

プラズモニック・メタマテリアル

(独)理化学研究所 田中メタマテリアル研究室

(独)科学技術振興機構 さきがけ

田中 拓男



February 16, 2010 16:00-16:30 北大電子研

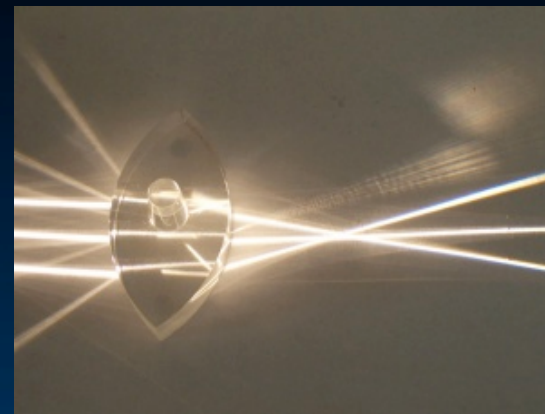
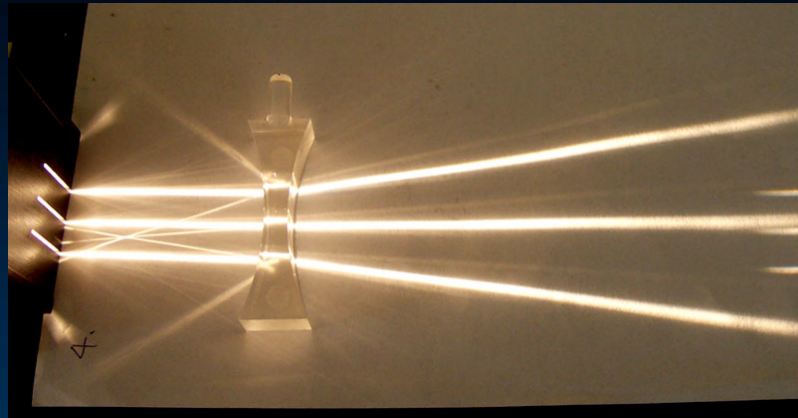


光を操る道具

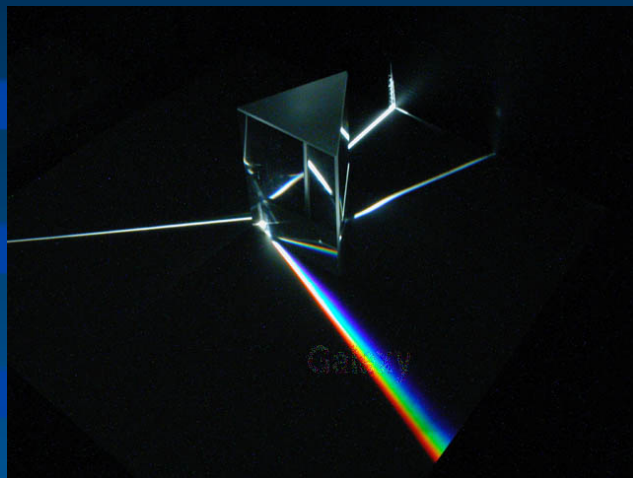


光を操る道具

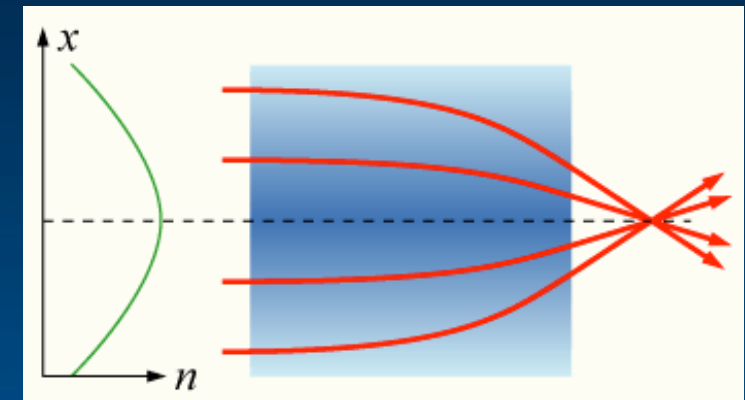
屈折



導波



分散



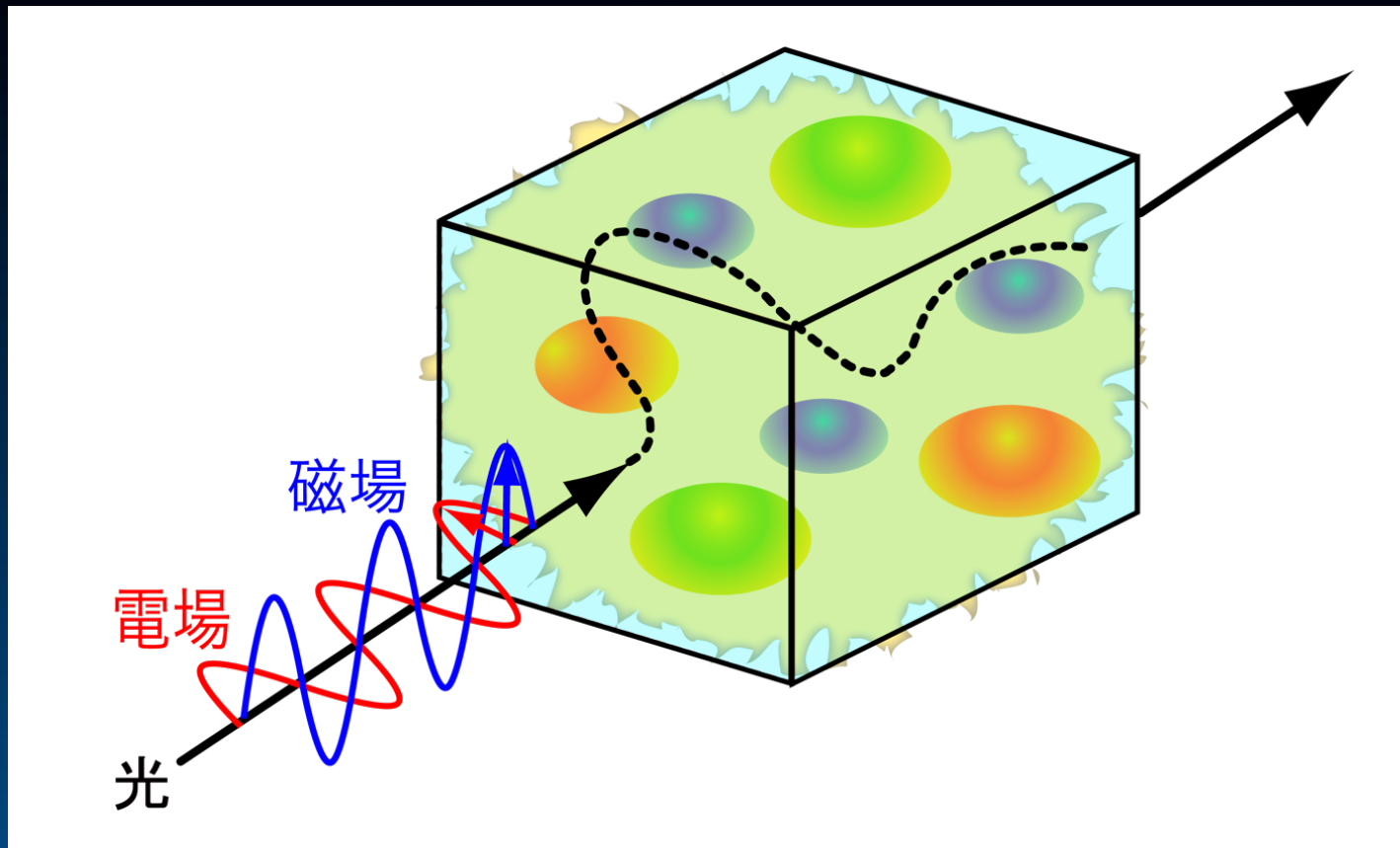
反射



散乱
偏光回転

....

