

プラズモニック・メタマテリアル

～新たな光材料とその応用を目指して～

光協会 光材料・応用技術研究会

RIKEN
Nanophotonics Laboratory
田中 拓男

September 8 2006
15:45-16:30 / 45min

Outline

1. プラズモニック・メタマテリアルとは？
2. 原理と特性
3. どうやって作るか？
設計, 加工
4. 何に活用できるのか？
5. まとめ

Maxwell方程式 → 光の伝搬を記述

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \text{div } \mathbf{D} &= \rho \\ \text{rot } \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0 \end{aligned}$$

ϵ , μ の分布が決まれば, 光の伝搬状態は一意的に決まる.
物質のバラエティが光制御の自由度を決める.

ϵ と μ は物質毎に決まっている. 特に μ は常に1.0 ← 従来の常識
光の周波数では, μ の自由度はない.

金属 n : 虚数 光伝搬しない 電子応答 Ag Au	μ	誘電体, 強磁性体 n : 実数 光伝搬する No Reaction Air Water Glass Diamond	この常識を破りたい! $n = \sqrt{\epsilon\mu}$
??? n : 実数 光伝搬する? 電子&磁気応答 自然界に存在しない!	ϵ	反磁性体 n : 虚数 光伝搬しない 磁気応答 at DC~GHz 自然界に存在	

電子振動のスピードを変えれば, ϵ が変わる.
電子を共振させて電流を流せば, μ が変わる.

ナノサイズの金属構造体 (共振器) と電子の振動 (プラズモン) を使って, ϵ , μ を制御

"プラズモニック・メタマテリアル"

Metal $\rightarrow \epsilon < 0$: 自由電子は電場の侵入を防ぐように移動する.
同じことを磁場に対して行えば, $\mu < 0$ になる.

Magnetic Resonator

White Light
白色光

Metamaterial

Split Ring Resonators (SRRs)

Induced Current

Loop antenna + LC resonant circuit

Equivalent circuit

Positive & negative μ around ω_0

J. Pendry, et al., IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 47, 2075 (1999).

金属 n : 虚数 光伝搬しない 電子応答 Ag Au	μ	誘電体, 強磁性体 n : 実数 光伝搬する No Reaction Air Water Glass Diamond
??? n : 実数 光伝搬する? 電子&磁気応答 自然界に存在しない!	ϵ	反磁性体 n : 虚数 光伝搬しない 磁気応答 at DC~GHz 自然界に存在

$\mu \neq 1.0$ 媒質

負の屈折率媒質

Scientific

- ・プラズモニック・メタマテリアルの創製.
 ϵ , μ を人工的にデザインする
- ・新奇な光学現象の発現.
- ・全く新しい光操作方法 (素子) の実現

Technical

- ・ナノサイズの3次元金属構造体をマクロスケールで作る.

1. $n < 0$ material
2. $\mu \neq 1$ material

$n = \sqrt{\epsilon} \sqrt{\mu}$

if $\epsilon < 0$ and $\mu < 0$
then $n < 0$

Left-handed Right-handed

1. Veselago's prediction: Left-handed, Sov. Phys. Usp. 10 (1968).
2. No existence in nature both $\epsilon < 0$ and $\mu < 0$ simultaneously.
3. Pendry's idea : PRL, 85 (2000).
4. Many reports confusing with photonic crystal
Refraction <-> Diffraction

平らなLHMがレンズのように振る舞う

RHM $k > 0$ LHM $k < 0$ RHM $k > 0$

$n = 1$ $n = -1$ $n = 1$

"Perfect imaging" "Superlens" **Resolution Limitation in LHM lens**
both propagating & evanescent waves contribute to the resolution of the image.
Maximum resolution of conventional lens with high NA: $-\lambda/2$

J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett., 85, 3966 (2000)
Simulator: MCFOT-3D Pro <http://www.feastcorp.com>

Simulation of Perfect Imaging by Silver Slab

Silver slab acts as "Superlens" in P-polarization (TM) wave

Object intensity Image intensity

Object plane Silver slab Image plane

40 nm 80 nm

X-axis [nanometers] X-axis [nanometers]

$\lambda = 356 \text{ nm}$
 $\epsilon = -1 + 0.4i$
 $\mu = 1$

Resolution is enhanced by silver slab

However, low-loss metal is key for "Superlens"

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

Planer LHM act as a lens (movie)

RHM LHM RHM

Source Double focusing effect

$k > 0$ $k < 0$ $k > 0$

J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett., 85, 3966 (2000)
Simulator: MCFOT-3D Pro <http://www.feastcorp.com>

Rod arrayによる ϵ の制御

$\epsilon_{\text{rod}} = n \frac{\pi r^2}{a^2}$
 $\epsilon_{\text{rod}} = \frac{\pi \epsilon_0 r^2}{a^2} \frac{F(\omega)}{\omega^2}$

Electric resonance in **low** frequency

SRRによる μ の制御

Magnetic resonance in **high** frequency

combination of SRRs & Rod Array

Transmission Loss [dB] Frequency [GHz]

Periodic structure like nature materials
Each element mimicking atoms/molecules

Element size $\ll \lambda \sim 80 \text{ nm}$ (1/10 λ)
 \rightarrow Homogeneous medium

ω is far higher than natural magnetic resonance.

