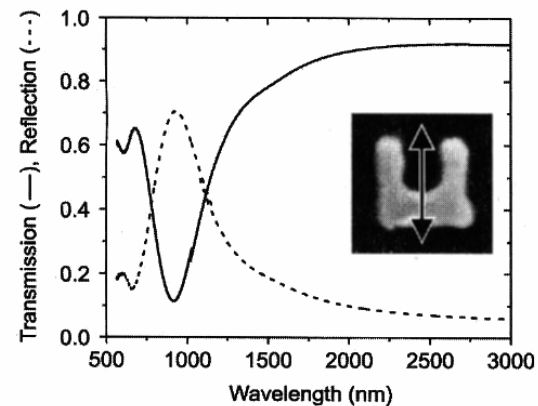
Подковообразные элементы из золота. Толщина слоя – 20 нм

Linden S et al.

Карлсруэ, Германия.



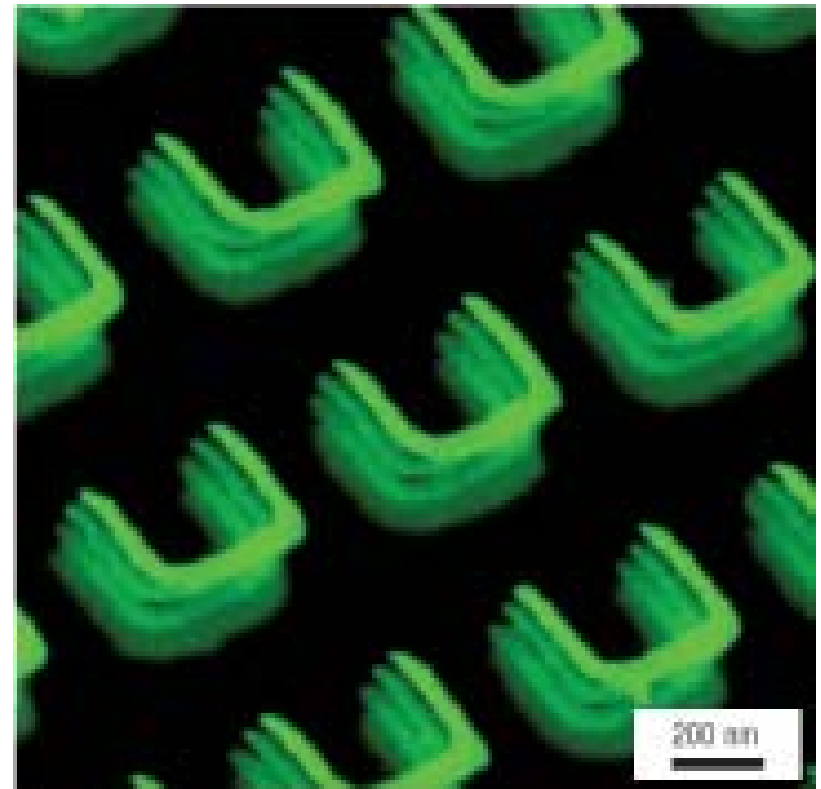
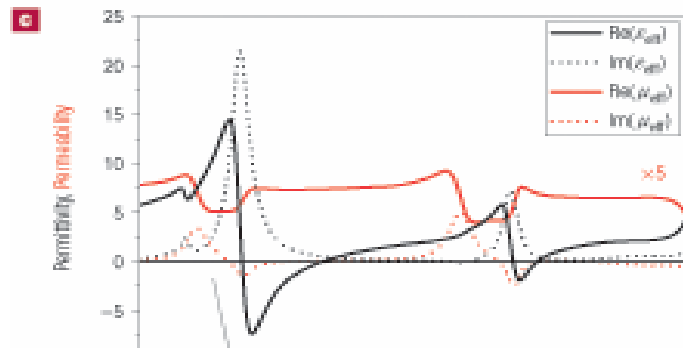
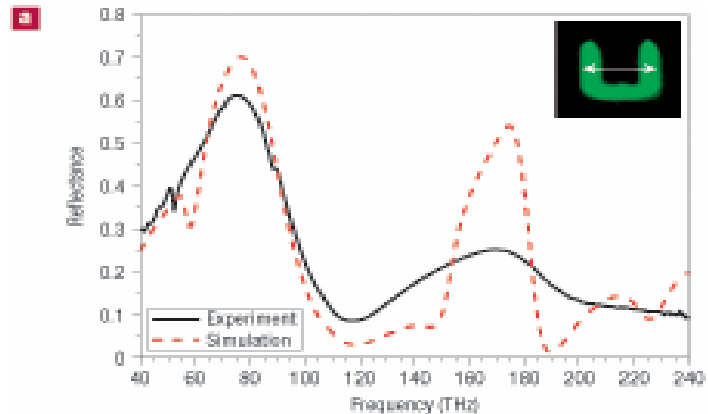
(b)