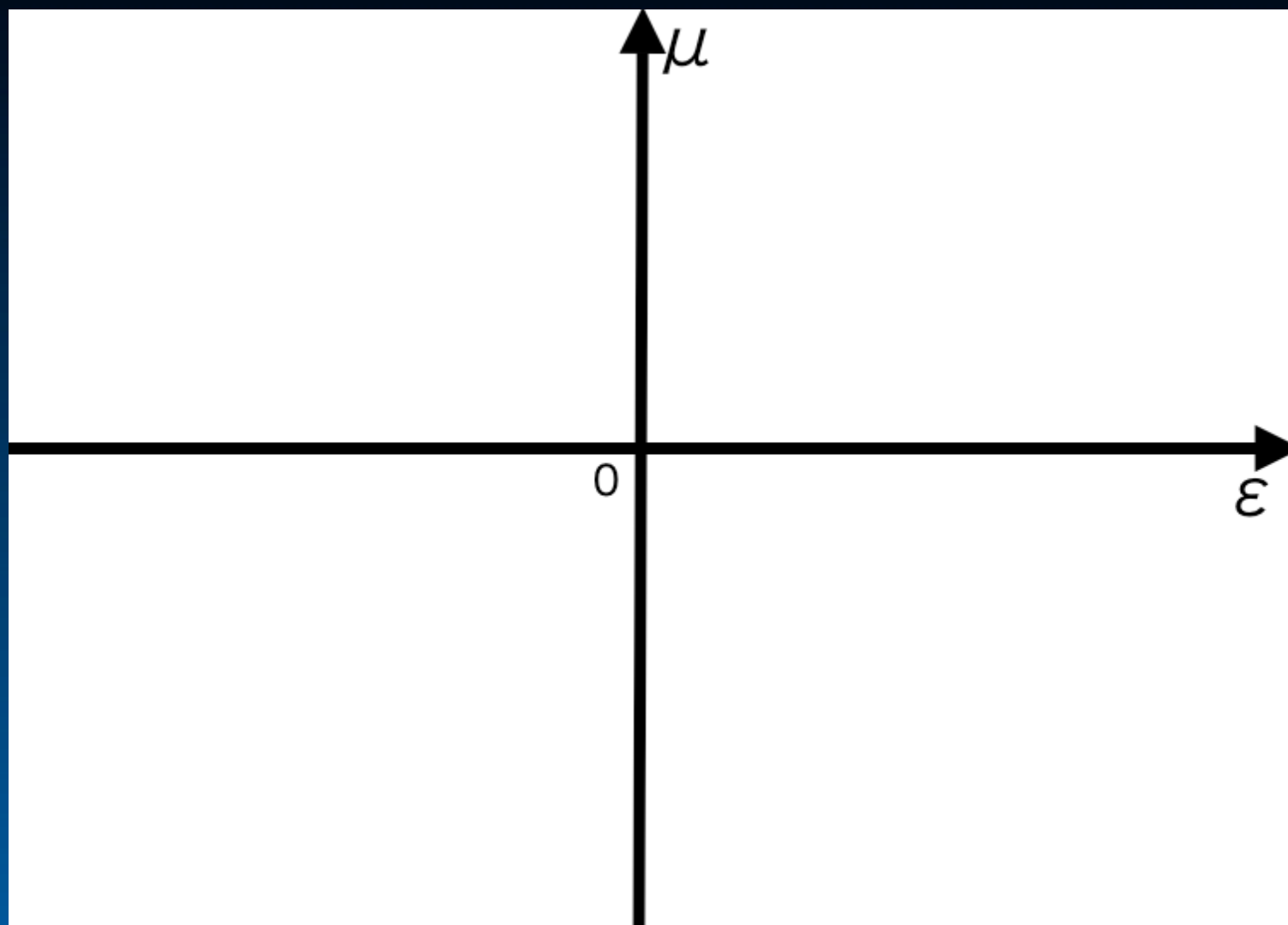




「光を操る」ということは「屈折率の分布を操る」こと

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

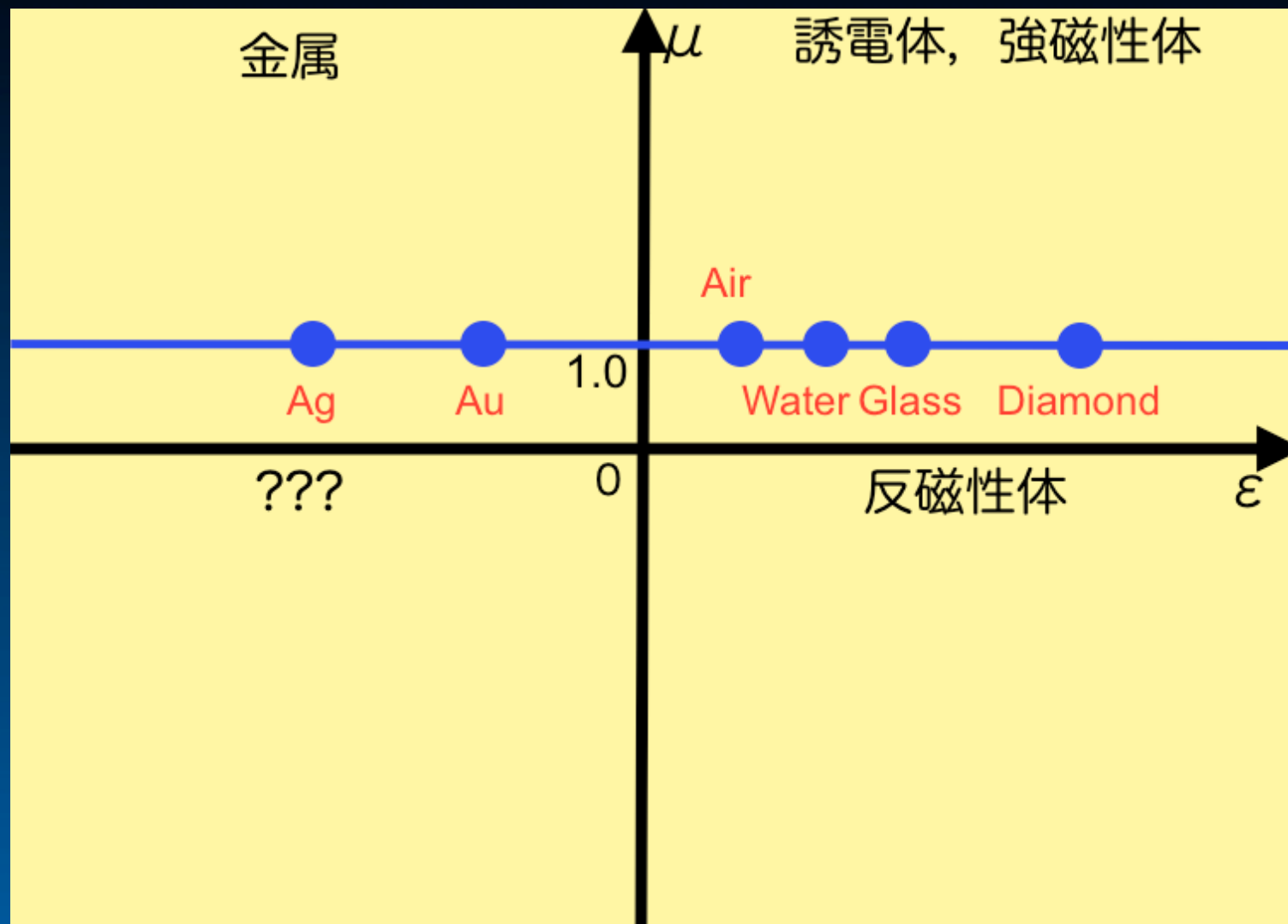




$$n = \sqrt{\epsilon} \sqrt{\mu}$$

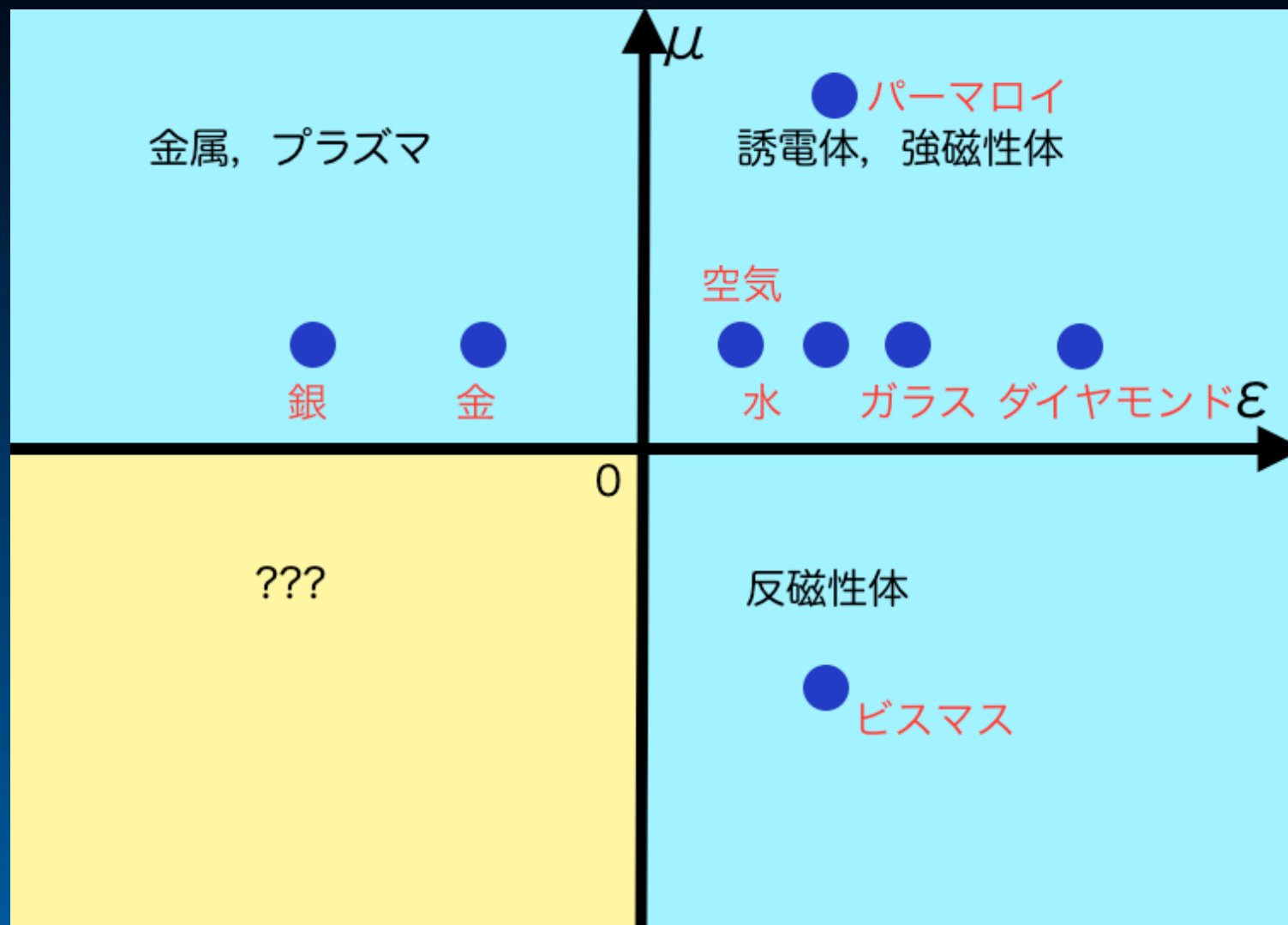
自然界に物質が存在する領域

自然界に物質が存在しない領域



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

- 自然界に物質が存在する領域
- 自然界に物質が存在しない領域



光の世界では、屈折率は

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

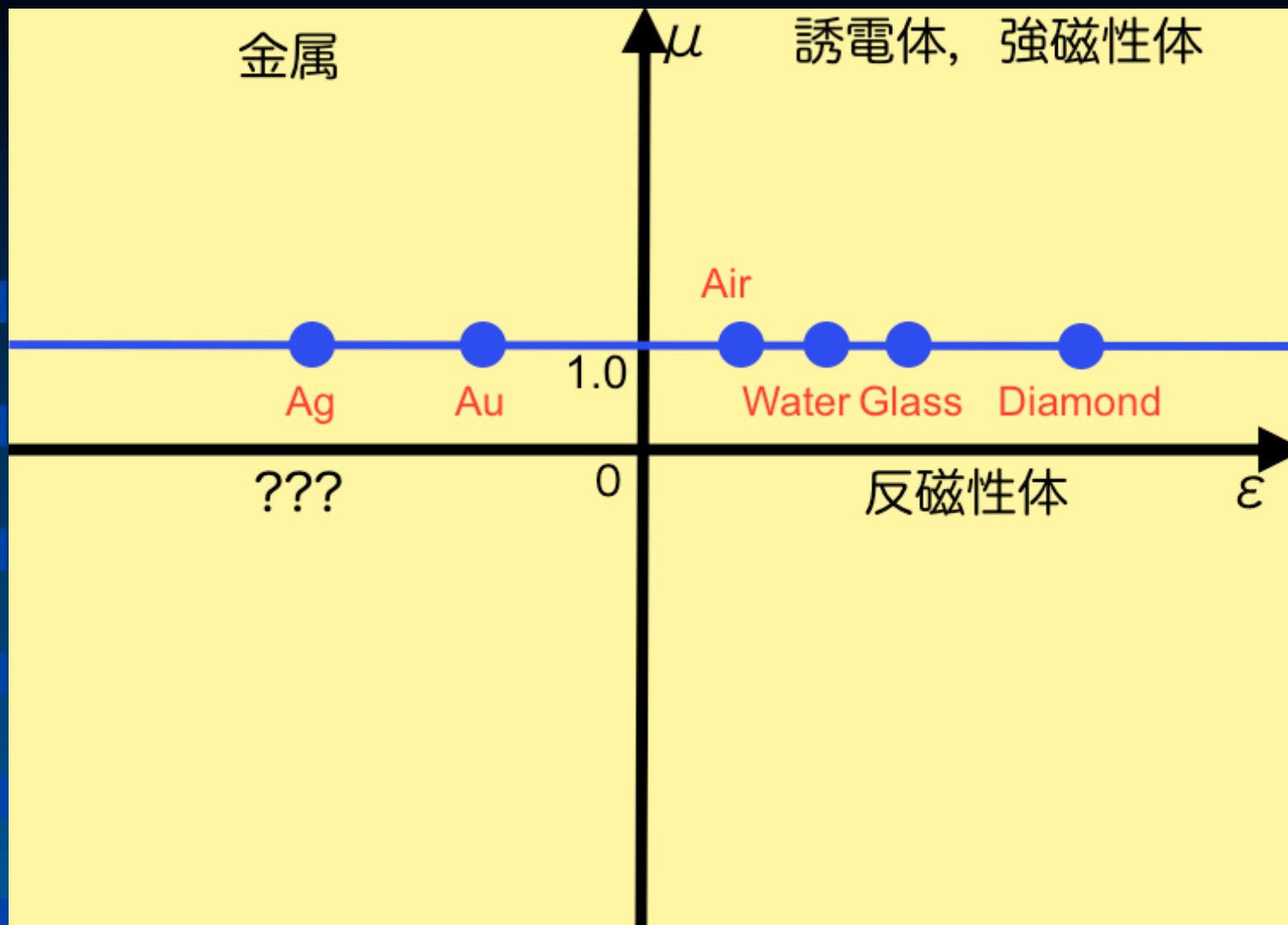


$$\mu = 1.0$$

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

屈折率は誘電率 ϵ だけで決まるとする





■
■
■
■
■
■

$\mu \neq 1.0$ の物質を作るには？
(磁性を持った物質)