D. R. Smith, et al., Phys. Rev. Lett., 84, 4194 (2000)

Transmitted Power [dBm] Frequency [GHz]

Stop band ($\mu < 0$) SRRs only

Pass band (both ϵ & $\mu < 0$) SRRs & Rod Array

Propagating solution exists in LHM (both ϵ & $\mu < 0$).

Shelbyによる負屈折

Rotation in 1.5° steps Microwave absorber

Sample Prism shape LHM

18.43°

Shelby's law
 $n_{\text{air}} \sin \theta_{\text{air}} = n_{\text{LHM}} \sin \theta_{\text{LHM}}$
 $n_{\text{LHM}} = -2.7$

R. A. Shelby, et al., SCIENCE, 292, 77 (2001)

Focusing Experiment by LHM (@-10.5GHz)

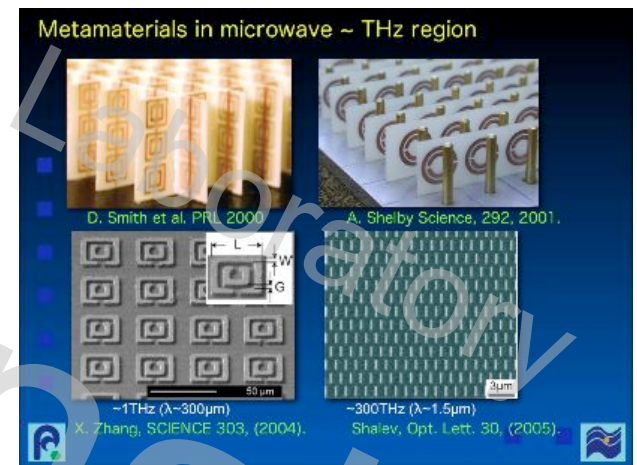
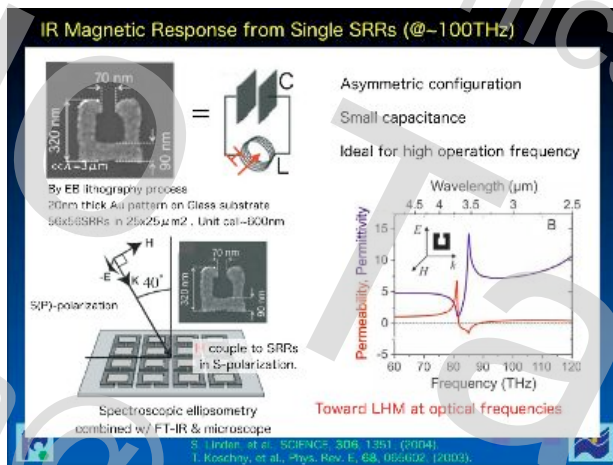
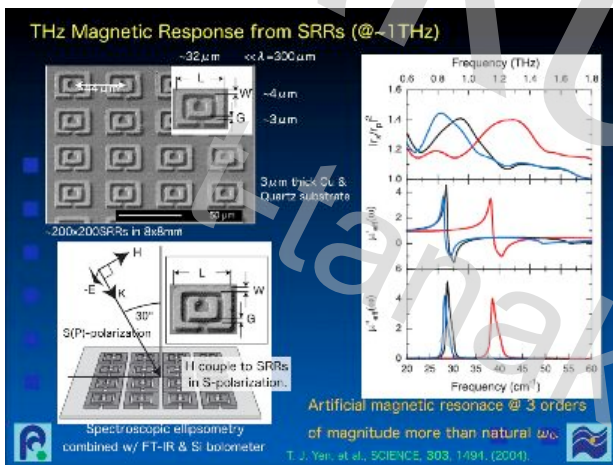
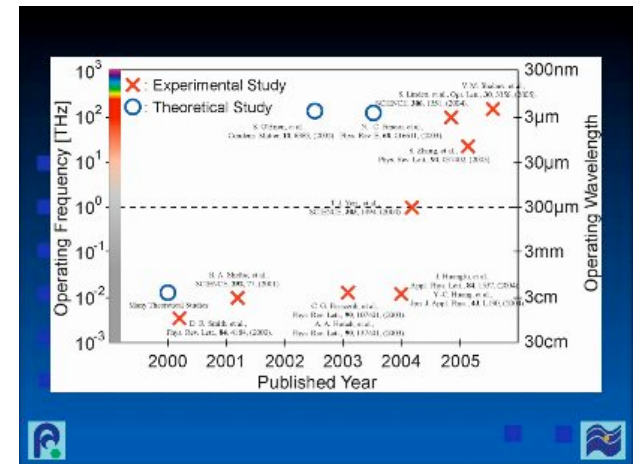
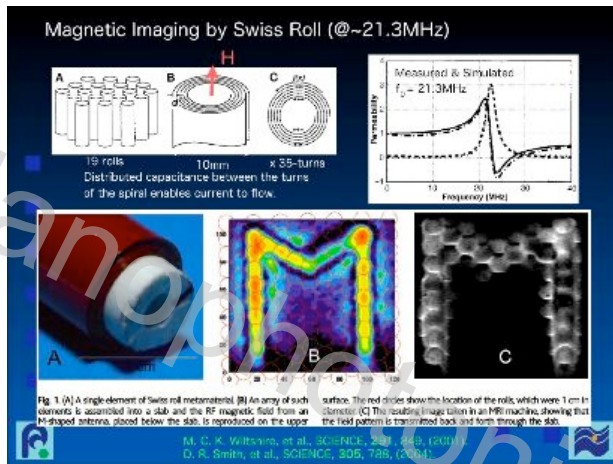
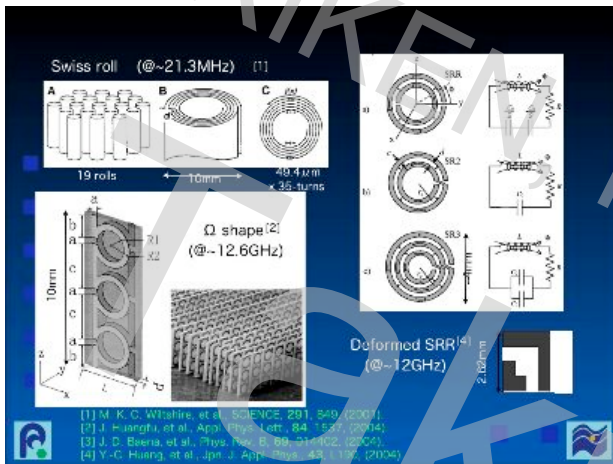
Experimental Numerical