(c)

Fig. 3. (a) Electron micrograph of a split-ring array with a total area of $100 \mu\text{m}^2$. Lower RHS inset shows the dimensions of an individual split ring. (b) and (c) Corresponding measured normal-incidence transmittance and reflectance spectra for the horizontal and vertical polarization, respectively. Taken from [17].

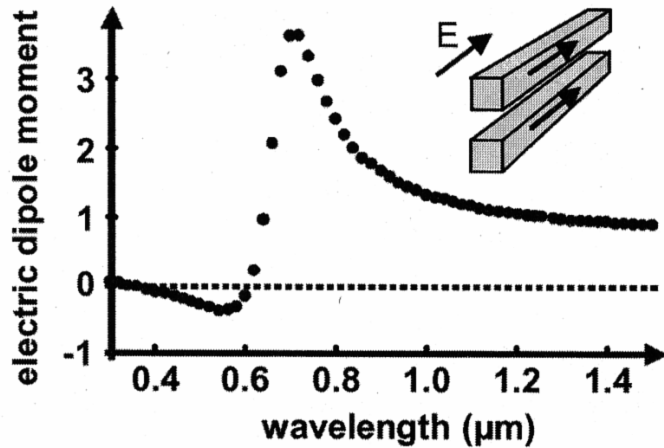
Многослойный оптический метаматериал



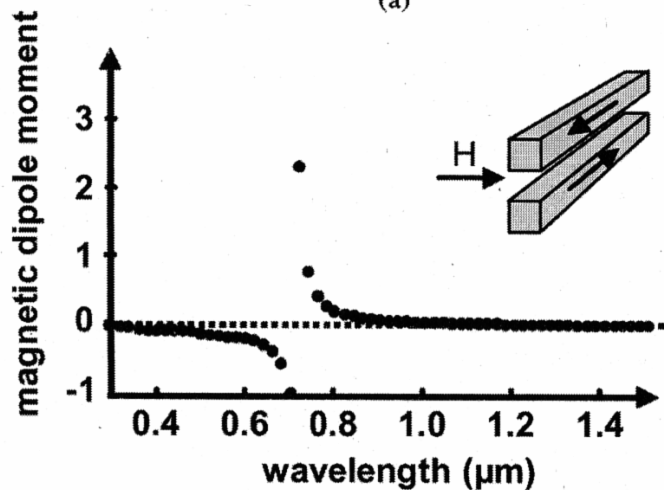
N.Liu, H.Guo, L.Fu, S.Kaiser, H.Schweizer, H.Giessen. Nature Materials. 2008. V.7. P.31-37.

Штутгарт, Германия

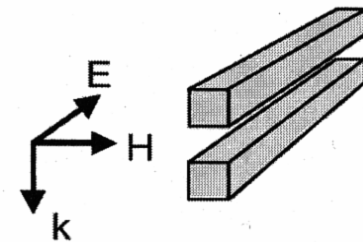
Резонансное возбуждение пары нанопроволок



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Response of a pair of gold nanorods to radiation, simulated with coupled dipole approximation technique. (a) Electrical dipole moment, the electric field oriented parallel to the axis of the rods. (b) Magnetic dipole moment, magnetic field oriented perpendicular to the plane of the rods. (c) Pair of rods illuminated from above with TM polarization. Pair of rods will have a double negative response to the field.

T.A.Klar, A.V.Kildishev, V.P.Drachev, V.M.Shalaev. IEEE J. Select. Topics in Quant. Electronics, 2006. V. 12, No.6, P.1106 – 1115.