$\mu \neq 1$ の物質を作るには？

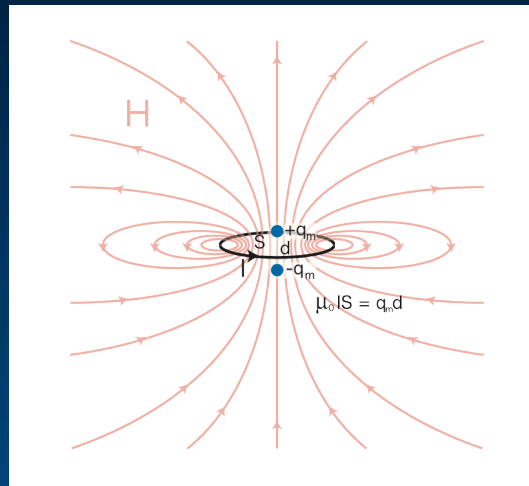
光の磁場に応答し、新たな磁場を作り出すしくみをつくる



■ 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



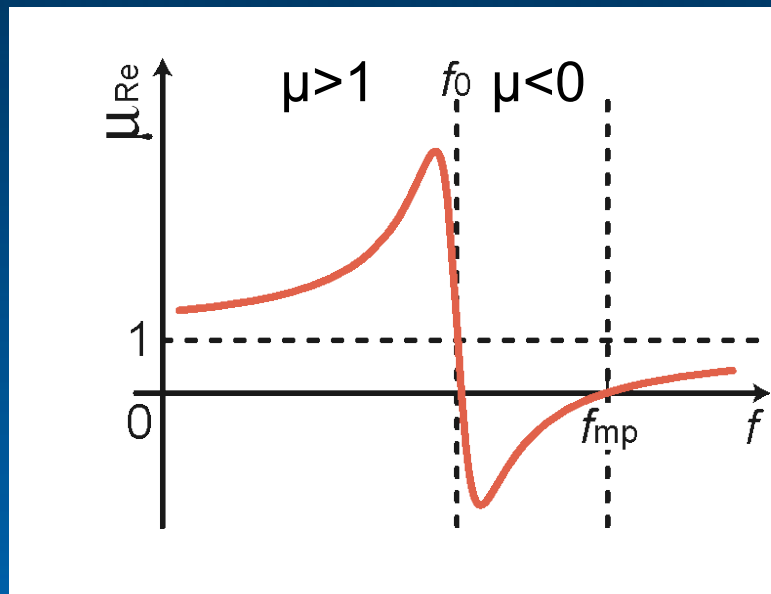
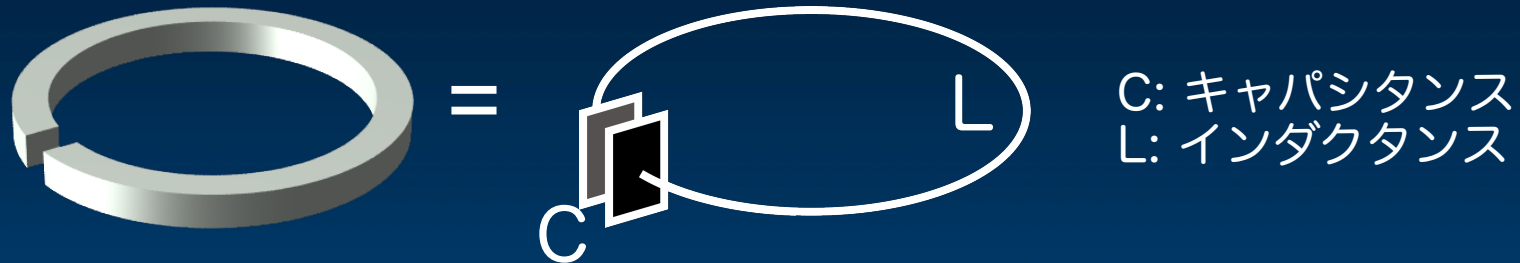
誘導電流: J



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



共振周波数:

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

の低周波数側で $\mu > 1$

の高周波数側で $\mu < 1$

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。

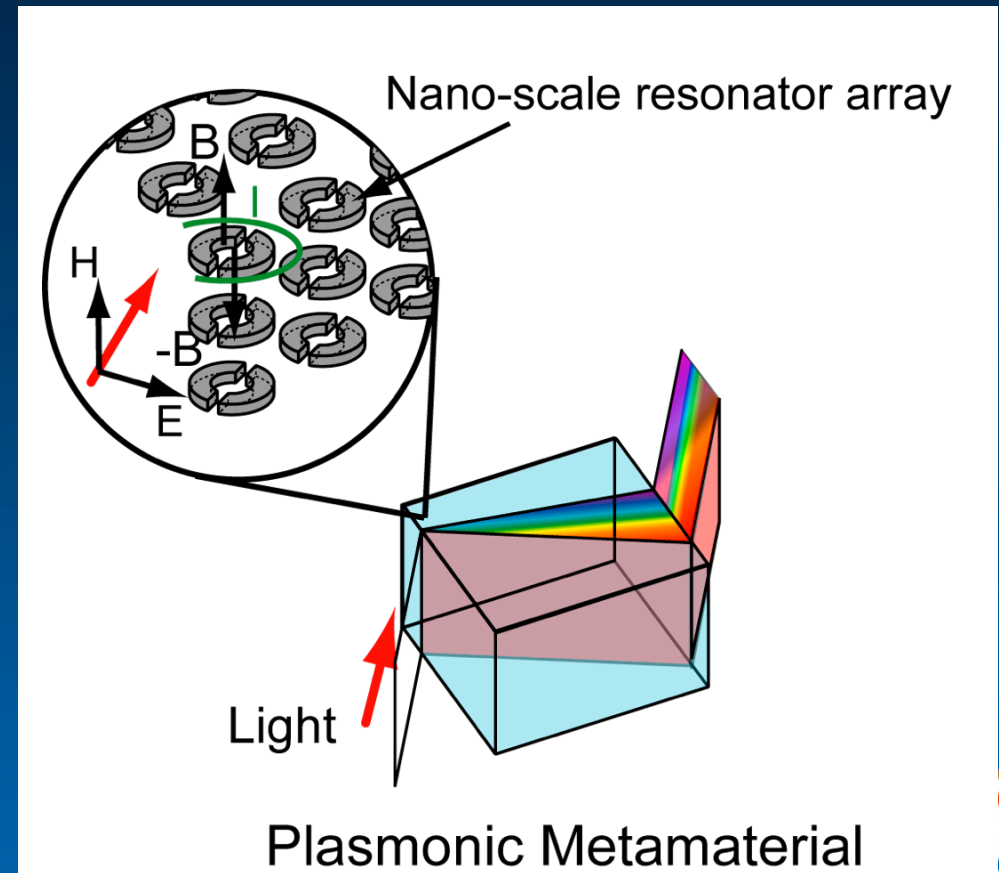
光には個々の共振器は見えない

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



プラズモニック・メタマテリアルの電磁気学的解析

PRL 95, 237401 (2005)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
2 DECEMBER 2005

Negative Magnetic Permeability in the Visible Light Region

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

¹Nanophotonics Laboratory, RIKEN Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

²Department of Applied Physics, Osaka University Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

(Received 22 November 2004; revised manuscript received 31 August 2005; published 1 December 2005)

Negative magnetic permeability of single split-ring resonators (SSRRs) is theoretically investigated in the visible light region. To describe the conduction characteristics of metal in the visible range, we develop the internal impedance formula completely. In our calculations, we determine the magnetic responses of the SSRR accurately. Based on our investigations, we also demonstrate the negative μ of the silver SSRR array in the visible light region.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.237401

PACS numbers: 78.20.Ci, 73.20.Mf, 78.20.Bh

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 split-ring 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 the visible light range. As a result, further investigations regarding the SRR's properties in the visible range are eagerly anticipated, and they could open new possibilities for realizing negative μ materials or LHMs in the visible

$$Z_s(\omega) = \frac{1}{\sigma(\omega)\delta(\omega)} = R_s(\omega) + iX_s(\omega), \quad (2)$$

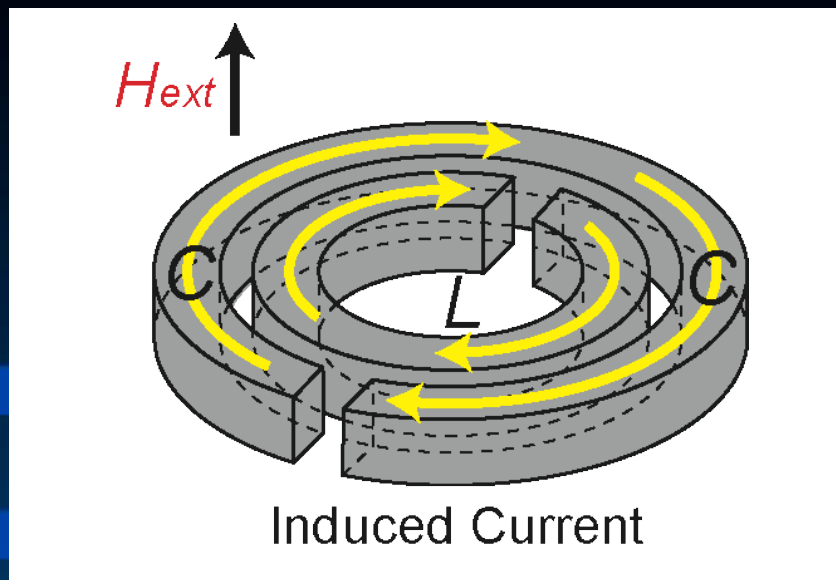
where $\delta(\omega)$ is the skin depth [10]. The real and imaginary parts of $Z_s(\omega)$ are the surface resistivity R_s and the internal reactance X_s , respectively. In the optical frequency region, Eq. (2), including the skin effect, enables us to describe the conduction characteristics properly. However, particularly in the frequency region above 100 THz, which is 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 plane conductor from the Maxwell's equations without any approximation:

$$Z'_s(\omega) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0(1 + i\frac{\sigma(\omega)}{\epsilon_0\omega})}} = R'_s(\omega) + iX'_s(\omega), \quad (3)$$

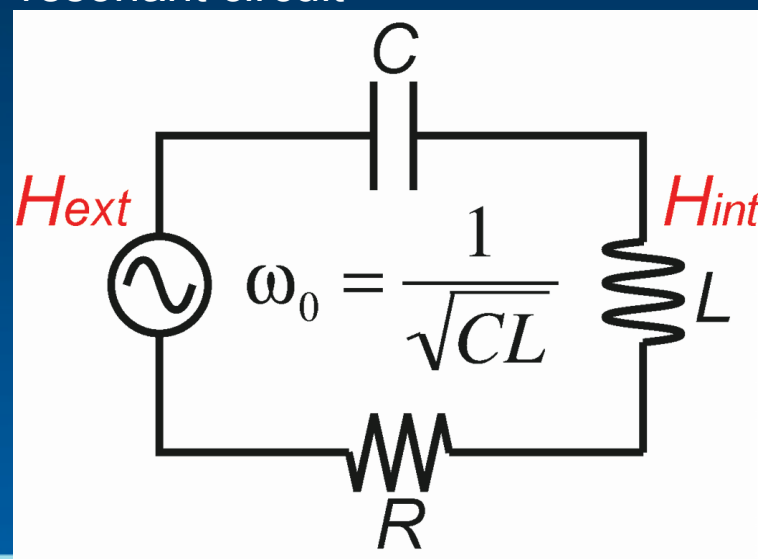
where ϵ_0 and μ_0 are the permittivity and the permeability of vacuum, respectively. Note that the "1" in the denominator of Eq. (3) represents the effect of the displacement current inside the metal as opposed to that of the conduction current, and this term describes the dielectric-like behavior of the metal in the visible range.