out of pass band \rightarrow RHM

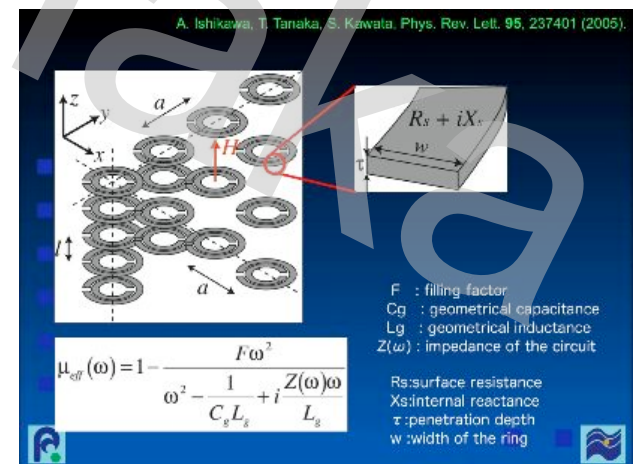
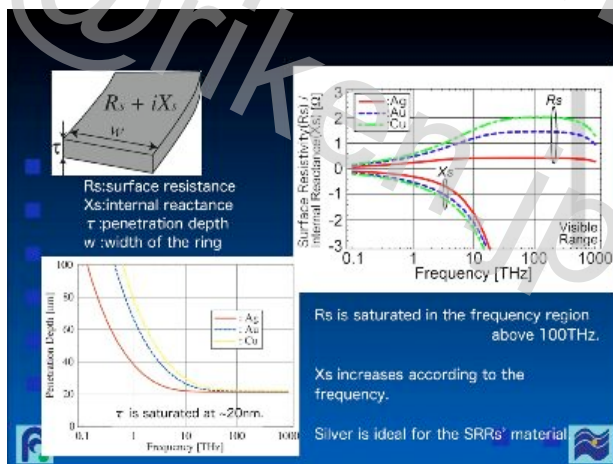
LHM acts as a Lens.