Металленка с отрицательным показателем преломления

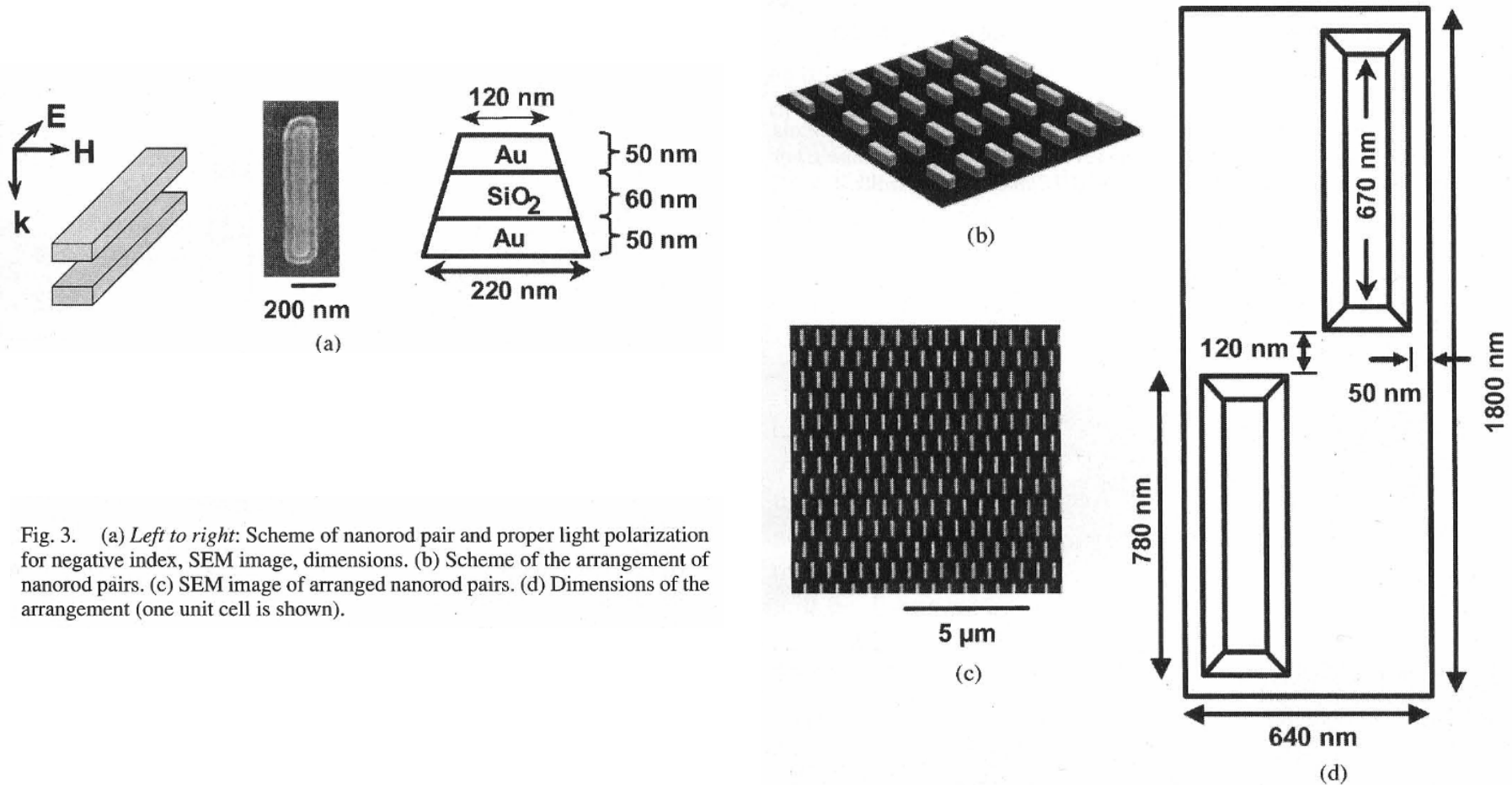


Fig. 3. (a) *Left to right*: Scheme of nanorod pair and proper light polarization for negative index, SEM image, dimensions. (b) Scheme of the arrangement of nanorod pairs. (c) SEM image of arranged nanorod pairs. (d) Dimensions of the arrangement (one unit cell is shown).

