

メタマテリアル入門

(独)理化学研究所 田中メタマテリアル研究室
北海道大学 電子科学研究所

田中拓男

110122 バイオテンプレート研究会 16:00-16:50

Outline

1. メタマテリアルとは？ 光？
2. メタマテリアルの動作原理
3. メタマテリアルの応用
 - 機能材料としてのメタマテリアル
 - 反射を消すプリズム
 - 屈折率制御
4. メタマテリアルの加工法
 - 立体的な金属構造を光で作る

はじめに

メタマテリアルとは？
光とは？

メタマテリアルとは？

人工材料

メタマテリアルとは？

人工材料
↓
人工構造体による疑似材料

メタマテリアルとは？

人工材料
↓
人工構造体による疑似材料
↓
人工構造体を用いて特性を制御した疑似材料

メタマテリアルとは？

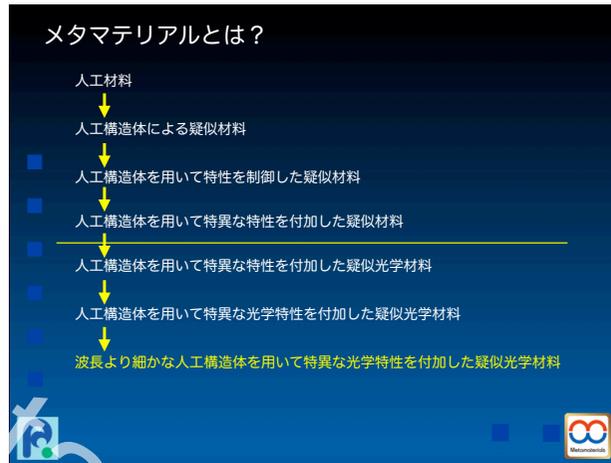
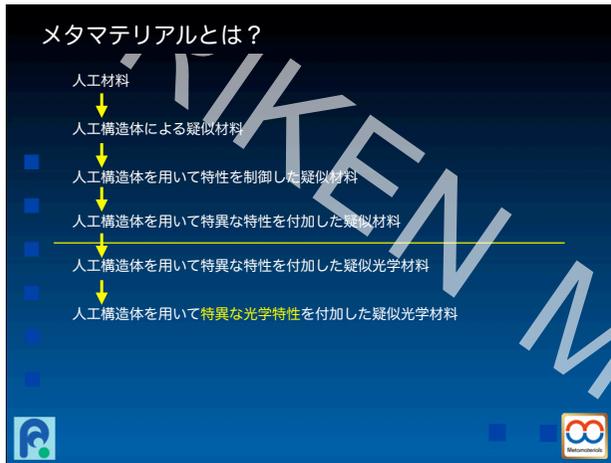
人工材料
↓
人工構造体による疑似材料
↓
人工構造体を用いて特性を制御した疑似材料
↓
人工構造体を用いて特異な特性を付加した疑似材料

メタマテリアルとは？

人工材料
↓
人工構造体による疑似材料
↓
人工構造体を用いて特性を制御した疑似材料
↓
人工構造体を用いて特異な特性を付加した疑似材料
普通じゃない物質
自然界には無い物質

メタマテリアルとは？

人工材料
↓
人工構造体による疑似材料
↓
人工構造体を用いて特性を制御した疑似材料
↓
人工構造体を用いて特異な特性を付加した疑似材料
↓
人工構造体を用いて特異な特性を付加した疑似光学材料



研究の状況

現状を一言でいうと

- 現在, THz~光周波数で動作するメタマテリアルを作ってます.

現状を一言でいうと

- 現在, THz~光周波数で動作するメタマテリアルを作ってます.

メタマテリアルとは作るもの

現状を一言でいうと

- 現在, THz~光周波数で動作するメタマテリアルを作ってます.

現状を一言でいうと

- 現在, THz~光周波数で動作するメタマテリアルを作ってます.

まだ出来ない.

現状を一言でいうと

- 現在, THz~光周波数で動作するメタマテリアルを作ってます.

まだ出来ない.
何か問題がある？

現状を一言でいうと

- 現在, THz~光周波数で動作するメタマテリアルを作ってます.