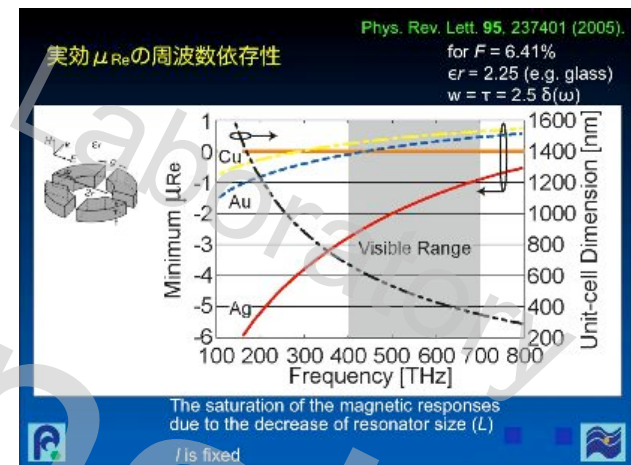
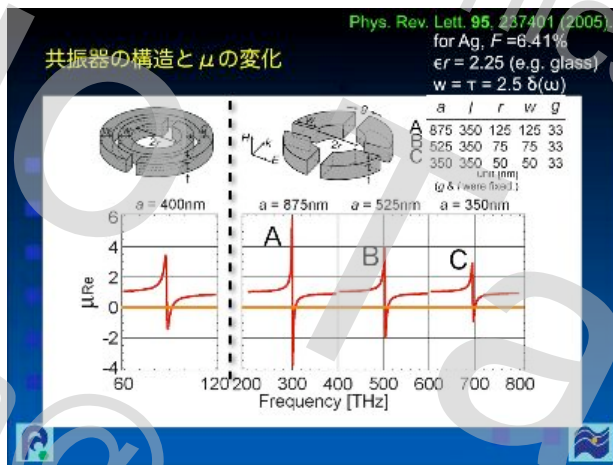
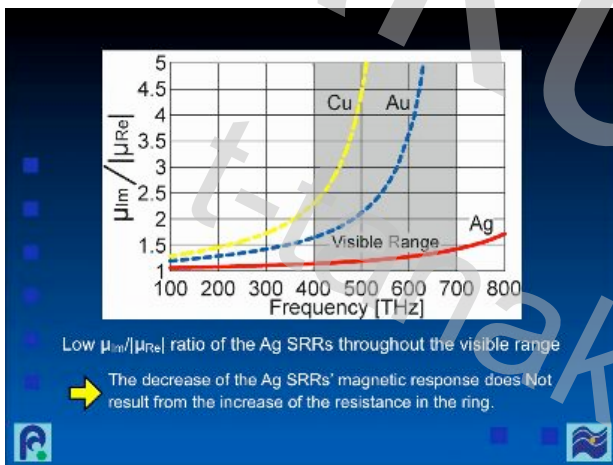
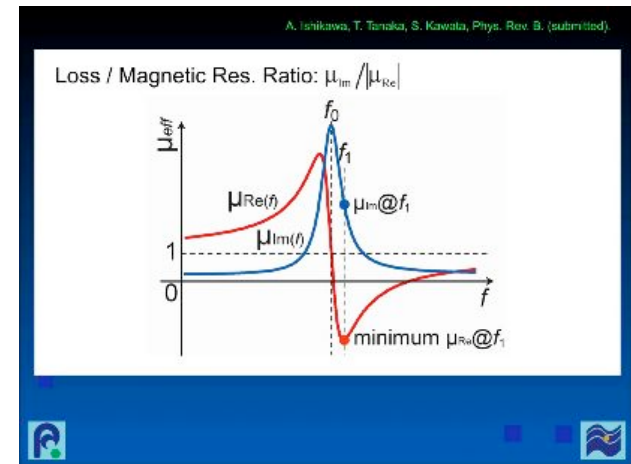
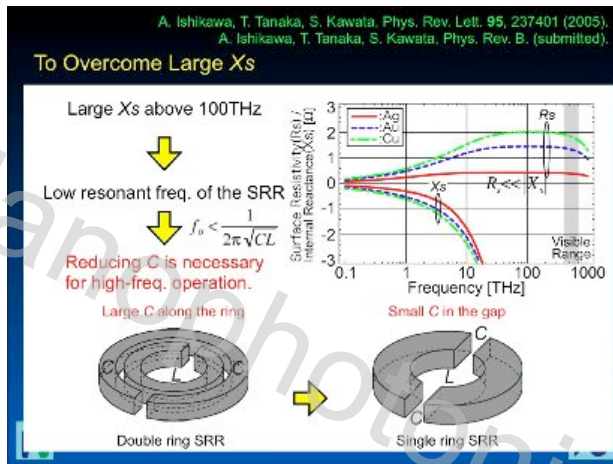
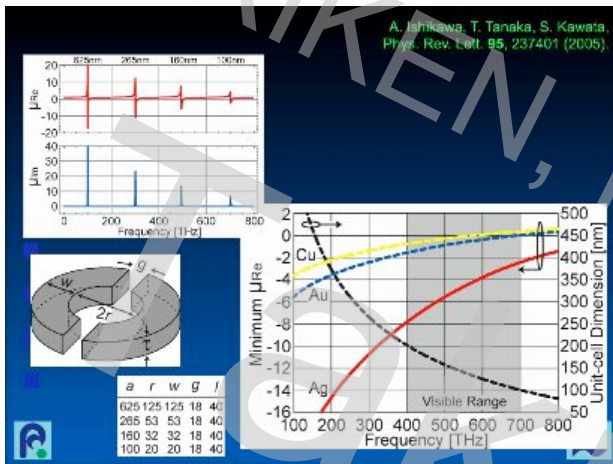
However, LHM has loss essentially. (absorption & dielectric loss)

A. A. Houck, et al., Phys. Rev. Lett., 90, 137401 (2003)



光の周波数でメタマテリアルは実現できるか?





Phys. Rev. Lett. 95, 237401 (2005).
Phys. Rev. B. (submitted).