Метапленка с отрицательным показателем преломления

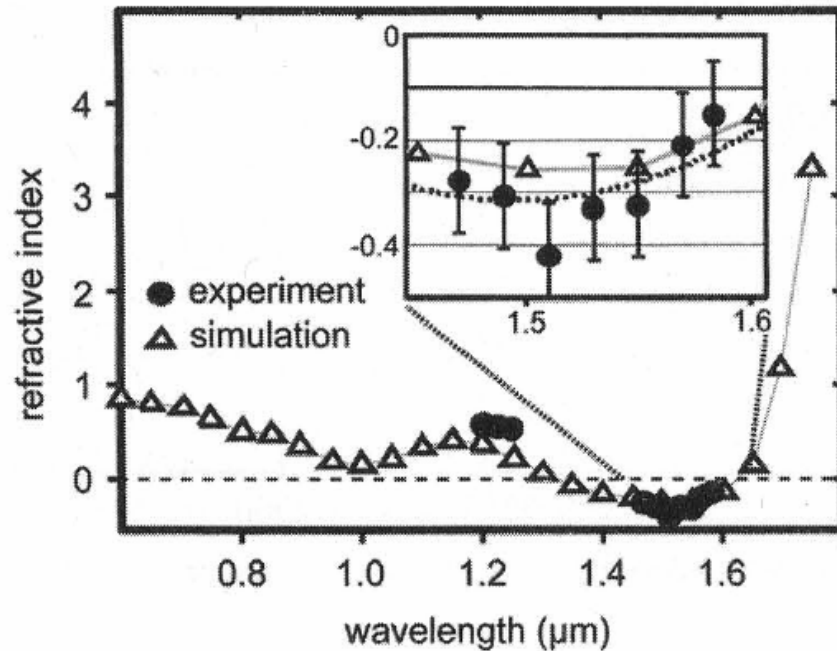


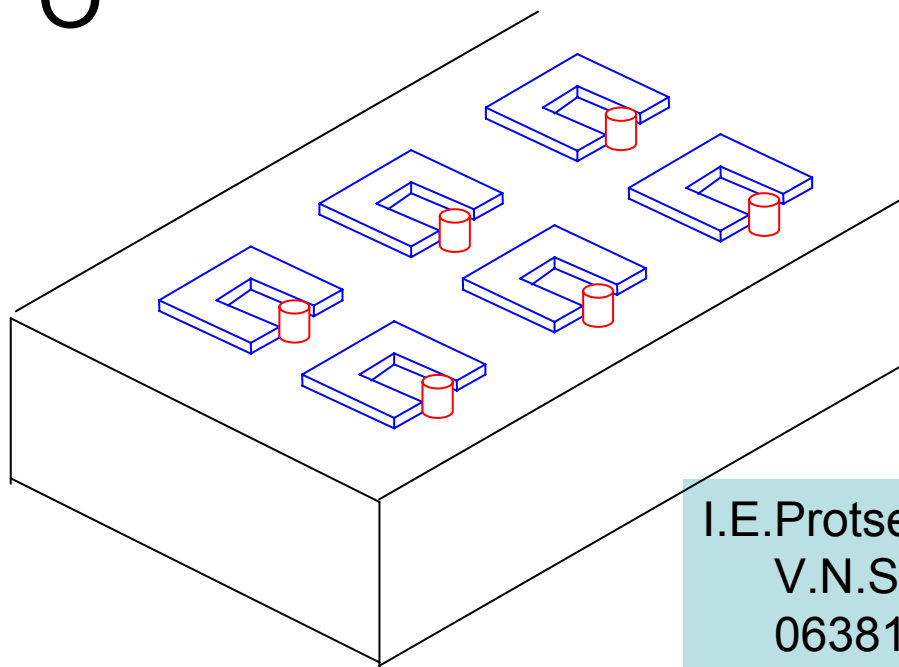
Fig. 4. Real part of the refractive index of a layer of nanorod pairs, as shown in Fig. 3. Data that are restored from experimentally determined transmission, reflection, and phase measurements (*full circles*). FDTD simulation (*open triangles*). Zoom of the region of negative refraction (*inset*). Dashed line is a least-square fit to the experimental data. Refractive index of $n' = -0.3 \pm 0.1$ was determined.