まだ出来ない.
何か問題がある？
何をすれば良いかはわかっている

現状を一言でいうと

現在、THz~光周波数で動作するメタマテリアルを作ってます。

まだ出来ない、何か問題がある？
何をすれば良いかはわかっている。
何をつかって
どんなものを
どうやって



現状を一言でいうと

現在、THz~光周波数で動作するメタマテリアルを作ってます。

動作する周波数が決まっている？



現状を一言でいうと

現在、THz~光周波数で動作するメタマテリアルを作ってます。

動作する周波数が決まっている？
いろんな周波数で動作するメタマテリアルがある。



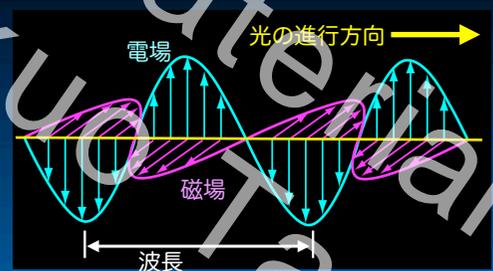
現状を一言でいうと

現在、THz~光周波数で動作するメタマテリアルを作ってます。

メカニズムがある



光とは？
電気（電場）と磁気（磁場）の波



電場

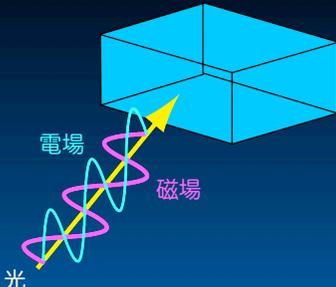
磁場

波長

周波数=光速/波長



光が物体に当たると？



電場

磁場

光



光を操る道具

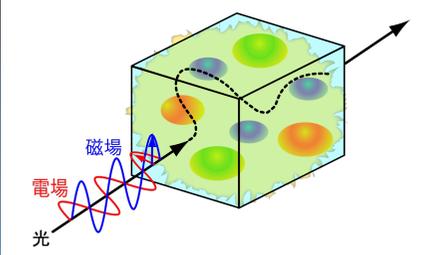
レンズ 屈折

プリズム 分散

導波 散乱 偏光回転

反射 鏡

光ファイバー

「光を操る」ということは「屈折率の分布を操る」こと

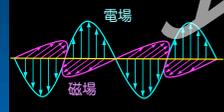


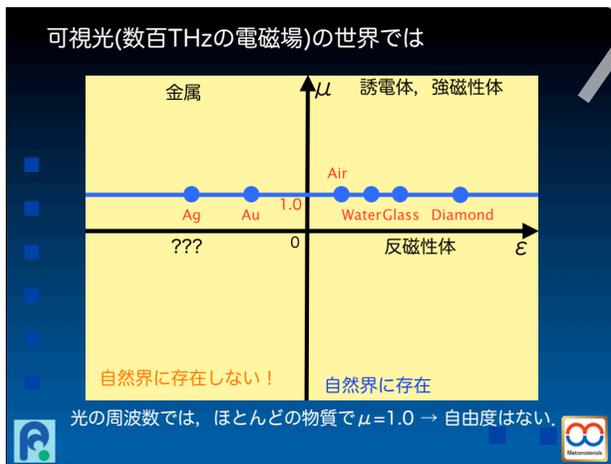
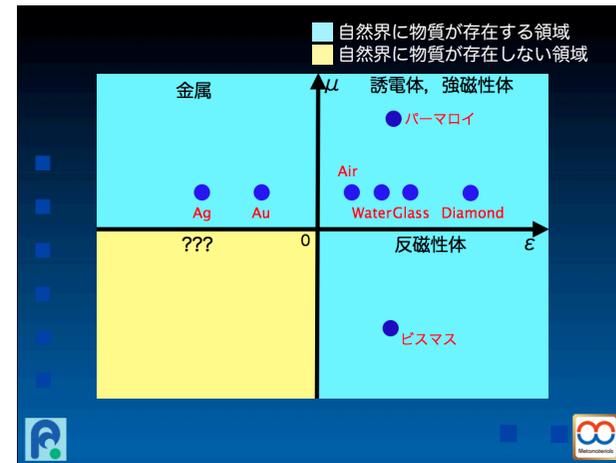
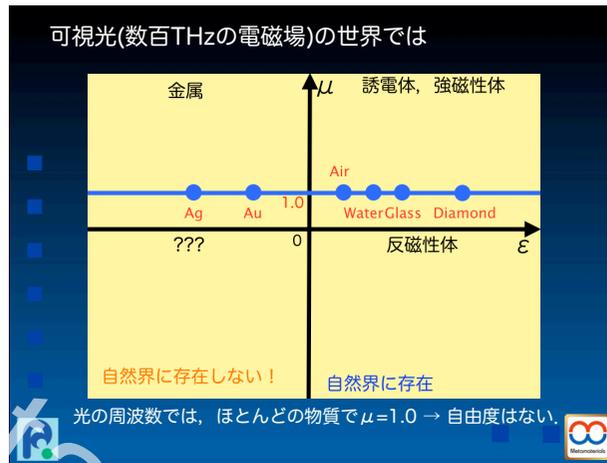
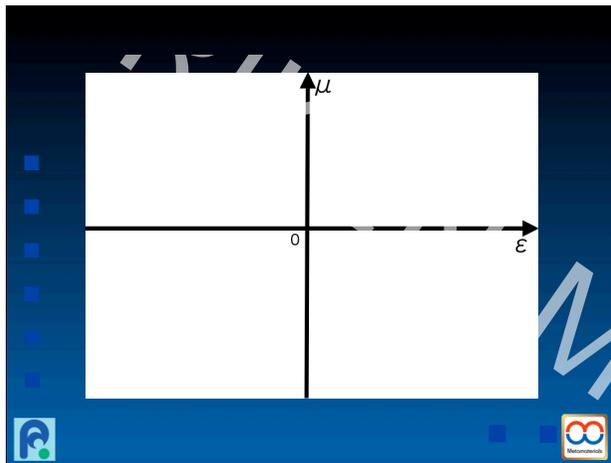
屈折率をさらに細かく見ると？

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

ϵ : 比誘電率
物質と電気の波との作用を記述

μ : 比透磁率
物質の磁気の波との作用を記述



光の世界では, 屈折率は

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

$\mu=1.0$

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

屈折率は誘電率 ϵ だけで決まるとする

同じ磁性でも

永久磁石のようにN極, S極が固定されているわけではない.

交流磁場:
N極, S極は光の周波数で入れ替わっている.

$\mu \neq 1.0$ の物質を作るには?
(磁性を持った物質)

同じ磁性でも

永久磁石のようにN極, S極が固定されているわけではない.

交流磁場:
N極, S極は光の周波数で入れ替わっている.

Fe Cu Al

μ ≠ 1 の物質を作るには？

光の磁場に応答し、新たな磁場を作り出すしくみをつくる

円電流を流す

金属のリング構造

Coil

加えた磁場より強い磁場は作れない
透磁率は 0.0 < μ < 2.0 を示す

μ ≠ 1 の物質を作るには？

光の磁場に応答し、新たな磁場を作り出すしくみをつくる

円電流を流す

金属のリング構造

加えた磁場 作り出された磁場

誘導電流: J

加えた磁場より強い磁場は作れない
透磁率は 0.0 < μ < 2.0 を示す

共振現象を利用する

強い内部磁場を作り出し、透磁率を大きく変化させる

リングの一部に切れ目を入れ、LC共振回路を作る

C: キャパシタンス
L: インダクタンス

共振周波数:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}$$

の低周波数側で μ > 1
の高周波数側で μ < 1
が実現できる

光の波長より小さな磁気共振器を3次元的なアレイとして集積化する。
光には個々の共振器は見えない
集団的な電子の振動（プラズモン）が、電場、磁場を作り出す。

ナノサイズの金属構造体と電子の振動（プラズモン）で ε, μ を制御

↓

プラズモニック・メタマテリアル

Nano-scale resonator array

Plasmonic Metamaterial

D. R. Smith, et al., Phys. Rev. Lett., 84, 4184, (2000).

初の SRRs & LHM (@~4.8GHz)

SRRs & Rod Arrayの組み合わせ

自然界の物質の様に、人工的な原子が
周期的に配列された人工物質

要素構造の大きさ << λ ~60mm (1/10λ)

→ 一樣な物質として振る舞う

メタマテリアルの電磁気学的解析
光のメタマテリアルはできるのか？

PHYSICAL REVIEW LETTERS

Negative Magnetic Permeability in the Visible Light Region

Atsushi Ishikawa,^{1,2} Takuo Tanaka,^{1,4} and Satoshi Kawata^{1,2}

Recently, controlling optical properties of materials by an array of metallic subwavelength-structured objects has attracted much interest from researchers. This artificial material referred to as "metamaterial" conceptually enables us to freely specify the permittivity (ε) and the permeability (μ) in a particular frequency region. In particular, a splitting resonator (SRR) [1], which acts as an artificial magnetic atom, is a powerful tool for obtaining a negative μ, with which we can create a left-handed material (LHM) exhibiting unique electromagnetic phenomena [2]. By using the SRR, negative μ materials and LHMs have already been demonstrated in the microwave region [3,4].