Behavior of SRR in the Optical Freq. Region

frequency	~ 100THz	100THz ~
structure	double ring SRR	single ring SRR
required	large C & wide ring	small C & large L
resonant frequency	linear: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}$	nonlinear: $f_0 < \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}$
magnetic response	decreased due to resistance: R_s	saturation due to the decrease of L

- プラズモニック・メタマテリアルを実現するには、
1. **プラズモニックな材料**
豊富な自由電子, 低い電気抵抗 → 金属
誘導電流を流すために必須
 2. **デザインされた構造 (共振器)**
共振周波数は C, L で決まる.
高い Q 値が必要.
 3. **3次元**
3次元のアレイ構造に共振器を並べる.

どうやって作る?
Fabrication techniques

Conventional fabrication techniques

	Resolution	3D	metal
Photolithography	△	×(2D)	○
E-beam lithography	○	×(2D)	○
nanoimprint	○	×(2D)	△
Focused Ion Beam/ FIB-CVD	○	○	×

Bulk silver
Resistivity=1.62 x 10⁻⁸ Ωm

3次元の微小金属構造体を加工できない。

2光子吸収を利用すれば3次元加工ができる。

excited state
ground state
 $h\omega$
 $h(2\omega)$
 $h\omega$
 $h\omega$
Two Photon Absorption
ポリマー

S. Kawata et al.
Nature, 412, 697, 2001

Exposure time: 1ms / spot
Scanning step: 50 nm
Averaged power: 5 mW
Total time: 13min

金属イオンを光還元。
直接3次元金属構造を作る。

Femtosecond Laser
High NA Objective Lens
Two Photon Absorption and Photoreduction
3D Metal Structure
Host Material with Ag⁺/Ag

excited state
ground state
 $h(2\omega)$
 $h\omega$
 $h\omega$

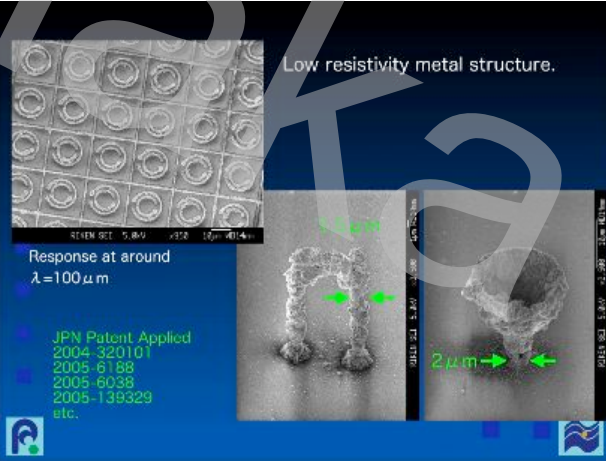
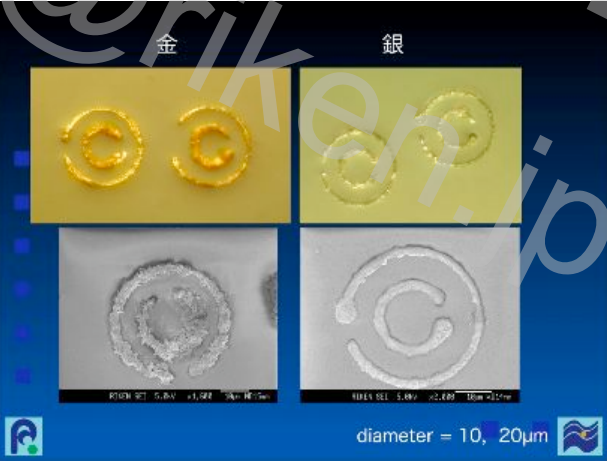
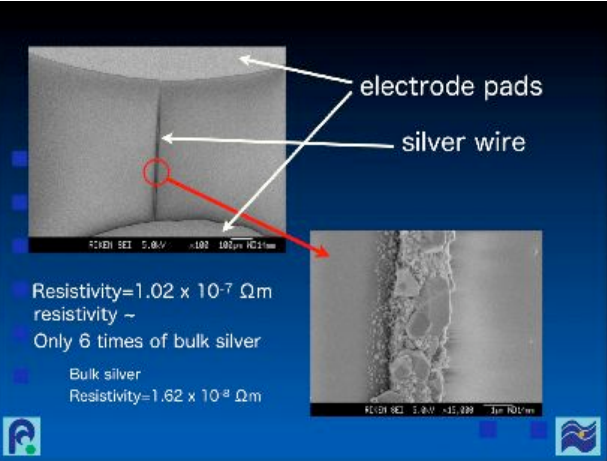
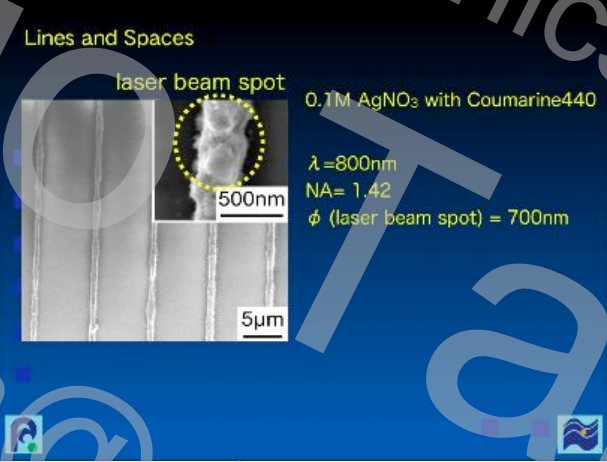
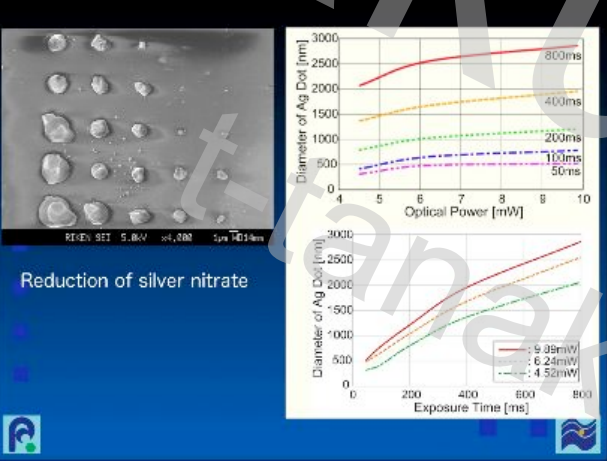
Estimation of the resolution by Diffusion theory Fick's 1st law