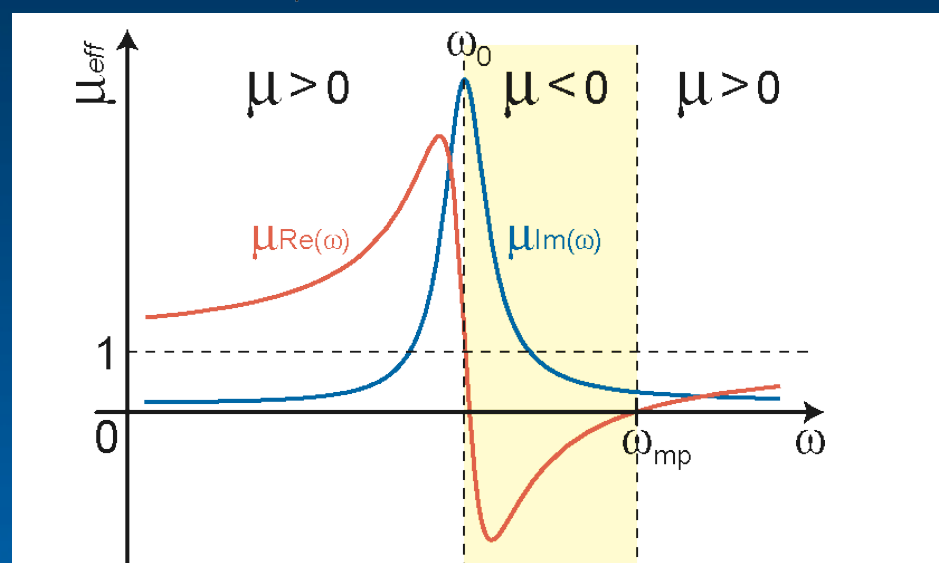
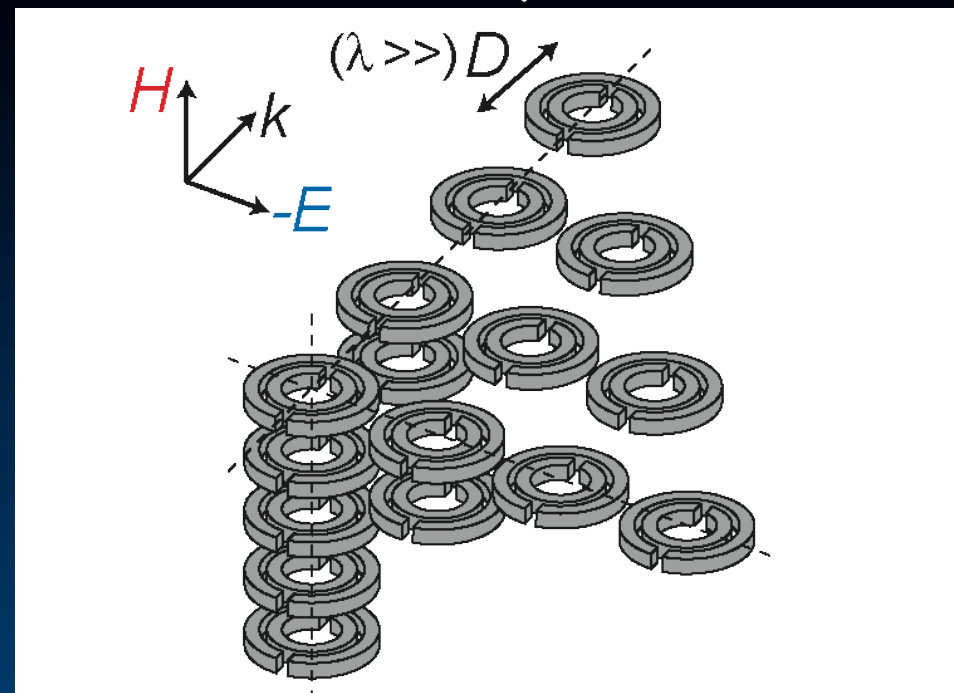
Splitリング共振器 (Split Ring Resonator, SRRs)



Loop antenna
+ LC resonant circuit



等価回路



マイクロ波と光波との違い

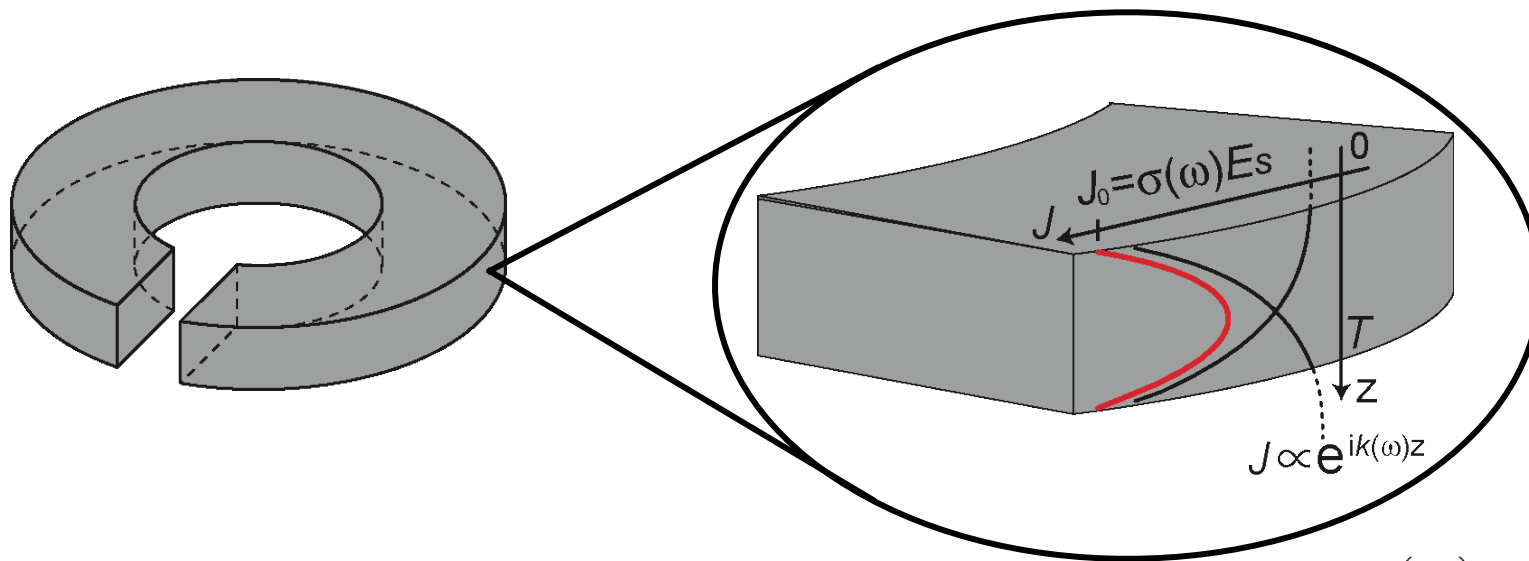
金, 銀, 銅 → マイクロ波領域では完全導体
光波領域では完全導体ではない

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）



金属の特性を式に書き表す



内部インピーダンス

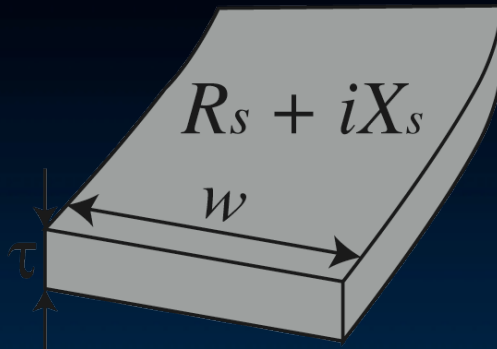
$$\sigma(\omega) = \frac{\omega_p^2 \epsilon_0}{\gamma - i\omega}$$

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

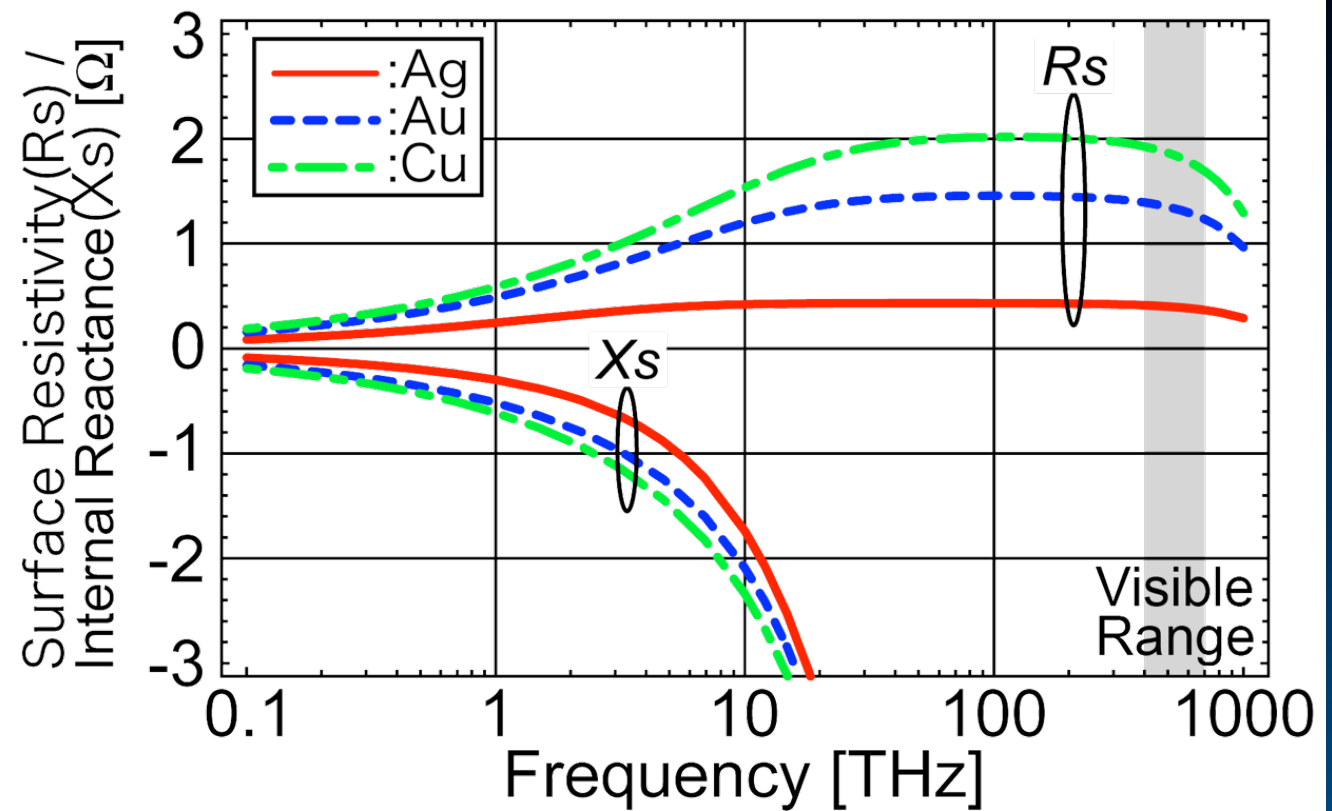
R_s : 表面抵抗

X_s : 内部リアクタンス





R_s : surface resistance
 X_s : internal reactance
 τ : penetration depth
 w : width of the ring

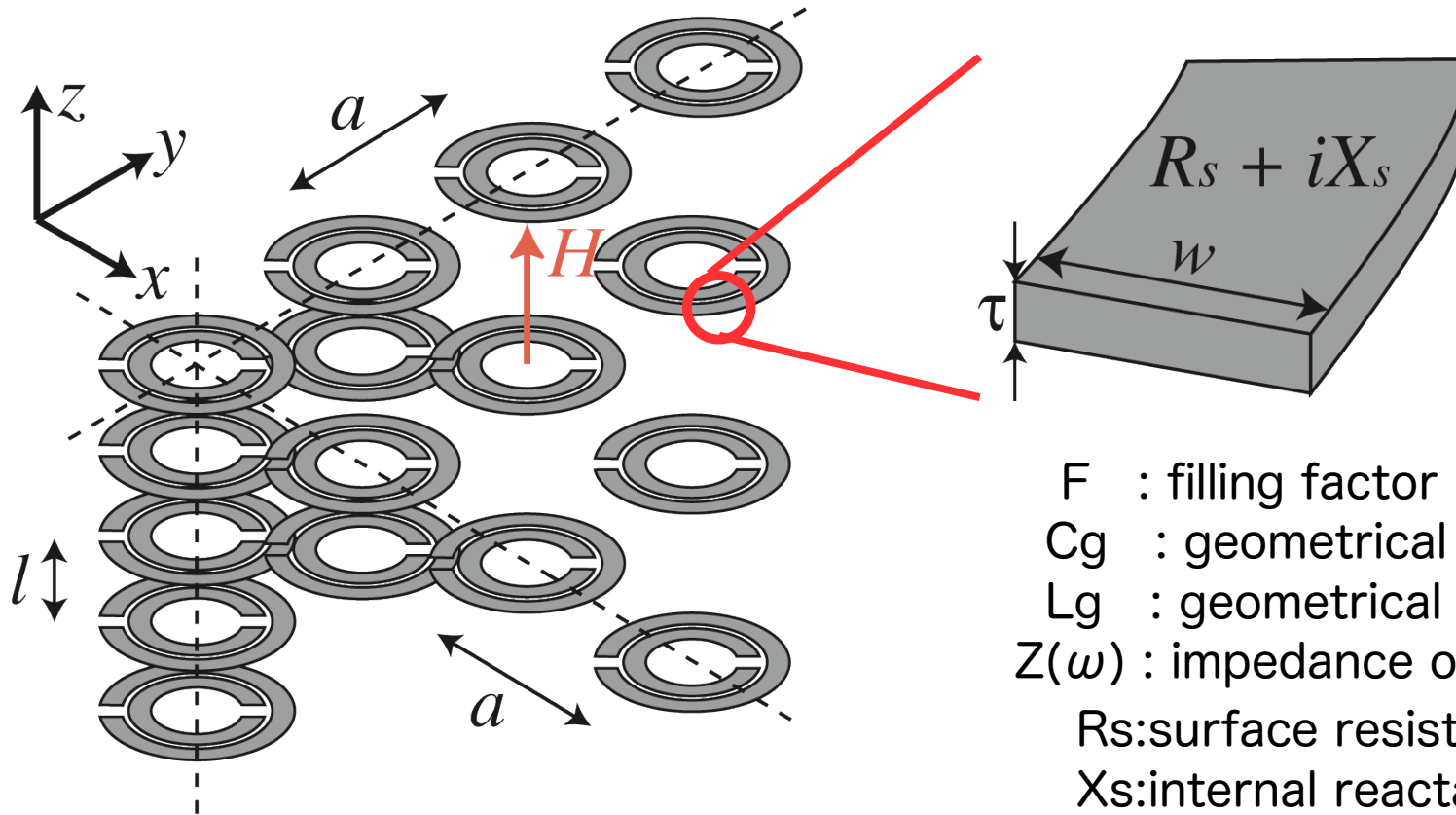


R_s 100THzは100THz以上になると飽和

X_s は周波数が上がると共に現象（負に増加）

銀が最も良い材料





F : filling factor
 C_g : geometrical capacitance
 L_g : geometrical inductance
 $Z(\omega)$: impedance of the circuit
 R_s : surface resistance
 X_s : internal reactance
 τ : penetration depth
 w : width of the ring