On the other hand, in the high frequency region above THz, it was believed that obtaining strong magnetic responses from such metallic structures is impossible because of Ohmic loss. However, recently some experimental studies on magnetic properties of SRRs have been reported at 1 THz [5], at 60 THz [6], and particularly at 100 THz [7], and now the interest of this field is moving to

where δ(z) is the skin depth [10]. The real and imaginary parts of Z_s(ω) are the surface resistivity R_s and the internal reactance X_s, respectively. In the optical frequency region, Eq. (2), including the skin effect, enables us to describe the conduction characteristics property. However, particularly in the frequency region above 100 THz, which is in our interest, we must consider not only the delay of the current but also the displacement current inside the metal. To describe these phenomena, we derived the following equation for the internal impedance of the plate conductor from the Maxwell's equations without any approximation:

$$Z_s(\omega) = \frac{1}{\sigma(\omega)\delta(\omega)} = R_s(\omega) + iX_s(\omega), \quad (3)$$

where ε_s and μ_s are the permittivity and the permeability of vacuum, respectively. Note that the "1" in the denominator of Eq. (3) represents the effect of the displacement

Splitリング共振器 (Split Ring Resonator, SRRs)

Induced Current

Loop antenna + LC resonant circuit

等価回路

目標

1T~1000THz帯におけるSRRの振る舞いの解析
可視光領域で動作するSRRの設計 (デザイン)

マイクロ波と光波との違い

金, 銀, 銅 → マイクロ波領域では完全導体
光波領域では完全導体ではない

目標

1T~1000THz帯におけるSRRの振る舞いの解析
可視光領域で動作するSRRの設計 (デザイン)

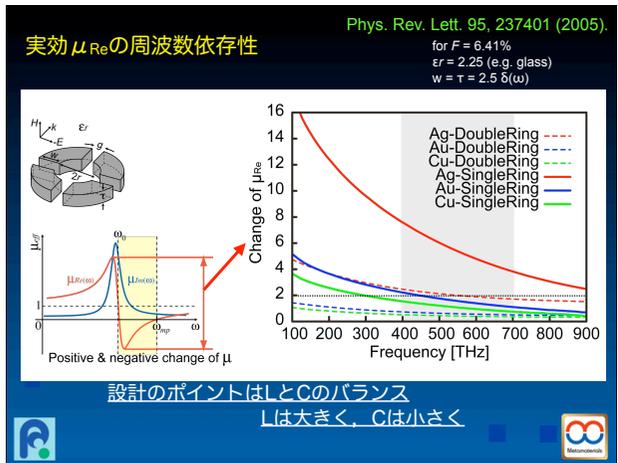
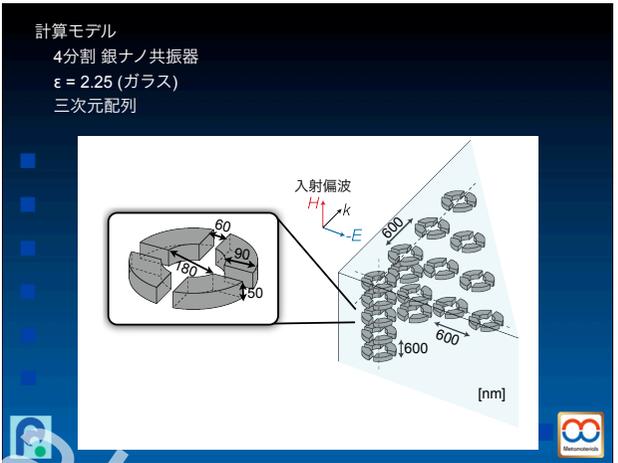
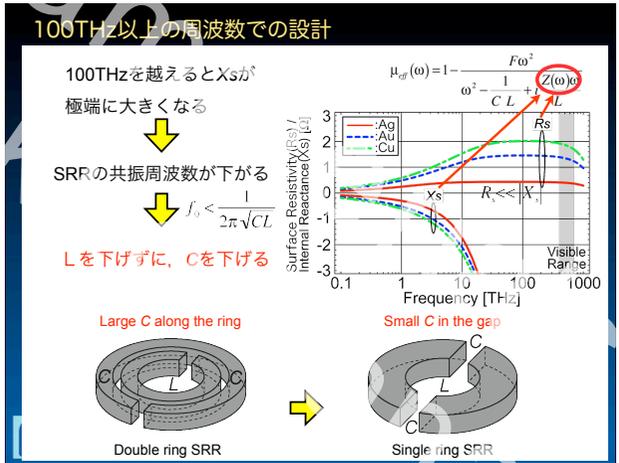
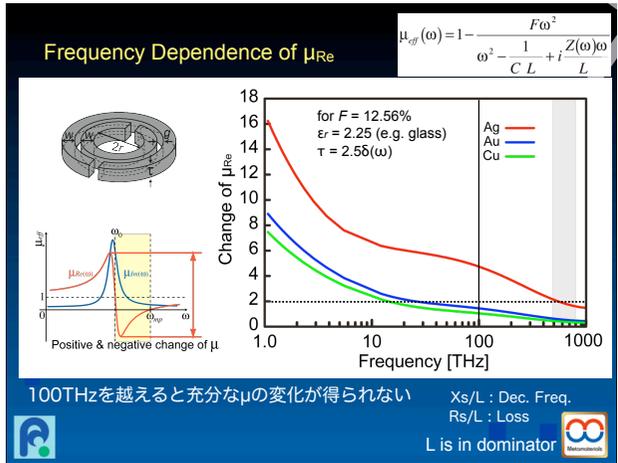
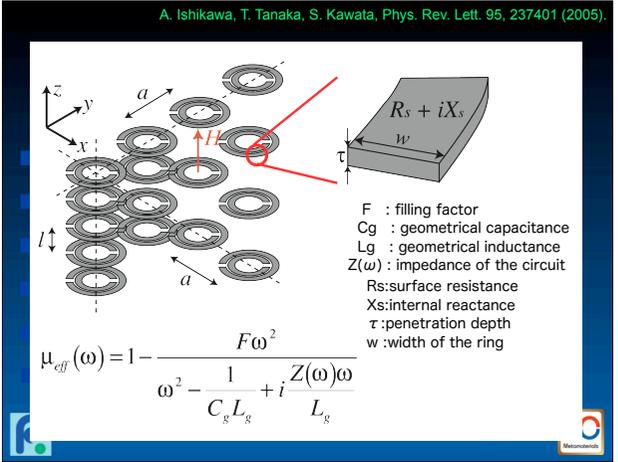
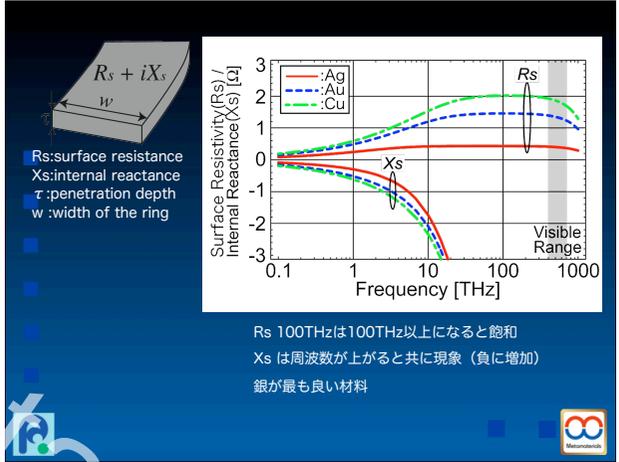
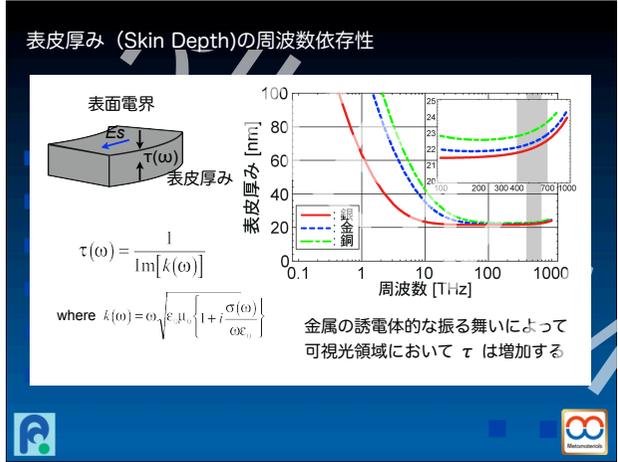
金属の特性を記述する式
金の金らしさ, 銀の銀らしさ