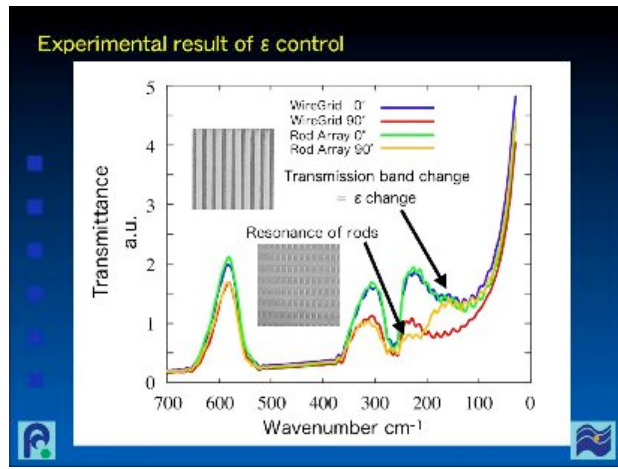
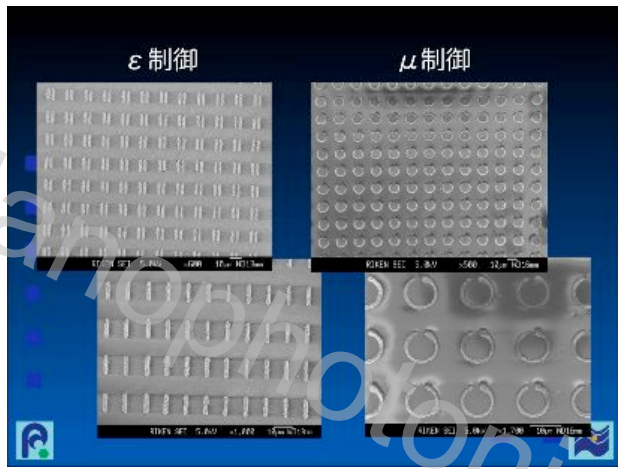
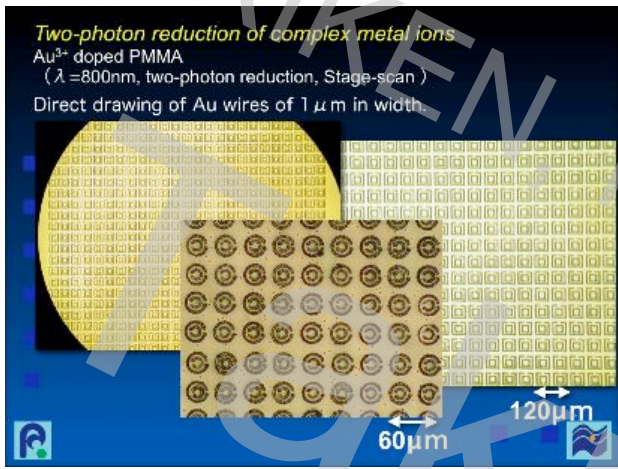
T. Tanaka et al, Appl. Phys. Lett. 88, 81107 (2006).