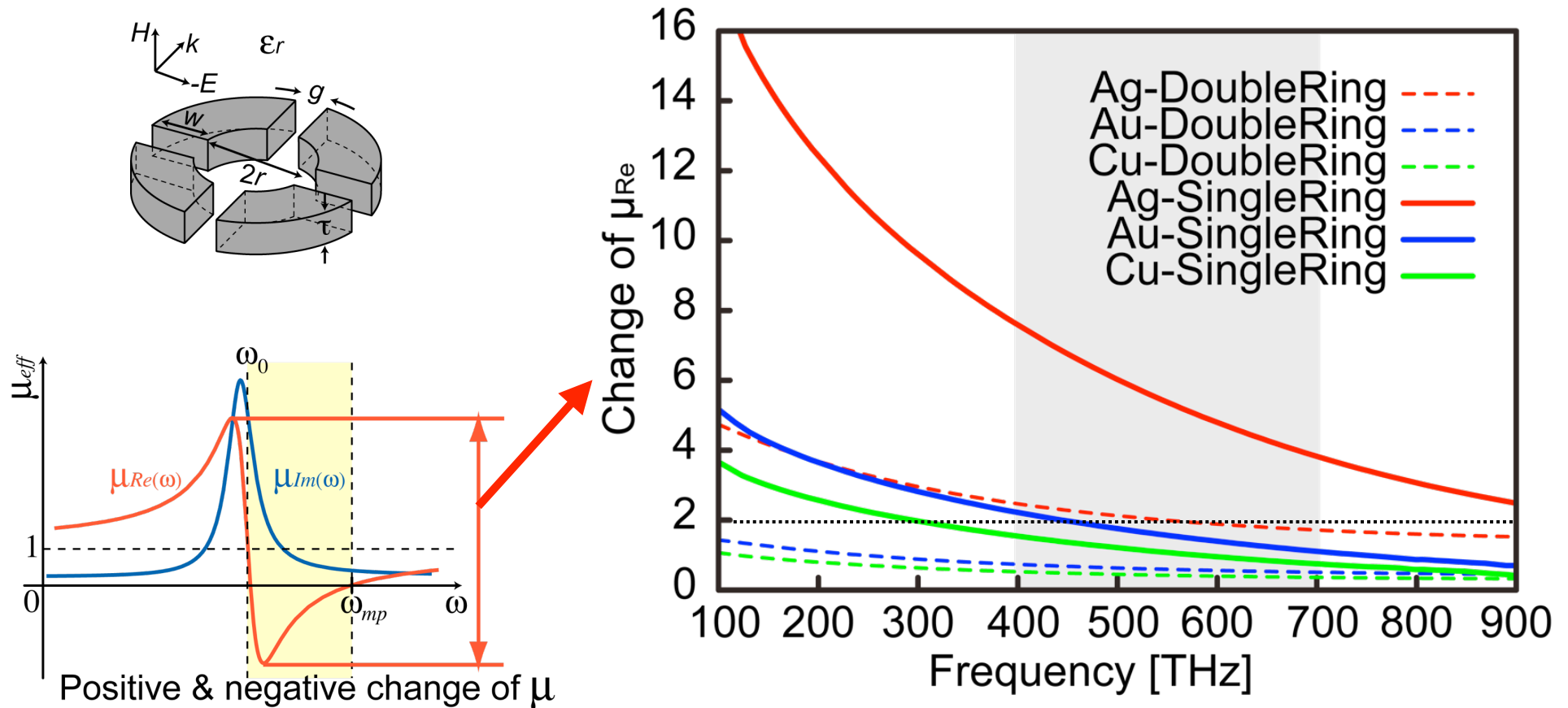
$$\mu_{eff}(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \frac{1}{C_g L_g} + i \frac{Z(\omega)\omega}{L_g}}$$

実効 μ_{Re} の周波数依存性

for $F = 6.41\%$

$\epsilon_r = 2.25$ (e.g. glass)

$w = \tau = 2.5 \delta(\omega)$

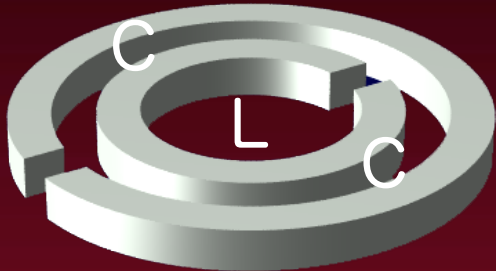
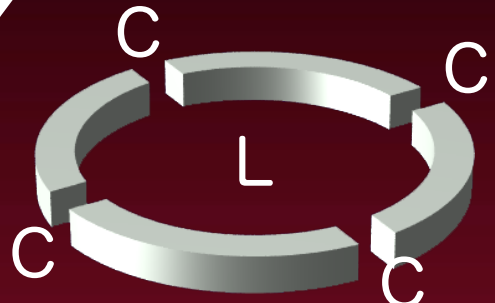


設計のポイントはLとCのバランス

Lは大きく, Cは小さく



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 (R_s) の増加	構造の縮小 = L の減少



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

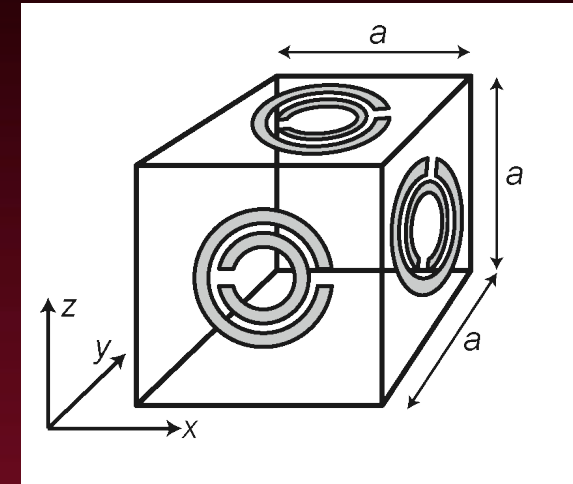
豊富な自由電子，低い電気抵抗 → 金属
誘導電流を流すために必須

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



	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	○	○	× $4 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$

Bulk silver

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

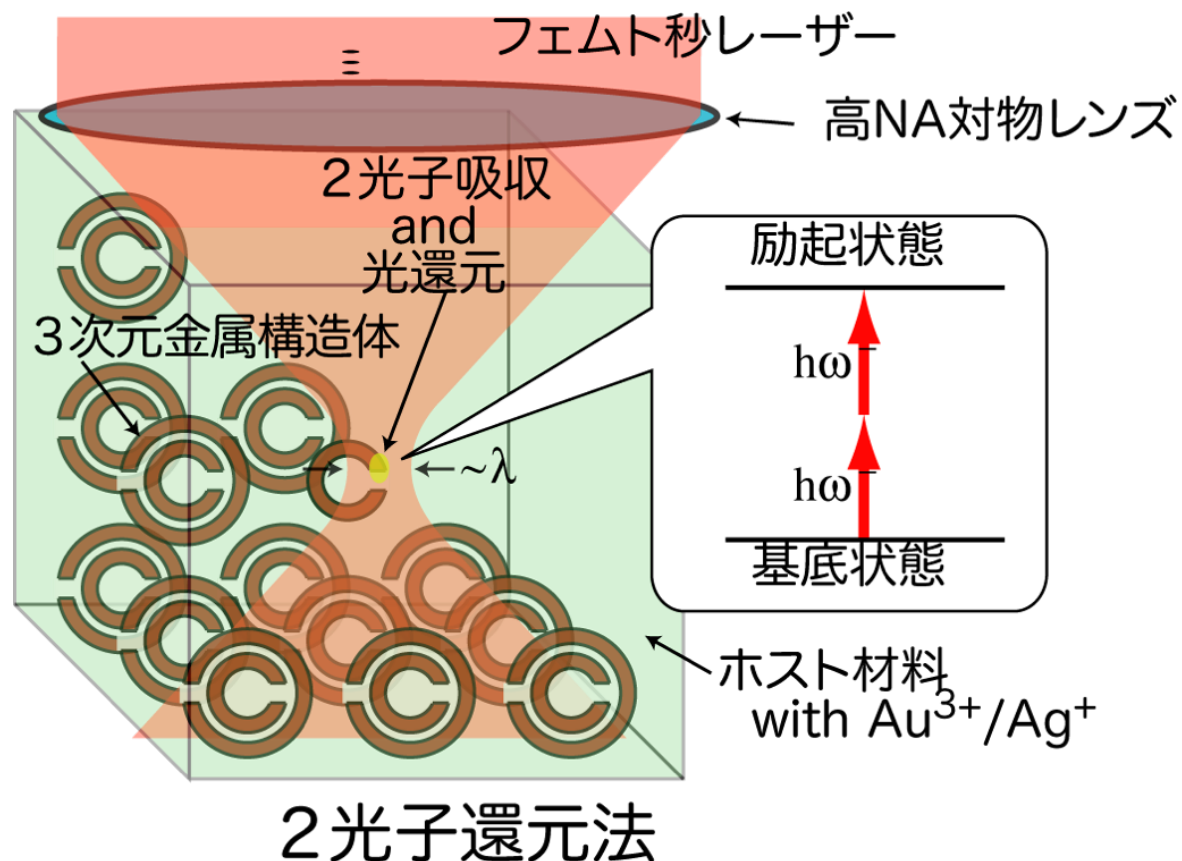
3次元の微小金属構造体を加工できない。



2光子還元法

- Appl. Phys. Lett. **89**, 113102 (2006).
- Appl. Phys. Lett. **88**, 081107 (2006).
- JPN Patent Applied 2003-175819, 2005-96327
- US Patent 10/808,517

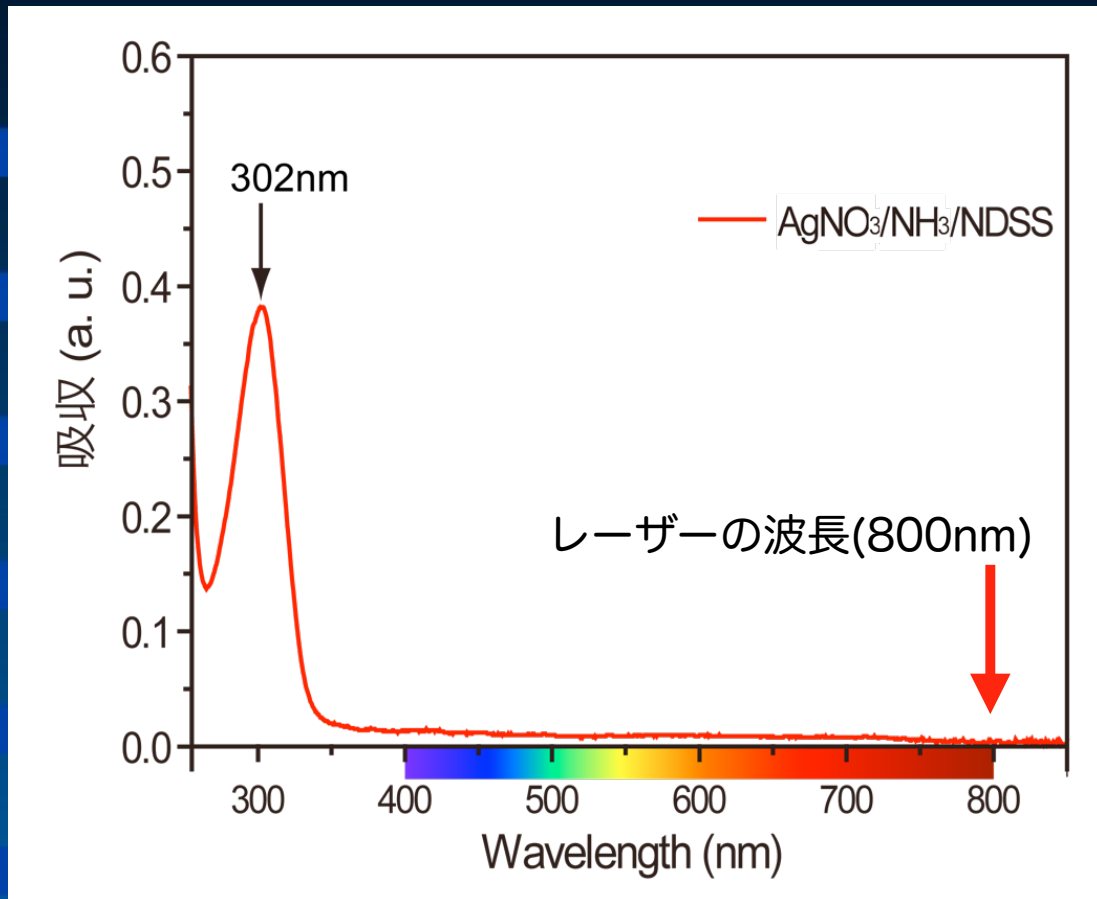
2光子吸収現象を利用して、金属イオンを還元（金属化）する技術
2光子吸収を利用しないと、立体構造は作れない。