内部インピーダンス

$$Z_s(f) = \frac{Es}{\int_0^{\delta} J(f, z) dz} = R_s(f) + iX_s(f)$$

Rs: 表面抵抗
Xs: 内部リアクタンス

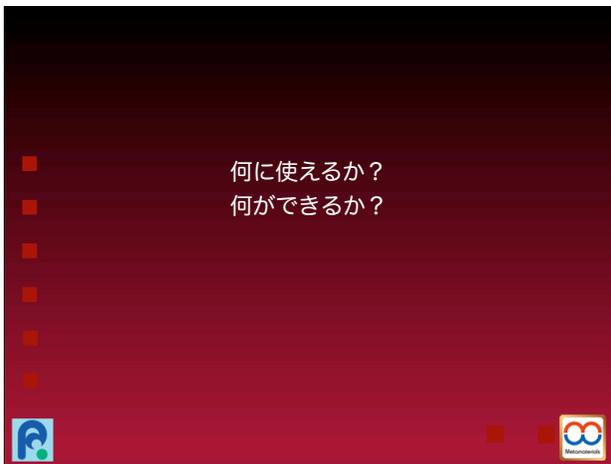
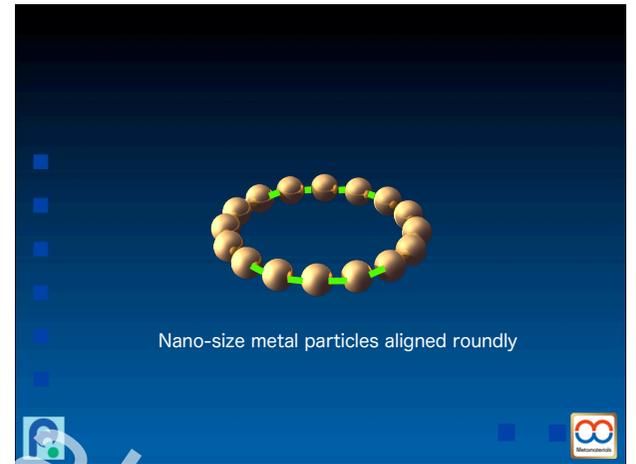
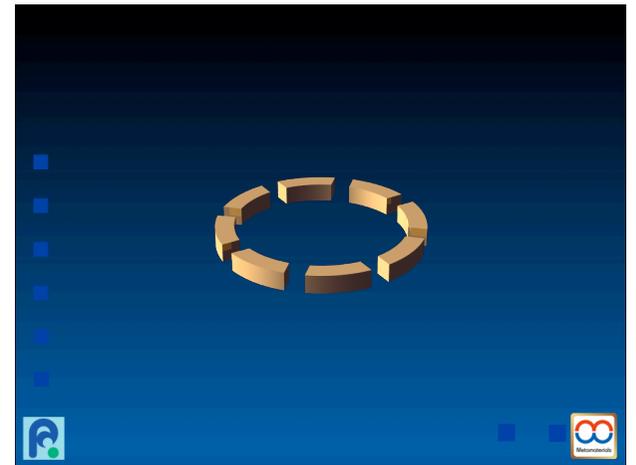
金属の誘電率: P. B. Johnson, et al., Phys. Rev. B, 6, 4370 (1972)