Metal Deposition: $\frac{4\pi(d/2)^2}{3} = tSD \frac{dC}{dr}$
 $S = 4\pi r^2$
 $\frac{dC}{dr} \sim \frac{C}{r}$
 Fick's 1st law
 $mV = tSD \frac{dC}{dr}$
 $C = 0.2 \text{ mol/l} = 21.573 \times 10^3 \text{ g/m}^3$
 $m = 10.5 \text{ g/cm}^3 = 10.5 \times 10^3 \text{ g/m}^3$
 $V = \frac{4\pi(d/2)^2}{3}$
 $S = 4\pi r^2$
 $\frac{dC}{dr} \sim \frac{C}{r}$
 $\frac{4\pi(d/2)^2}{3} = tSD \frac{dC}{dr}$

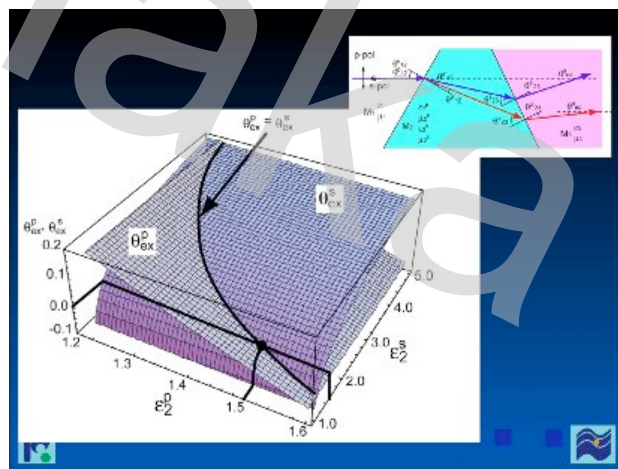
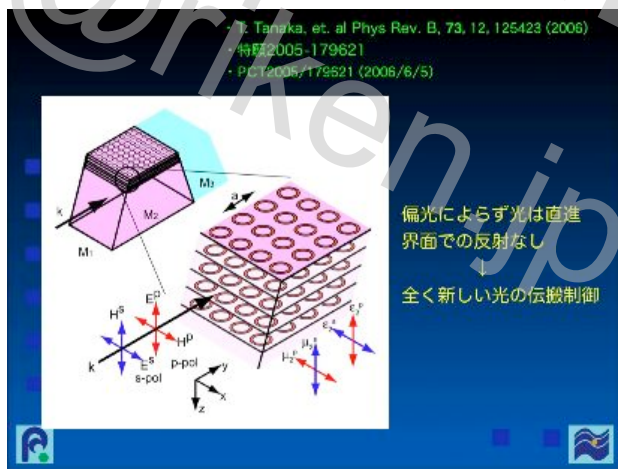
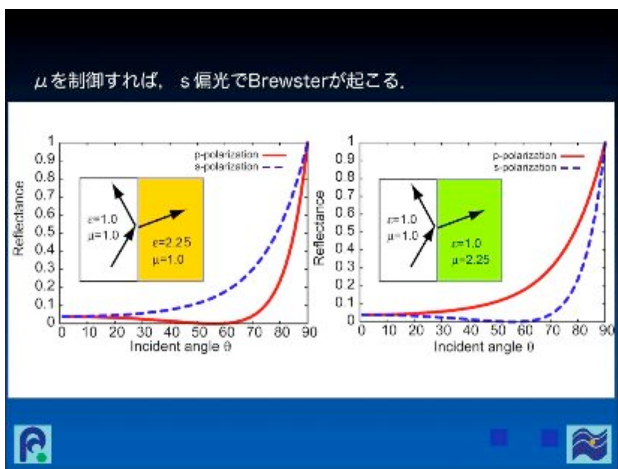
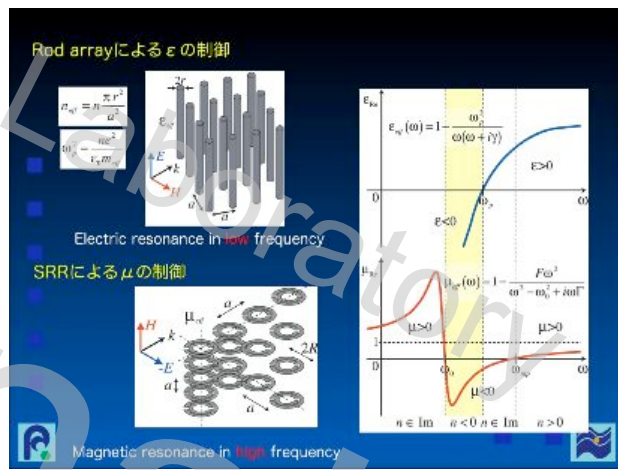
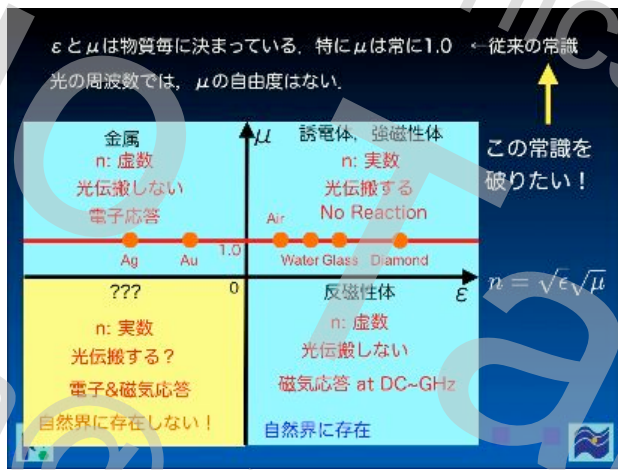
D: diffusion constant
Ag⁺ aq. solution => 1.648x10⁻⁹ m²/s
AgNO₃ = 0.2M, Exposure time=50ms
 $\phi = 1.12 \mu\text{m}$ c.f. exp. result $\phi = 1.02 \mu\text{m}$