銀イオン材料の特性

紫外線を吸収

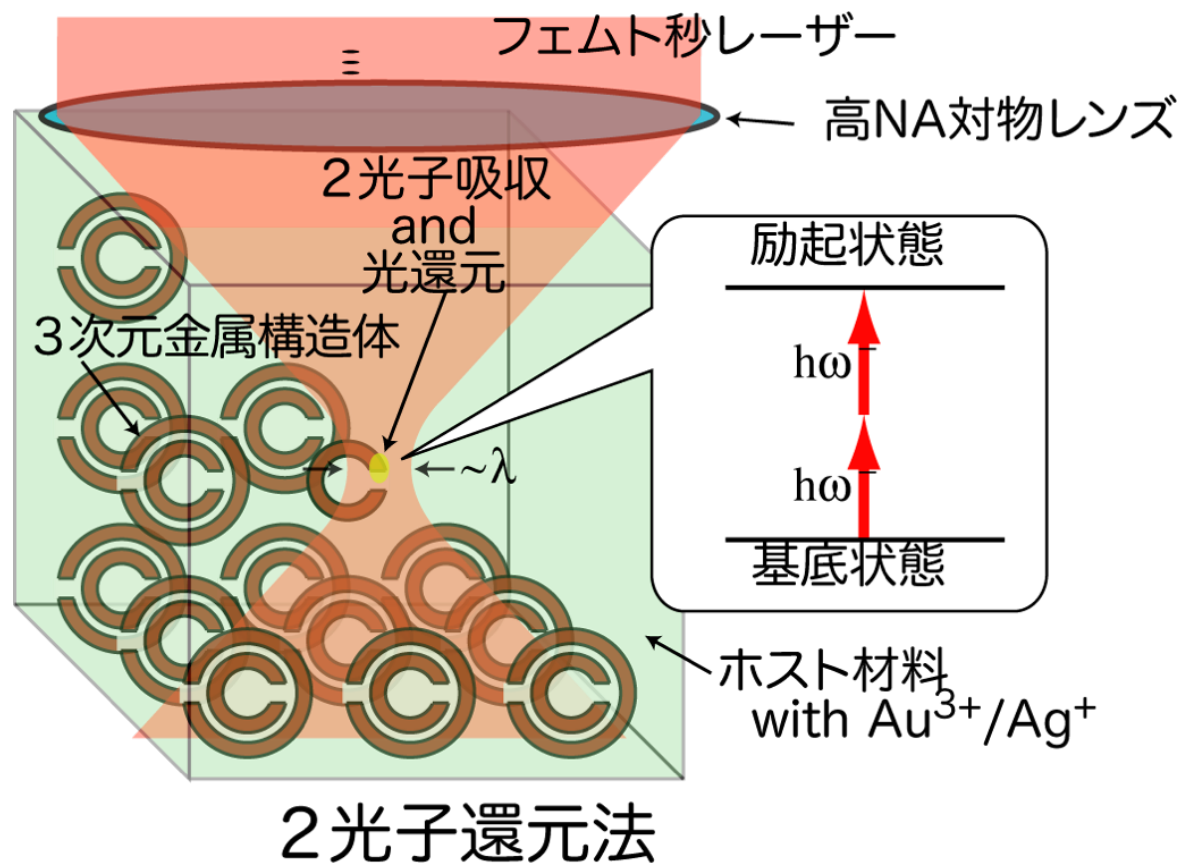
近赤外光では吸収ゼロ（完全透明）



2光子還元法

- Appl. Phys. Lett. **89**, 113102 (2006).
- Appl. Phys. Lett. **88**, 081107 (2006).
- JPN Patent Applied 2003-175819, 2005-96327
- US Patent 10/808,517

2光子吸収現象を利用して、金属イオンを還元（金属化）する技術
2光子吸収を利用しないと、立体構造は作れない。

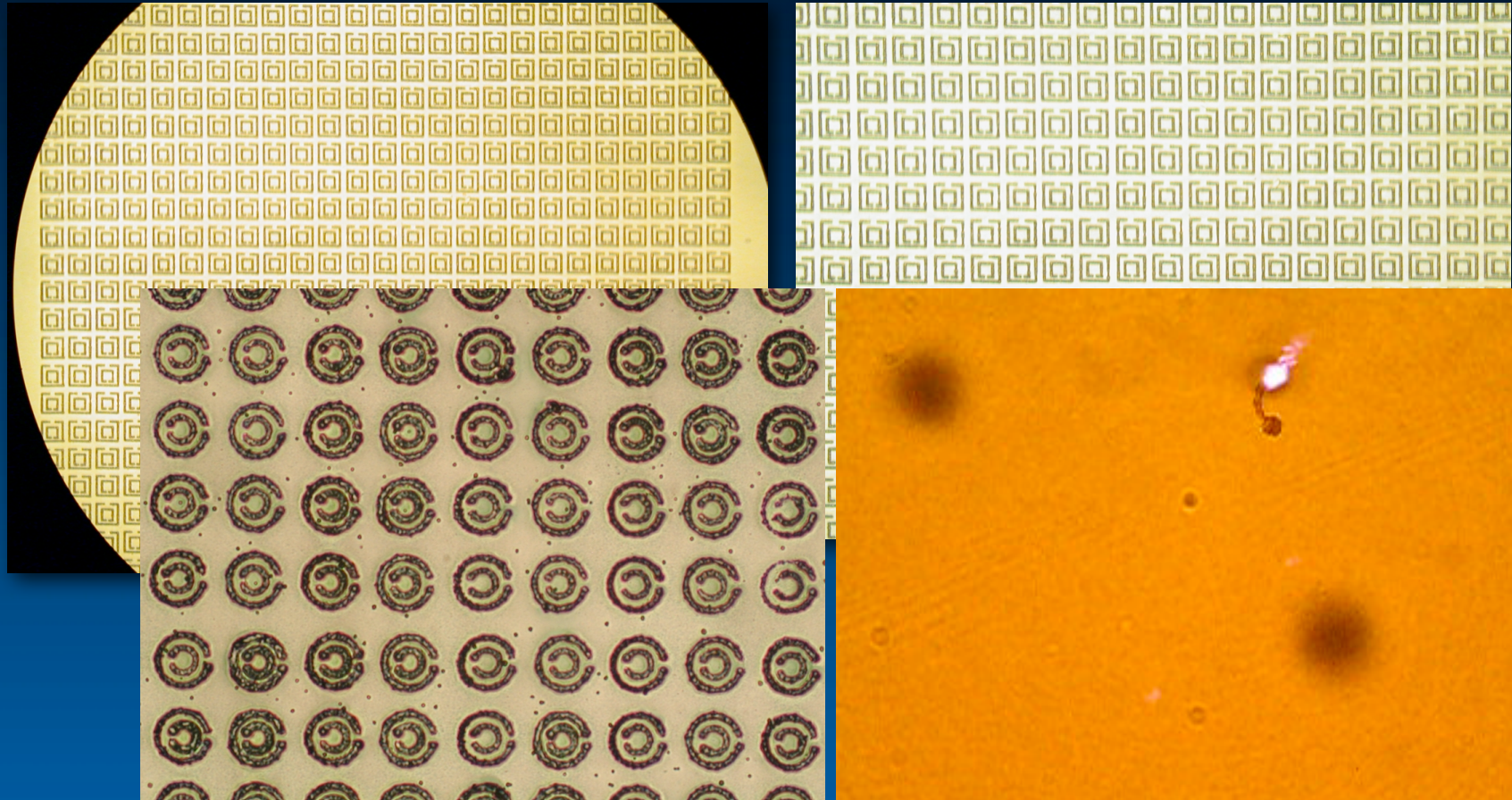


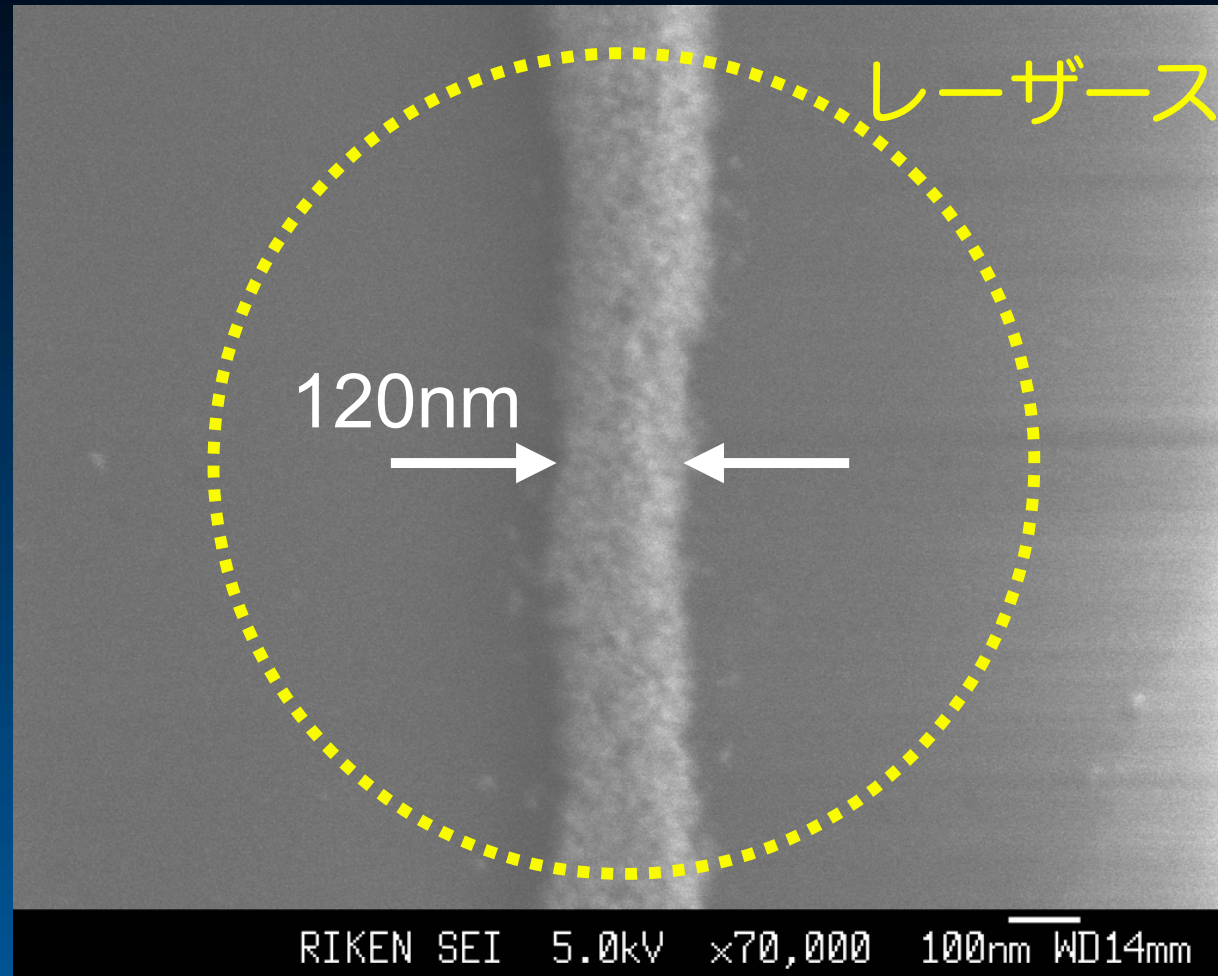
プラスチック(PMMA)の中に作った金の構造

Au³⁺ doped PMMA

($\lambda = 800\text{nm}$, two-photon reduction, Stage-scan)