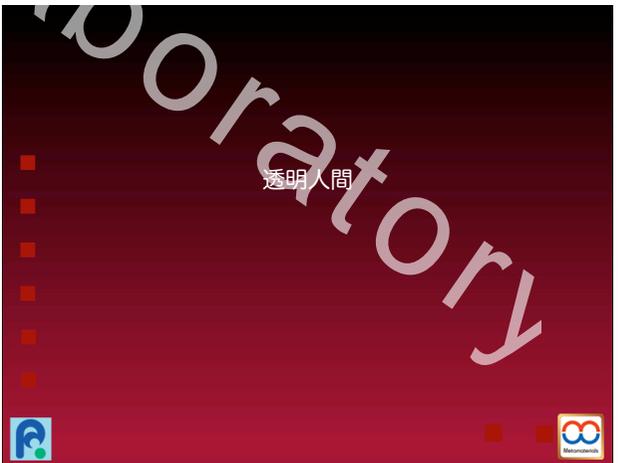
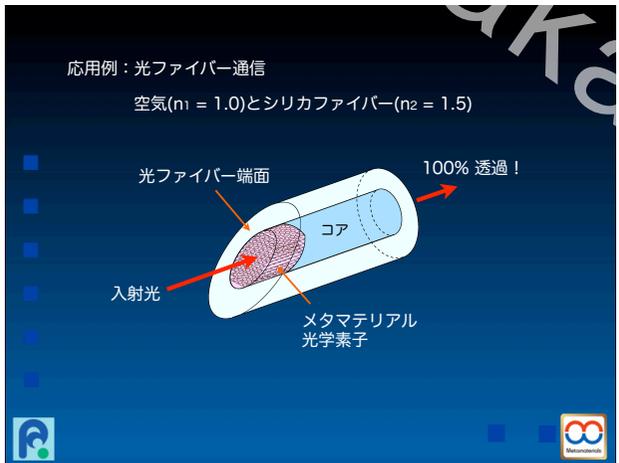
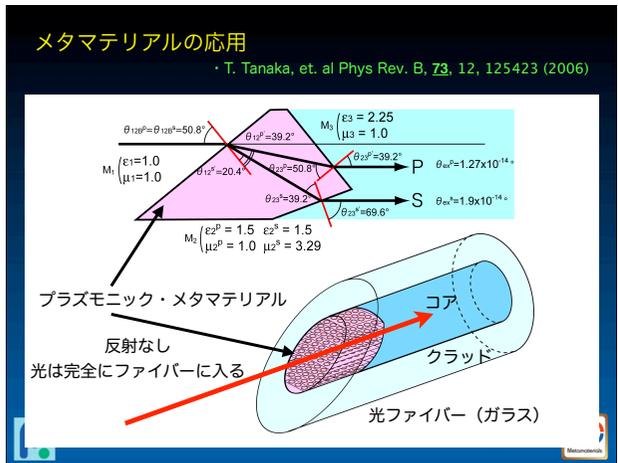
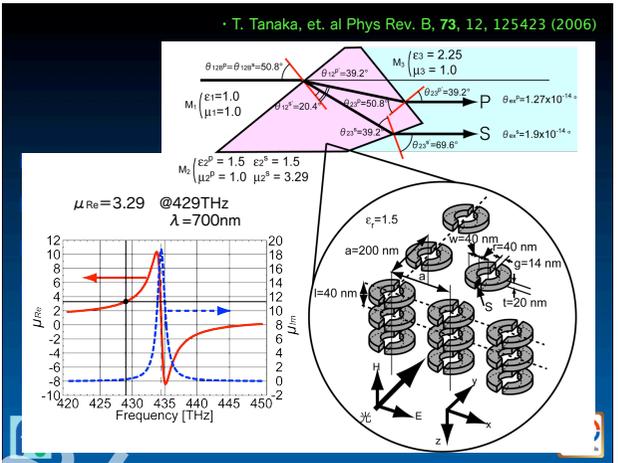
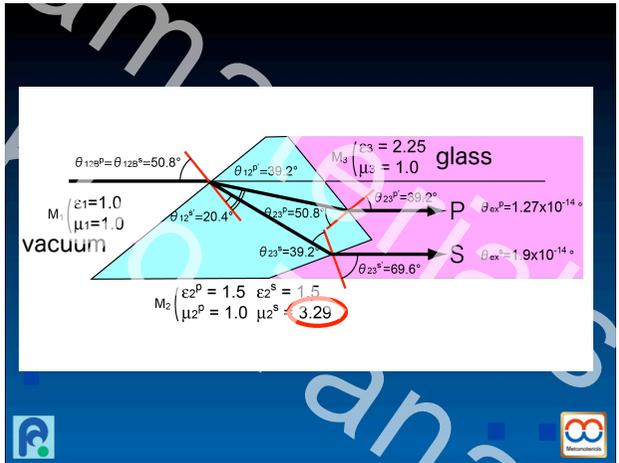
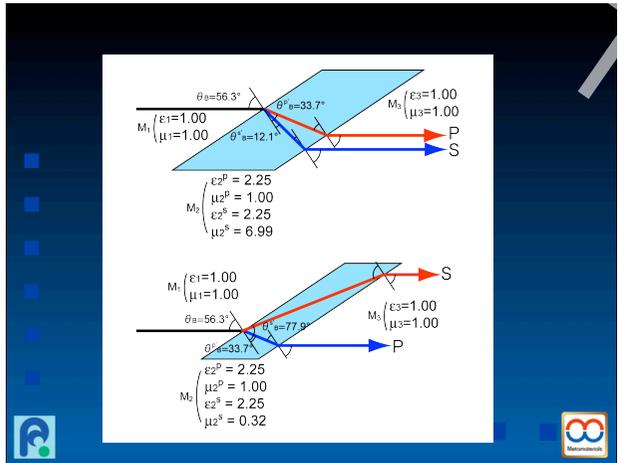
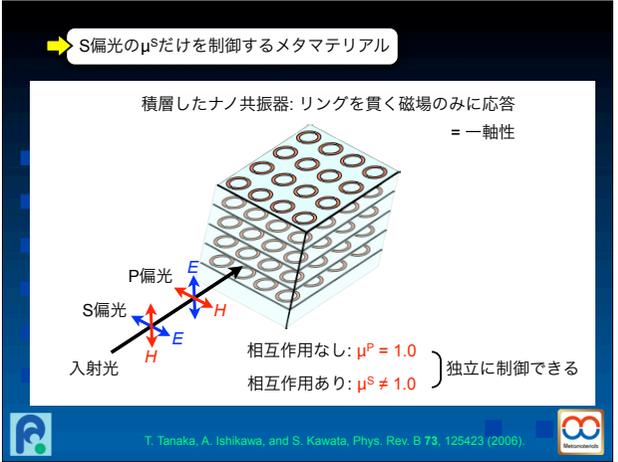
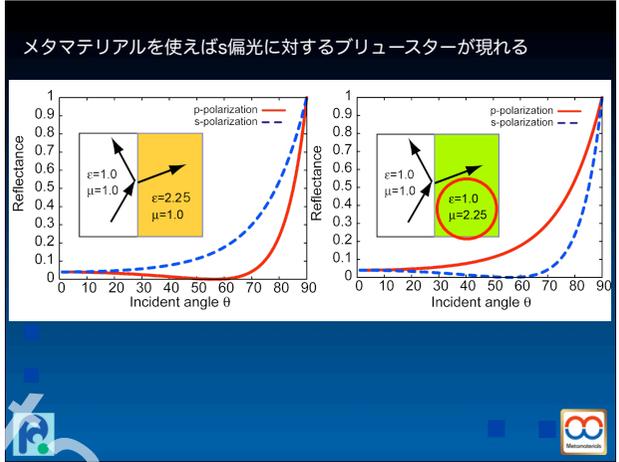
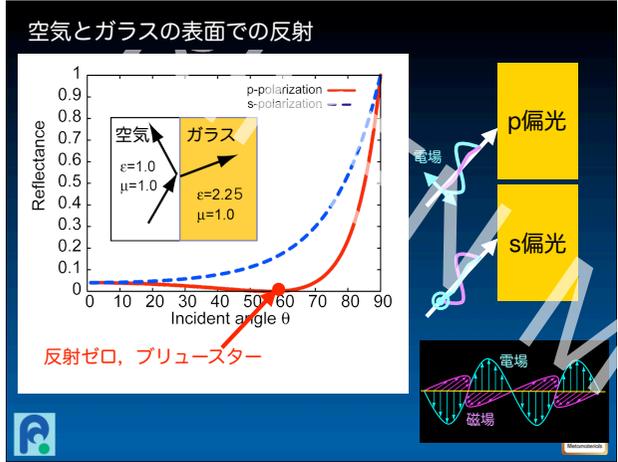


光周波数領域における磁気応答実現のための設計方針

周波数	~ 100THz	100THz ~
共振構造	Double-ring SRR	Single-ring SRR
条件	大きい C & 幅広リング	小さい C & 大きい L
共振周波数	$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}$	$f_0 < \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}$
磁気応答	表面抵抗 (Rs) の増加	構造の縮小 = Lの減少







透明人間

SCIENCE, Vol. 312 (2006) p.120

NEWS OF THE WEEK

PHYSICS

High-Tech Materials Could Render Objects Invisible

No, this isn't the April issue of *Science*, and you, you read the headline correctly. Materials already being developed could funnel light and electromagnetic radiation around any object and render it invisible, theoretical physicists predict online in *Science* this week (www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1125907 and ... 1126493). In the near future, such cloaking devices might shield sensitive equipment from disruptive radio waves or electric and magnetic fields. Cloaks that hide objects from prying eyes might not be much further off, researchers say.

The papers are "visionary," says George Eleftheriades, an electrical engineer at the University of Toronto in Canada. "It's pioneering work that sets the stage for future research." Greg Gbur, a theoretical physicist at the University of North Carolina, Charlotte, notes that others have studied invisibility but says the new papers describe more precisely how to achieve it. "Each gives specific examples of how you might design an invisibility device," he says.