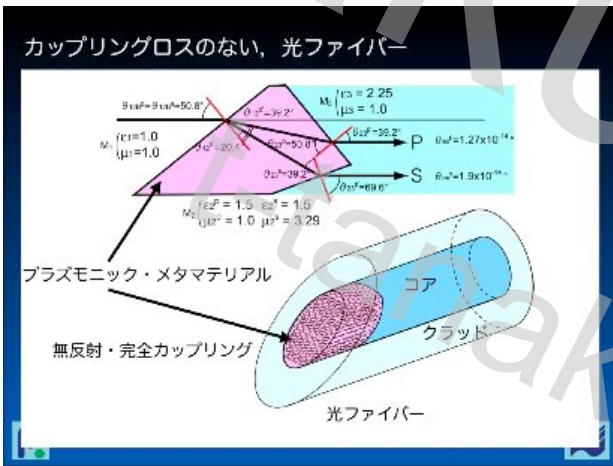
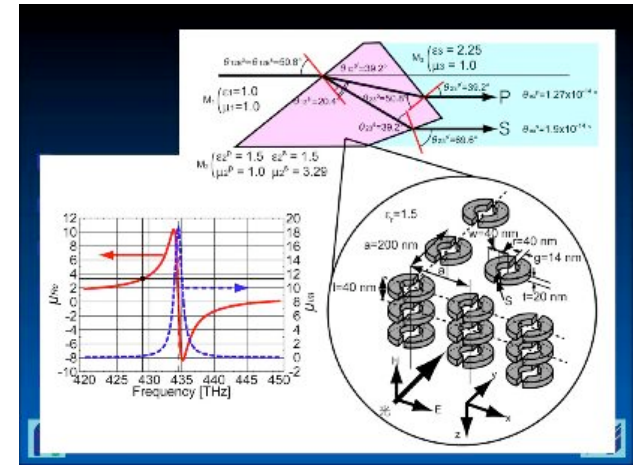
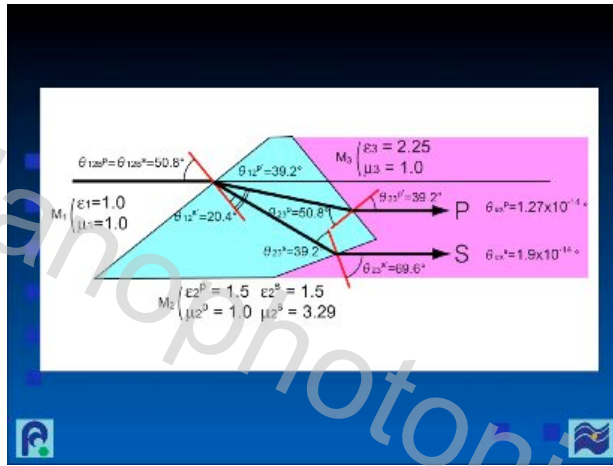
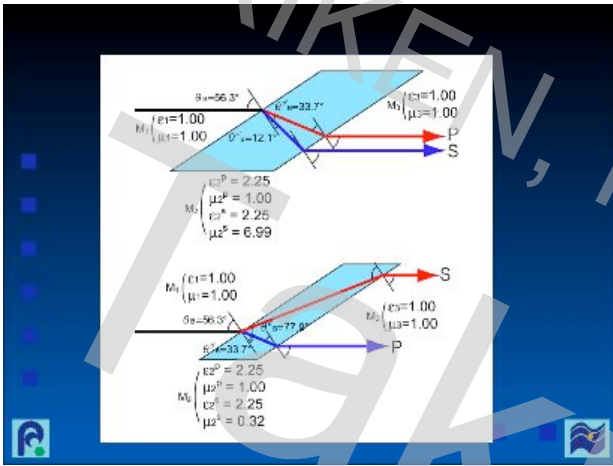
PSF





何に利用できるか?
 - 新奇光デバイスを目指して -





光回折体の新発見

物質の自由電子を利用した
研究が新光学素子

無反射・完全カップリングのロス抑制

日経産業新聞 (2/23/06) 化学工業新聞 (4/7/06) 日経産業新聞 (4/7/06) フジサンケイ (4/7/06)

まとめ

- (1) 3次元金属ナノ構造体と、その中の自由電子の振動を利用して、物質の ϵ 、 μ を制御する。
 プラズモニック・メタマテリアル
- (2) メタマテリアルを用いた新奇光学現象の発見
 偏光無依存 Brewster 素子
 物質の境界を消して、光を完全透過
 S偏光における Plasmon 共鳴
- (3) メタマテリアルの光学素子 (デバイス) への展開
 加工方法の開発 (加工時間, 精度, 解像度)
 測定方法の開発 (ϵ , μ は直接測れない)
 電磁気学的解析, ロスの問題