$$n = \frac{1}{k\Delta} \arccos \frac{1 - r^2 + n_s t^2}{[1 + n_s - (1 - n_s)r]t},$$

$$t = \sqrt{T} e^{i\tau}, \quad r = \sqrt{R} e^{i\rho}.$$

Метапленка, составленная из нанолазеров

О



Нанолазер – комбинация
квантовой точки
и **плазмонного резонатора**

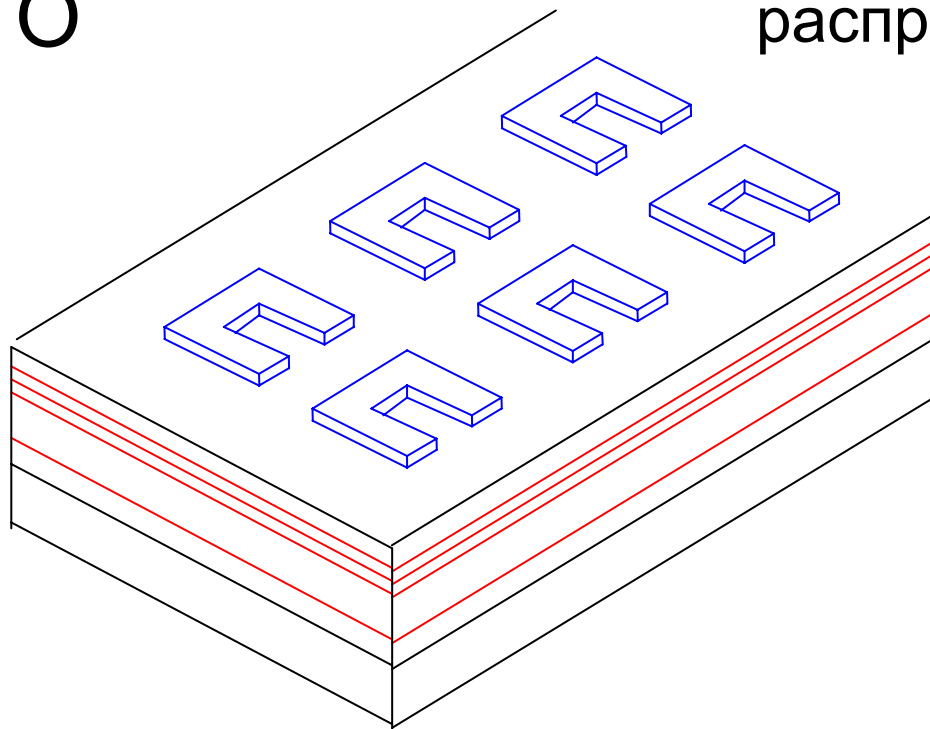
I.E.Protsenko, A.V.Uskov, O.A.Zaimidoroga,
V.N.Samoilov, E.P.O'Reilly. Phys. Rev. A 71.
063812. 2005.

T.A.Klar, A.V.Kildishev, V.P.Drachev,
V.M.Shalaev. IEEE J. Select. Topics in Quant.
Electronics, 2006. V. 12, No.6, P.1106 – 1115.

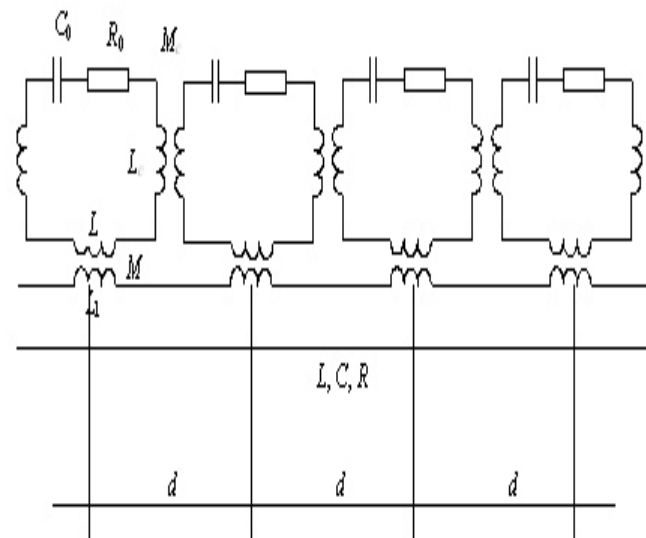
A.K.Sarychev, G.Tartakovsky. Phys. Rev. B 75.
085436. 2007.