線幅1 μm の金線を直接描画

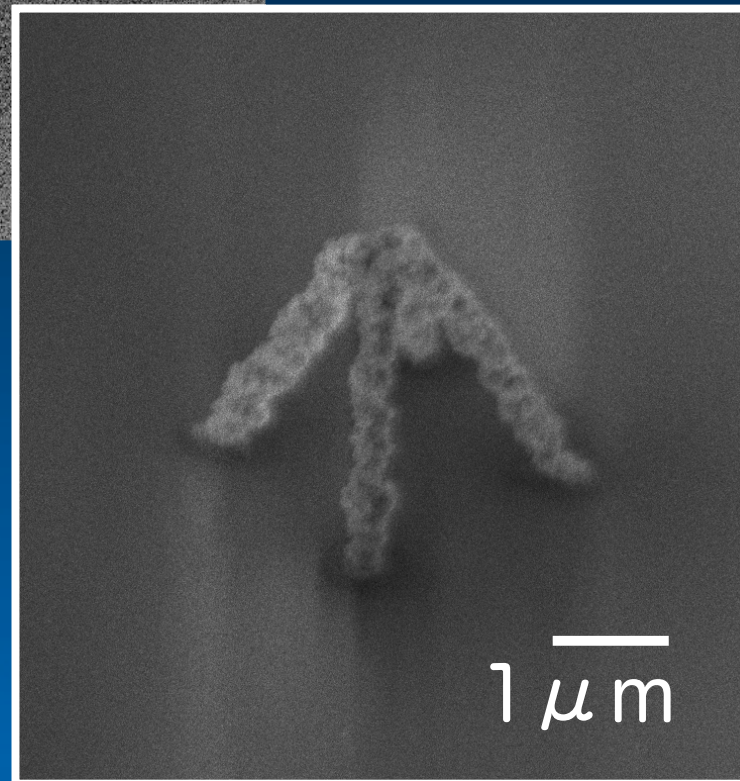
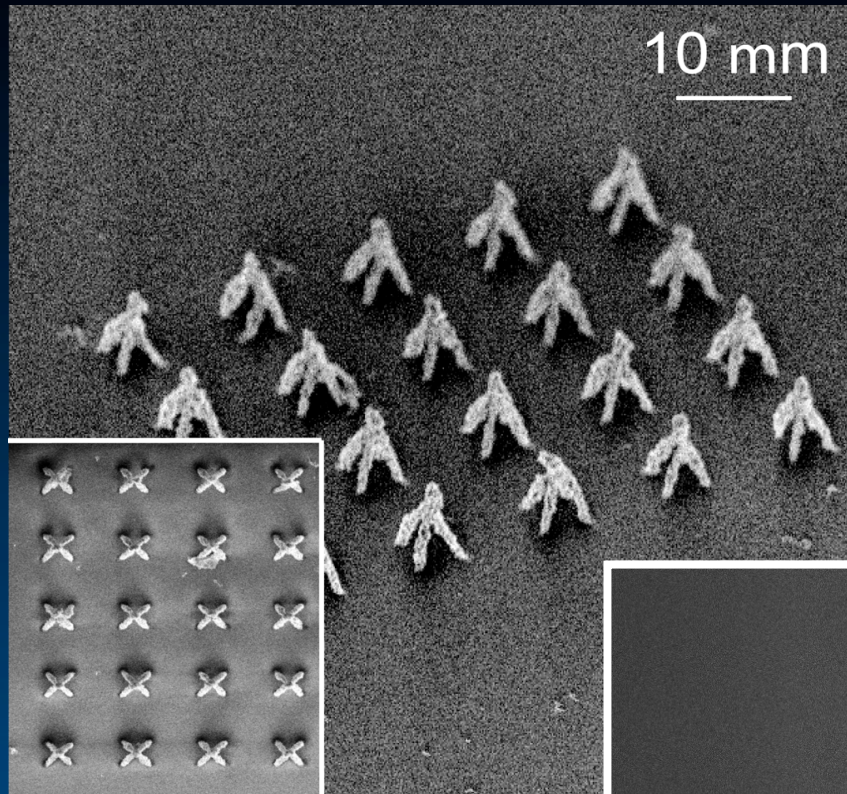




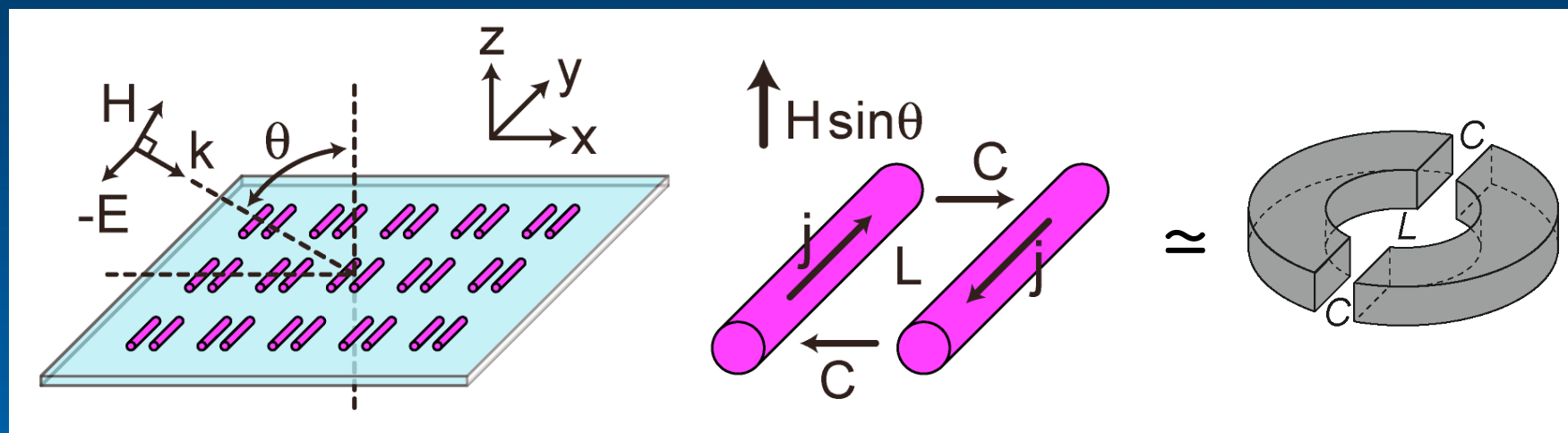
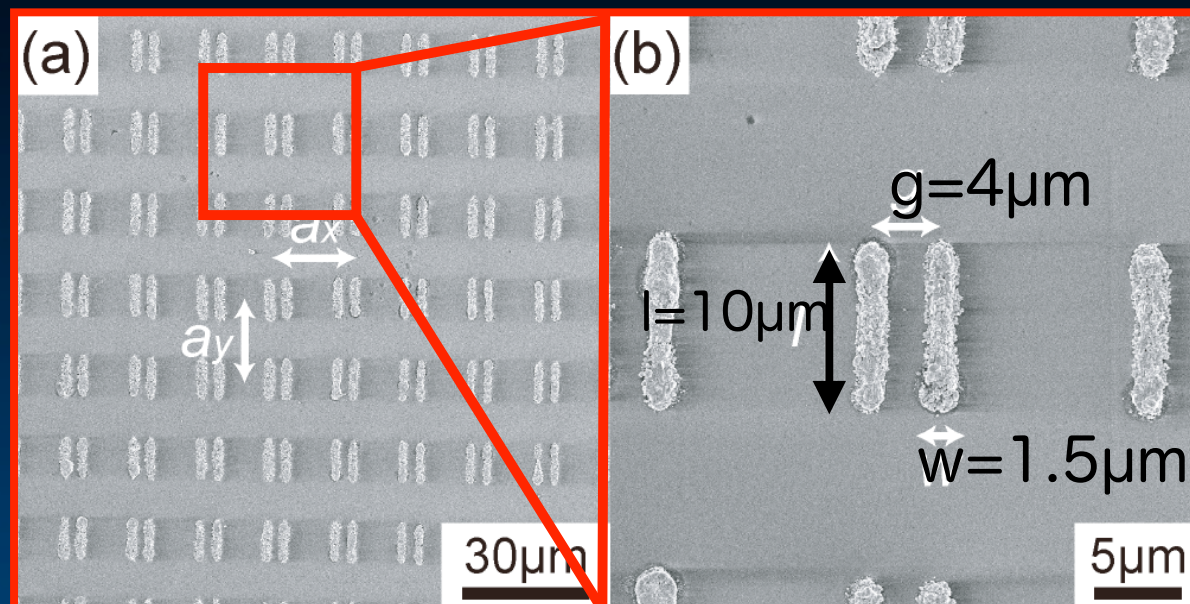
レーザースポット