From spaceships that vanish in *Star Trek* movies to Harry Potter hiding beneath his imperceptible cloak, invisibility has been a mainstay of science fiction and fantasy. But it might become a reality thanks to emerging

The invisibility isn't perfect. It works only in a narrow range of wavelengths. The authors map out the necessary speed variations and how it is to obtain the materials that will produce them. But researchers already know how to design metamaterials to achieve such bizarre properties, at least for radio waves, says Nadia Fanghena, an electrical engineer at the University of Pennsylvania. "It's not necessarily easy, but the recipes are there," says Fanghena, who last year proposed using a metamaterial coating to construct an object's ability to redirect light, making combinations nearly transparent.

Cloaking devices for radio waves could appear within 10 years. Clear eyes and cloaks for visible light are conceivable. Pendry notes that even a cloak for static fields would, for example, let technicians insert sensitive electronic equipment into a magnetic resonance imaging machine without disturbing the machine's precisely tuned magnetic field.

Also, even if invisibility proves possible, it may not work the way it does in the movies. For example, a cloaking device would be useless for spying. Pendry says, "Nobody can see you in there, but of course you can't see them, either." Keeping track of your always-invisible device might be a pain, too.

—ADRIAN CHO

U.S. COURTS

'Disappointed' Butler Exhausts Appeals



なぜ姿が見えるのか？




なぜ姿が見えるのか？

1. 反射光が目へ届く




なぜ姿が見えるのか？

2. 透過光を体が遮る




なぜ姿が見えるのか？ → 見えなくするには？

1. 反射光が目へ届く

2. 透過光を体が遮る




光を迂回させる

見えないゾーン

メタマテリアル：特殊な屈折率分布



光を迂回させる → 反射されない & 遮蔽されない

光を巧みに曲げることが必要

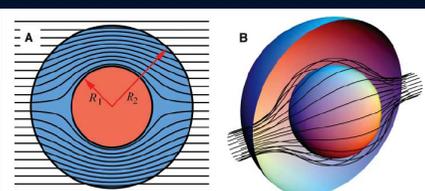



Fig. 2. A ray-tracing program has been used to calculate ray trajectories in the cloak, assuming that $R_2 \gg \lambda$. The rays essentially following the fronting vector. (A) A two-dimensional (2D) cross section of rays striking our system, diverted within the annulus of cloaking material contained within $R_1 < r < R_2$ to emerge on the far side undeviated from their original course. (B) A 3D view of the same process.



Cloakingを実現するメタマテリアル

PHYSICS

Voilà! Cloak of Invisibility Unveiled

Just 5 months after predicting it should be possible, a team of physicists has produced a cloaking device that renders an object invisible—at least when viewed in microwaves of a particular wavelength.

The cloak is hardly perfect: Instead of an all-concealing sphere, it's a ring that works only for microwaves striking along a plane. The microwaves must also be polarized perpendicular to the plane. And even then, the cloak reflects some of the waves and casts a slight shadow. Nevertheless, "It's a very good achievement," says Ulf Leonhardt, a theorist at the University of St. Andrews in the United Kingdom. "It's surprising that it's as simple as it is and that it works so well."

The cloak embodies the theory laid out by theorist John Pendry of Imperial College London and experimenters David Schurig and David Smith, who work in the electrical and computer engineering department at Duke University in Durham, North Carolina. In May the team showed that, in principle, it's possible to ferry electromagnetic waves such as light around an object by surrounding it with a "metamaterial": an assemblage of tiny

experimenters to design the material. When Schurig, Smith, and colleagues worked out the details, they found that their two-dimensional device required only C-shaped copper rings nested side by side. The team also simplified the parameters specified by the theory. The changes made the metamaterial easier to build but also left the cloak slightly reflective, as the team reports online this week in *Science* (www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1126285). "The goal of this paper was to demonstrate that we more or less have the mechanism and that we can design the materials to the parameters," Schurig says.

Even the simplified cloak is a significant advance, says Costas Soukoulis, a theorist at Iowa State University in Ames and the U.S. Department of Energy's Ames Laboratory. "This is very, very important that experiments have produced what theorists had predicted," Soukoulis says. Microwave cloaks might be useful for hiding radar, he says.

It may take years for researchers to make a cloak for visible light. Still, most believe such a thing should be possible now that a cloak for microwaves has been built. After all, not seeing is believing.

—ADRIAN CHO

SCIENCE VOL. 314 20 OCTOBER 2006 403



極薄、極小レンズ



屈折率高めレンズ薄く メガネカメラに応用

理研透明材料にリング状金属

日経産業新聞
2007/4/18 11面

New refractive index control

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

$n=1.76$
 $\epsilon=3.10$
 $\mu=1.0$

$+0.12$
 $\times 1.023$

$n=1.80$
 $\epsilon=3.24$
 $\mu=1.046$
 $(1.023)^2$

どうやって作るか？

プラズモニック・メタマテリアルの加工法

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)**
共鳴周波数は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。これが最大の技術的課題

髪の毛 100μm
100nm ... 1000個 ...

等方性メタマテリアル

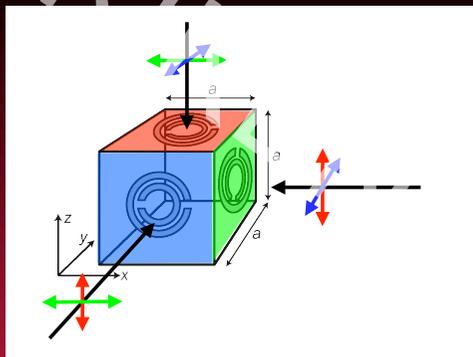
isotropic metamaterials

isotropic metamaterials

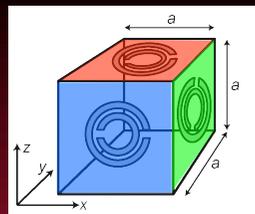
isotropic metamaterials

isotropic metamaterials

isotropic metamaterials

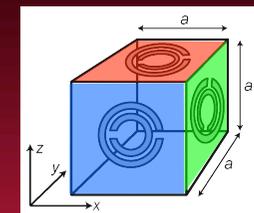


等方性メタマテリアル



等方性メタマテリアル

ナノスケールの立体的な金属構造



	解像度	3D	金属
光リソグラフィ	△	×(2D)	○
電子ビームリソグラフィ	○	×(2D)	○
ナノインプリント	○	×(2D)	△
集光イオンビーム(FIB)/ FIB-CVD	○	○	×

Bulk silver
Resistivity = $1.62 \times 10^{-8} \Omega m$

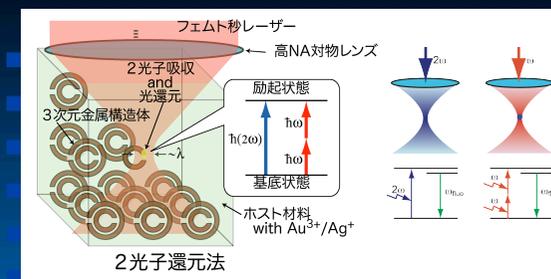
3次元の微小金属構造体を加工できない。

金属の加工という...



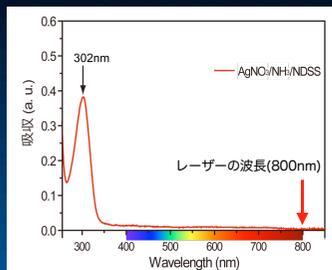
2光子還元法

金属イオンを光還元. 直接3次元金属構造を作る.