Гибридная структура квантовая яма - метапленка

О



Квантовая яма –
распределенная активная среда

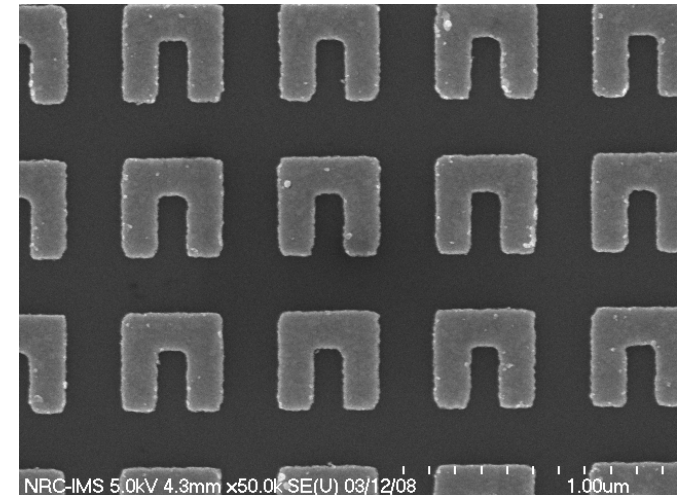


А.Л.Богданов, А.Н.Лагарьков, А.К.Сарычев,
А.С.Логгинов, Г.В.Белокопытов,
В.Ю.Тимошенко, А.Ткаченко, 2008.

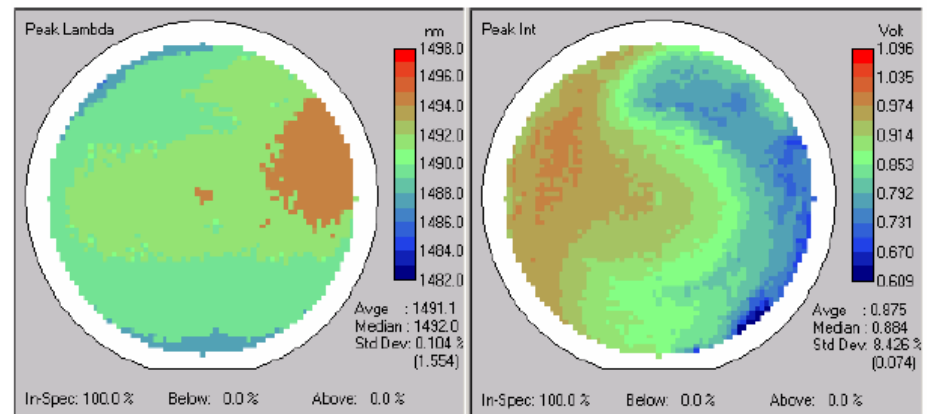
Связанная система –
цепочка нанорезонаторов
и активный волновод

Гибридная структура квантовая яма - метапленка

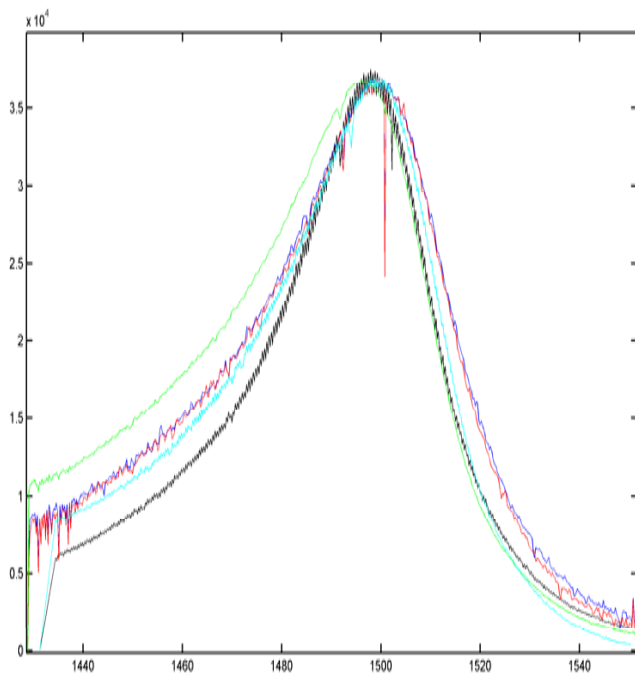
Квантовая яма (InAlGa)As
Подковообразные элементы из золота
толщиной 25 нм, решетки с периодом
300×300 и 600×600 нм.