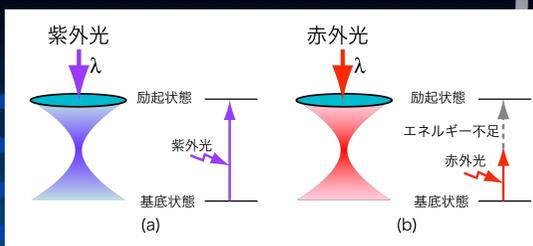


銀イオン材料の特性

紫外線を吸収
近赤外光では吸収ゼロ (完全透明)



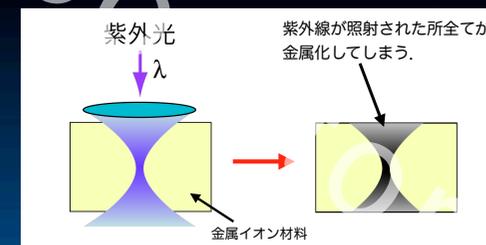
金属イオンを含む材料は、紫外光では感光するが、赤外光では感光しない



赤外光はエネルギー不足 (振動数不足) でイオンを還元できない。
(注)強度不足という意味ではない。

赤外線ヒーターでは、日焼けしないのと同じ

もし材料が吸収する紫外光を照射すると?

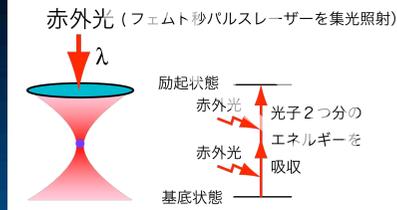


レーザーを集光した"1点"だけで金属化して欲しい。

集光点では紫外光を照射した事に、集光点以外では光を当てていないことにしたい。

2光子吸収

エネルギー不足の赤外光でも、いっぱい集まれば...



光子密度が極めて高ければ、2つの光子のエネルギー合算されて光吸収に利用される。

赤外線ストーブで日焼けしているのと同じ!!



フェムト秒レーザー

100フェムト秒 (1兆分の1秒) だけ輝くレーザー光

光: 1秒間に30万km (地球7周半) 進む
100フェムト秒間には30μmしか進めない
(髪の毛の直径が約100μm)

光のパワーが一瞬の瞬きに集中した特殊な光



光子密度の高い状態を作るために

・フェムト秒パルスレーザー (時間的な圧縮)

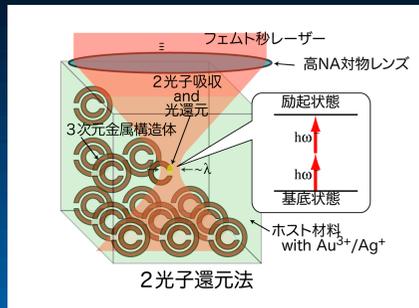
100フェムト秒 (10^{-13} 秒) だけ輝くレーザー
(100fsの間に光は30μmしか進めない、光速=30万km/s)



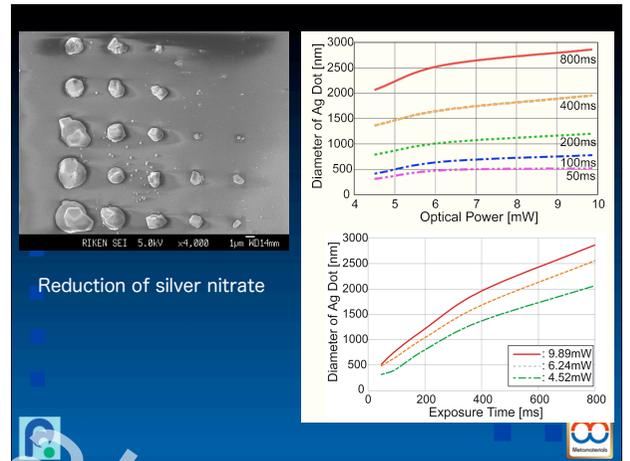
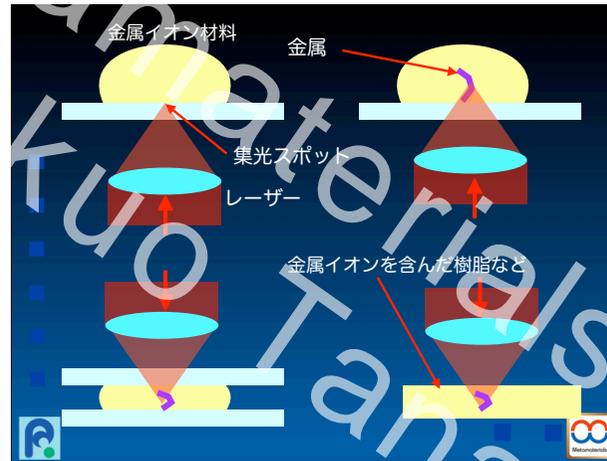
・レンズで集光 (空間的な圧縮)



空間中でレーザースポットを走査すると、その軌跡に沿って金属が生まれてくる。



2光子還元法

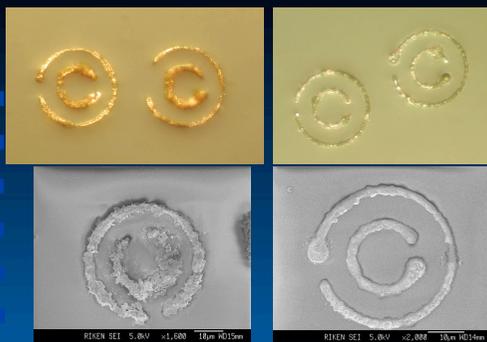


Reduction of silver nitrate



金

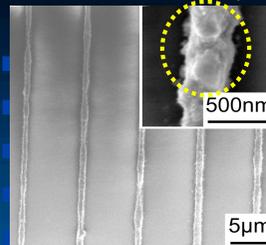
銀



diameter = 10, 20μm



laser beam spot



0.1M AgNO₃ with Coumarine440

$\lambda = 800\text{nm}$

NA = 1.42

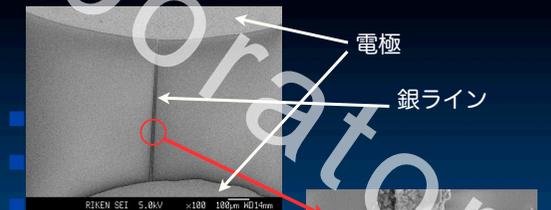
ϕ (laser beam spot) = 700nm

5μm



電極

銀ライン



抵抗率= $5.3 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$

バルクの銀と比べて高々3.3倍

Bulk silver
Resistivity= $1.62 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$



プラスチック(PMMA)の中に作った金の構造
 Au³⁺ doped PMMA
 (λ = 800nm, two-photon reduction, Stage-scan)
 線幅1 μmの金線を直接描画