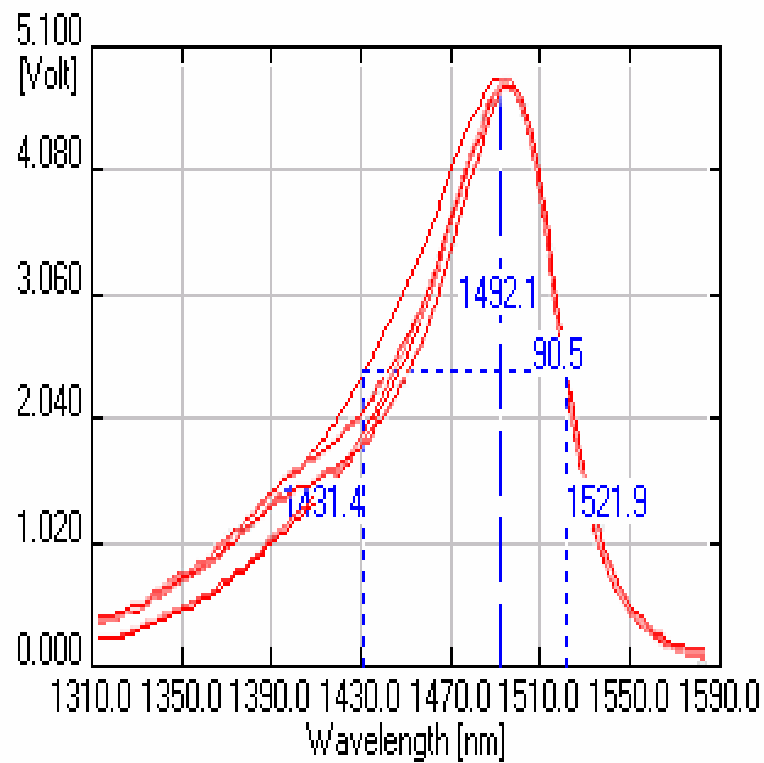
M0647 Str-Comp InAlGaAs 1490nm MQW test				
		In	Al	Ga
20nm u-InP cap				
20nm u-InAlGaAs-b		0.455	0.183	0.362
6.5nm InAlGaAs		0.670	0.074	0.256
10nm InAlGaAs-b	↕ 5x	0.455	0.183	0.362
6.5nm InAlGaAs		0.670	0.074	0.256
20nm u-InAlGaAs-b		0.455	0.183	0.362
0.25um n-InP				
S-InP substrate				



Фотолюминесценция гибридной структуры



$\lambda = 0.63$ мкм,
 $P = 1$ мВт



$\lambda = 0.98$ мкм,
 $P = 12$ мВт

Заключение

- В настоящее время реализованы метаматериалы, обладающие резонансным откликом в оптическом и ИК-диапазонах, в том числе искусственные магнетики и «левые» среды.
- Элементами для построения таких метаматериалов служат металлические наночастицы, в которых возбуждаются плазмонные колебания.
- Практически все наличные структуры оптических метаматериалов представляют собой двумерные объекты (метапленки).
- Актуальна задача получения активных метаматериалов, то есть структур, в которых осуществляется регенерация потерь вследствие индуцированного излучения.
- Первые наблюдения фотолюминесценции в гибридной структуре (квантовая яма (InAlGa)As – метапленка из металлических наночастиц) продемонстрировали, ее частотную избирательность и потенциальную активность, что позволяет ожидать регенерацию потерь и усиление света при оптической накачке умеренной интенсивности.

Спасибо за внимание!

<http://raspredsystems.narod.ru/>

<http://www.phys.msu.ru/www/osc/labs/index.html>