RIKEN SEI 5.0kV ×15,000 1μm WD14mm

RIKEN SEI 5.0kV ×15,000 1μm WD14mm

RIKEN SEI 5.0kV ×2,500 10μm WD15mm

レーザースポット

120nm

RIKEN SEI 5.0kV ×70,000 100nm WD14mm

髪の毛の1000分の1の太さ

Without surfactant

RIKEN SEI 5.0kV ×15,000 1μm WD14mm

Without surfactant

Surfactant assisted

RIKEN SEI 5.0kV ×15,000 1μm WD14mm

2光子還元法で作成した3次元ナノ金属構造

120nm

RIKEN SEI 5.0kV ×55,000 100nm WD14mm

RIKEN SEI 5.0kV ×33,000 100nm WD14mm

Cao et. al. submitted to Small

10 μm

1 μm

2光子還元法の特徴改善

銀イオンのみ	Coumarine440添加	NDSS
200~400mW	20mW	1~2mW

RIKEN SEI 5.0kV ×2,500 10μm WD15mm

Appl. Phys. Lett. 91, 113118 (2007)
 光の磁場成分によって励起されたメタマテリアルの磁気応答特性の実験評価

(a) (b)

g=4μm

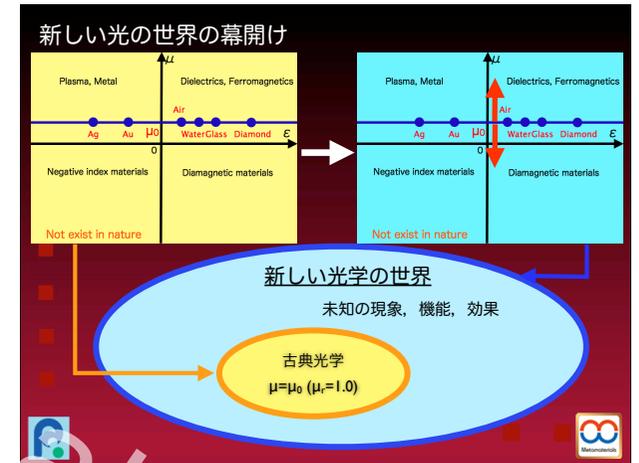
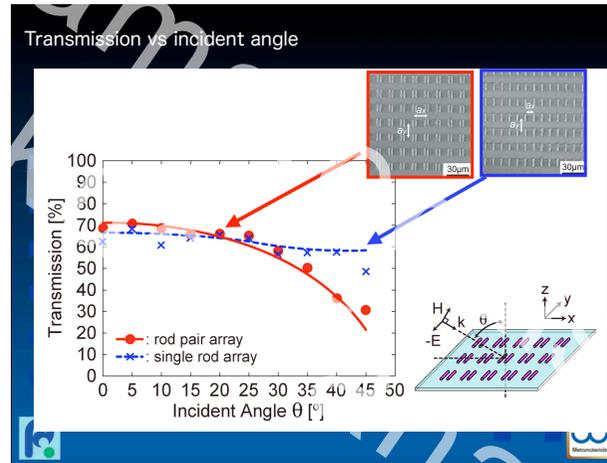
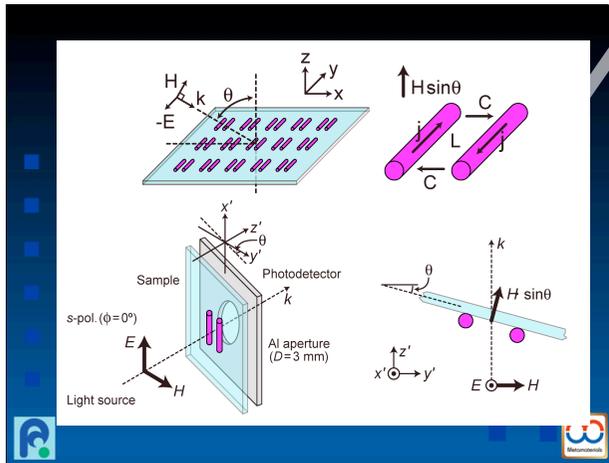
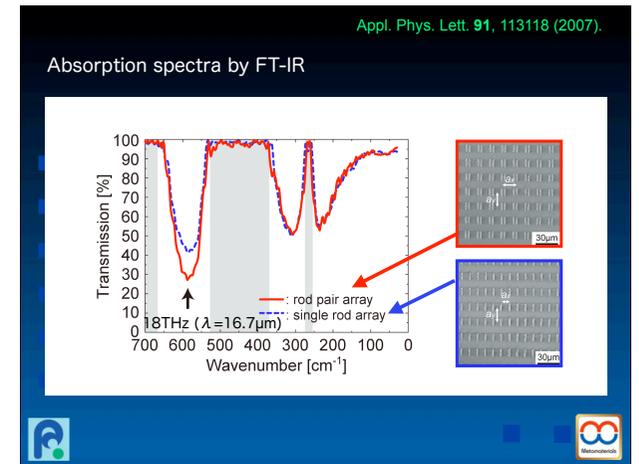
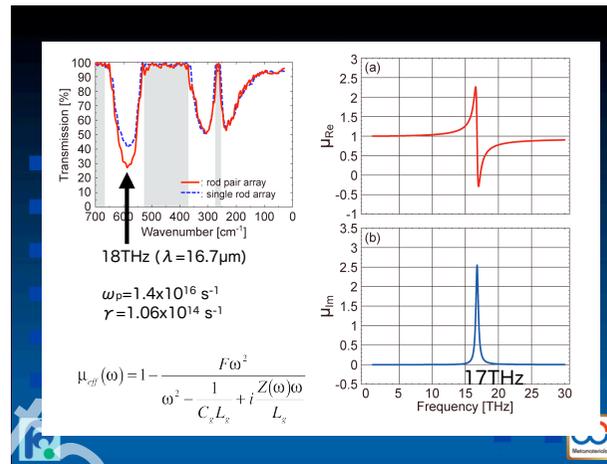
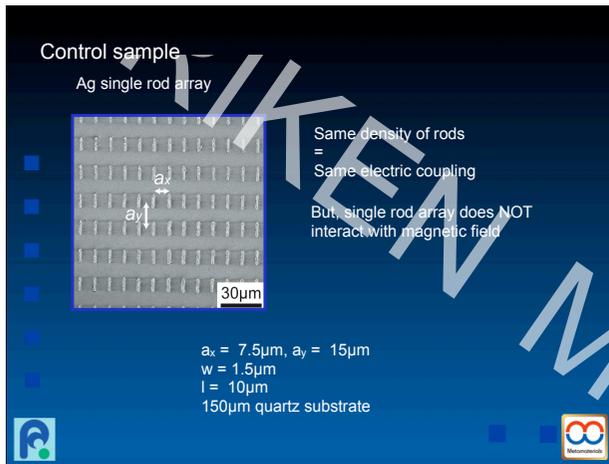
h=10μm

w=1.5μm

30μm

5μm

Magnetic poles



- ### まとめ
1. 光
メタマテリアル
 2. メタマテリアル
微小な金属リングで物質を変える
 3. メタマテリアルの応用
無反射素子
透明人間
 4. メタマテリアルの加工法
レーザーで金属を作る - 2光子還元法