髪の毛の1000分の1の太さ





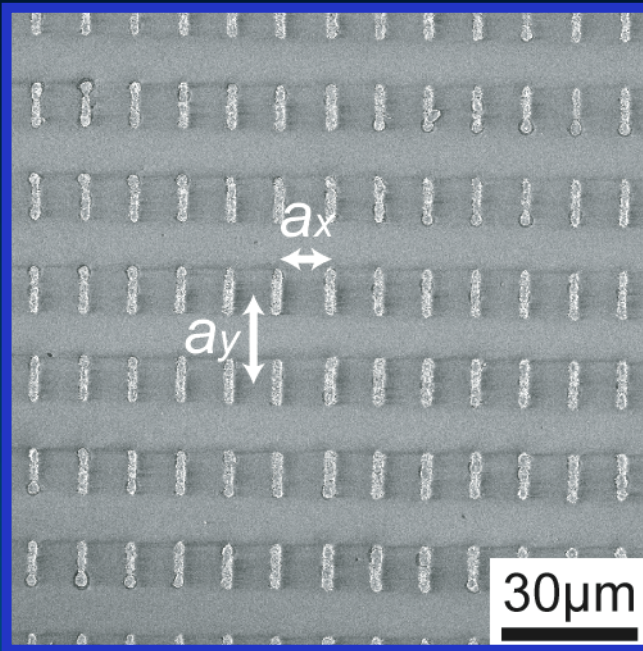
光の磁場成分によって励起されたメタマテリアルの磁気応答特性の実験評価



Magnetic poles

Control sample

Ag single rod array



Same density of rods

=

Same electric coupling

But, single rod array does NOT
interact with magnetic field

$$a_x = 7.5\mu\text{m}, a_y = 15\mu\text{m}$$

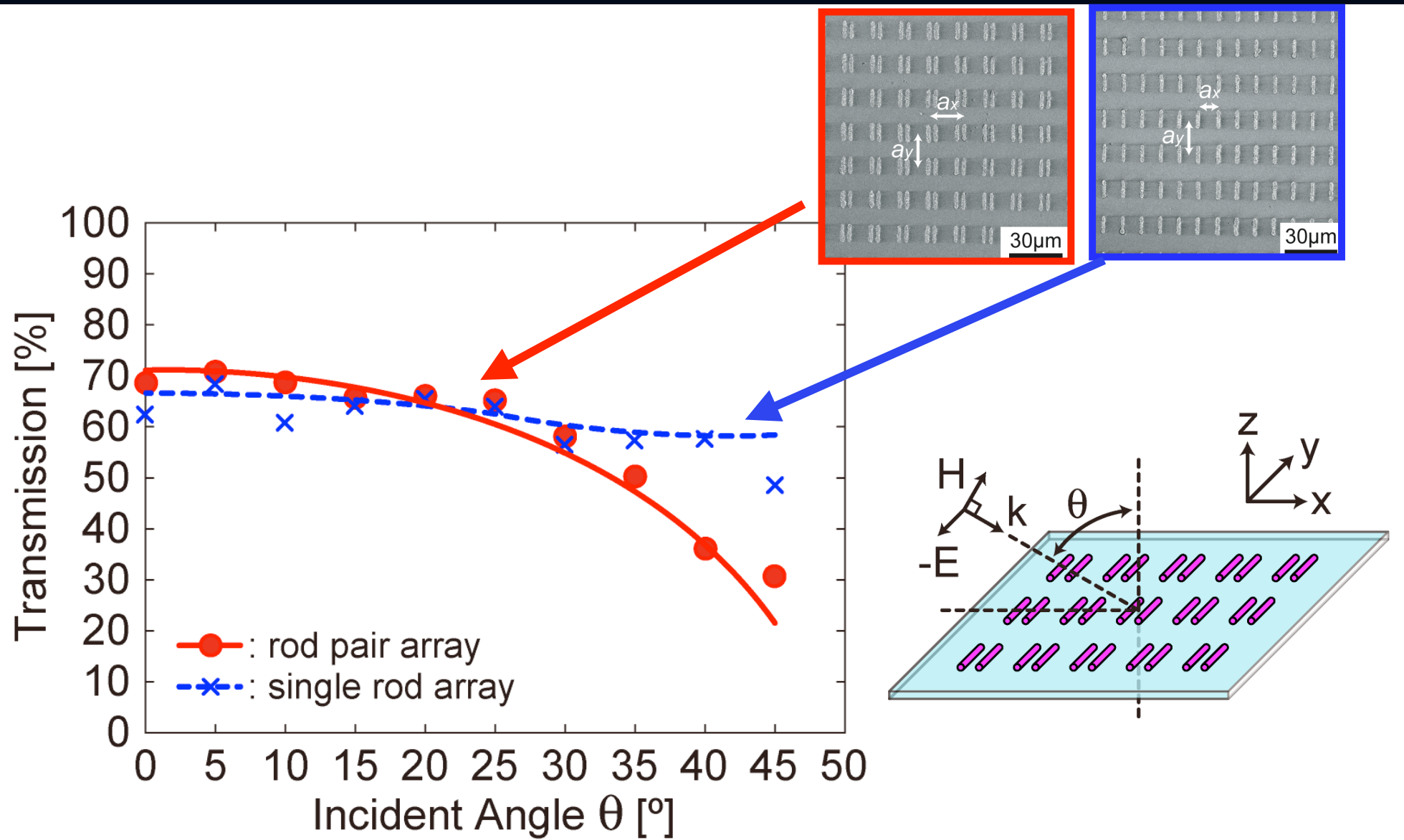
$$w = 1.5\mu\text{m}$$

$$l = 10\mu\text{m}$$

150μm quartz substrate



Transmission vs incident angle



物質の屈折率を上げる

極薄，極小レンズ



屈折率高めレンズ薄く

理研、透明材料にリング状金属

メガネ・カメラに応用

理化学研究所は、樹脂やガラスなど透明な材料の光の屈折率を高められる基礎技術を開発した。材料の中に直径が数ナノメートルの二層の微小なリング状金属を多数埋め込むことで、

屈折率が高くなる。屈折率が五倍になれば、光学レンズの厚さを五分の一に薄くできる計算で、将来はメガネやカメラのレンズを薄くするのに役立つとみている。

小さいため、光の透過量を減らさない。

ただ、フェムト秒レーザーは研究用の高額装置で、量産には向かない。研究グループは、ナノメ

ートルサイズのを描いた型でリングを作るナノイ

ト法の利用を検討する。計算で求め

るリングを型に形

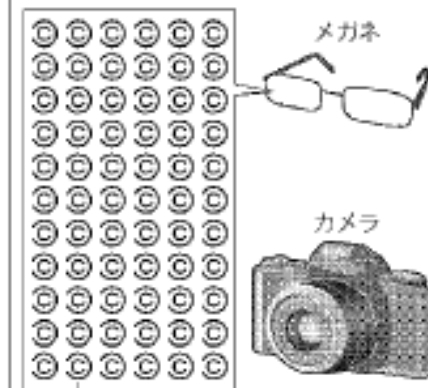
成材料に金属リ

ンクを作るとい

うと組んで量産

したいと話して

屈折率を高める新技術と応用例(イメージ)



直径が数ナノメートルのリング状金属

レンズが薄くなる

田中拓男主任研究員ら（理研）が増えて屈折率が高まることを予測。秒レーザーを照射する。硝酸銀を構成する銀イオンが還元されてリング状の銀を多数作った。直径は約六ナノメートル。現時点では、リング状の銀が透過率を変化させるところまで確認した。今後、屈折率がどれほど変化しているかを詳しく調べる。

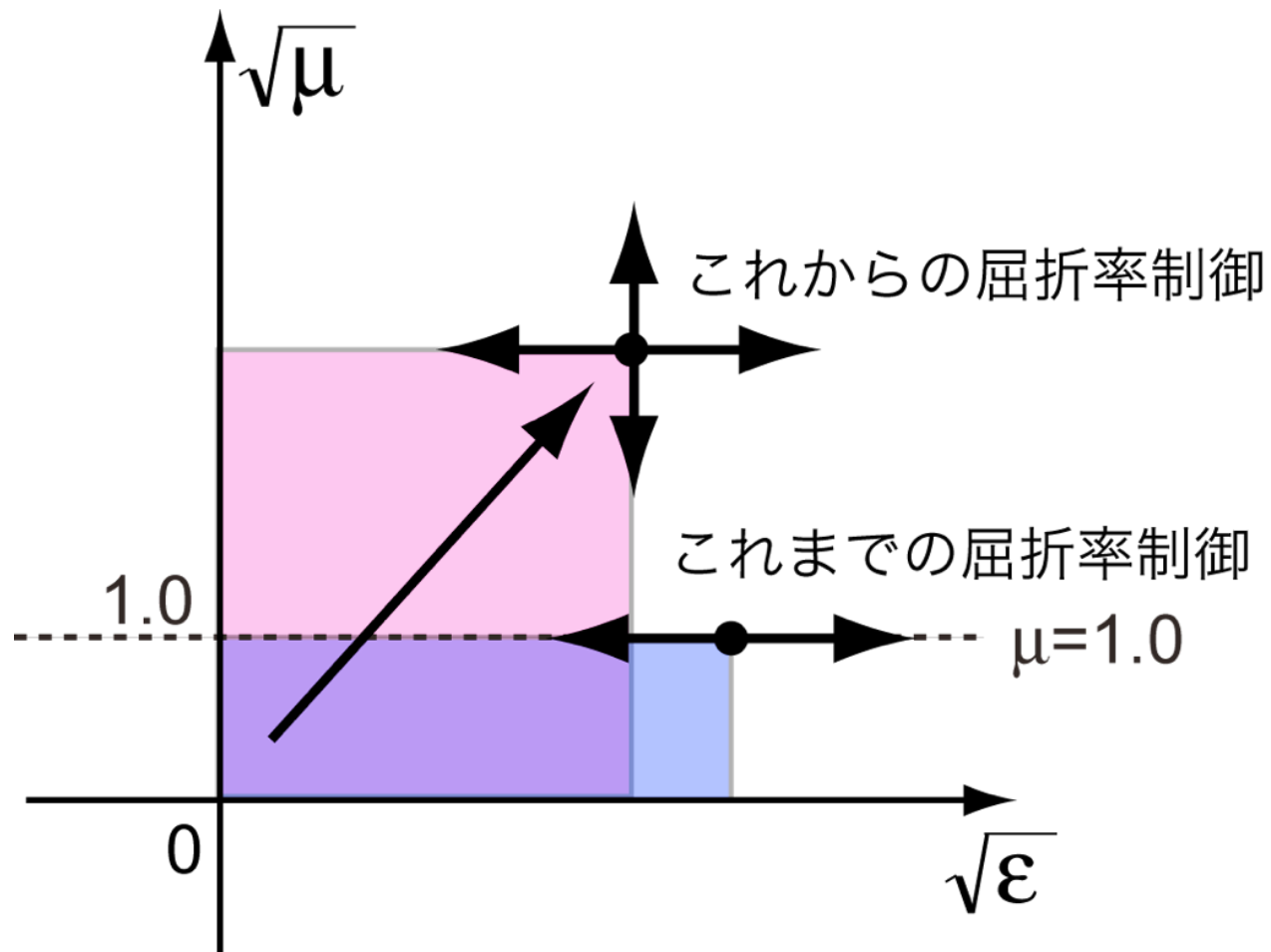
材料の屈折率が高くなれば、メガネやカメラのレンズを薄く軽くできる。例えば屈折率が五倍になれば、レンズの厚さは五分の一になる。また、材料中に作ったリングは光の波長に対して十分に

日経産業新聞
2007/4/18 11面

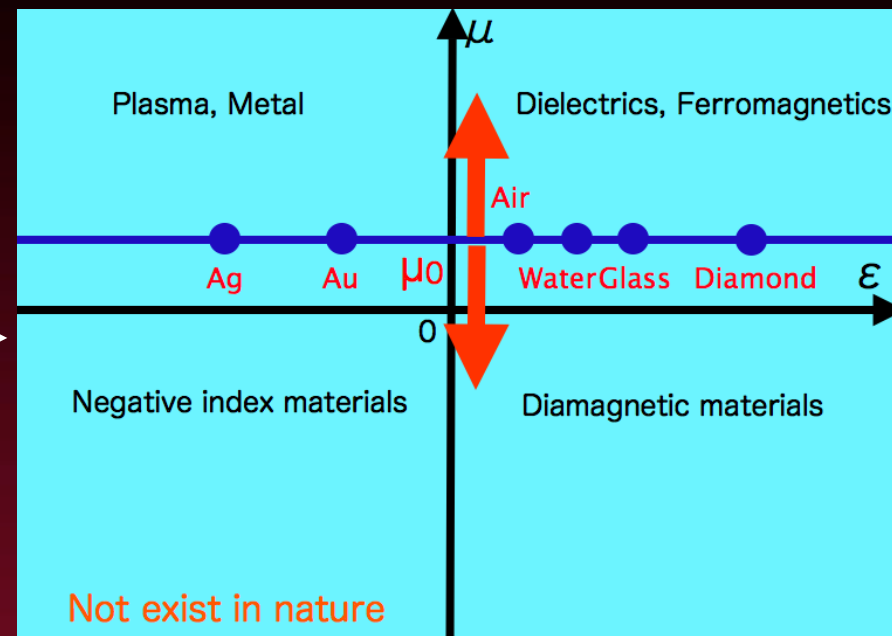
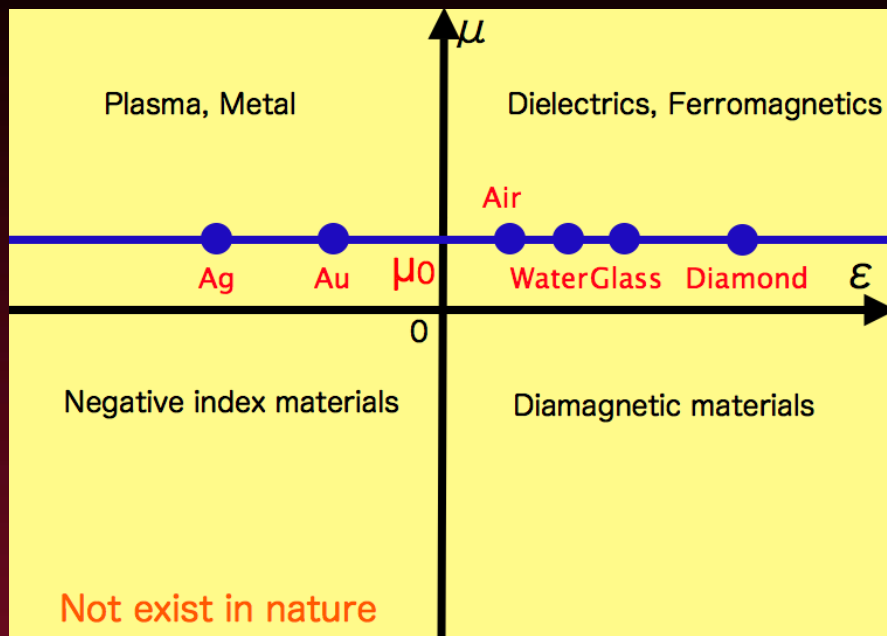


$$n = \sqrt{\epsilon} \sqrt{\mu}$$

$$\begin{array}{ccc} n=1.76 & \xrightarrow{\quad} & n=1.80 \\ \epsilon=3.10 & \searrow \text{x1.023} \nearrow & \epsilon=3.24 \\ \mu=1.0 & & \mu=1.046 \end{array}$$



新しい光の世界の幕開け



新しい光学の世界

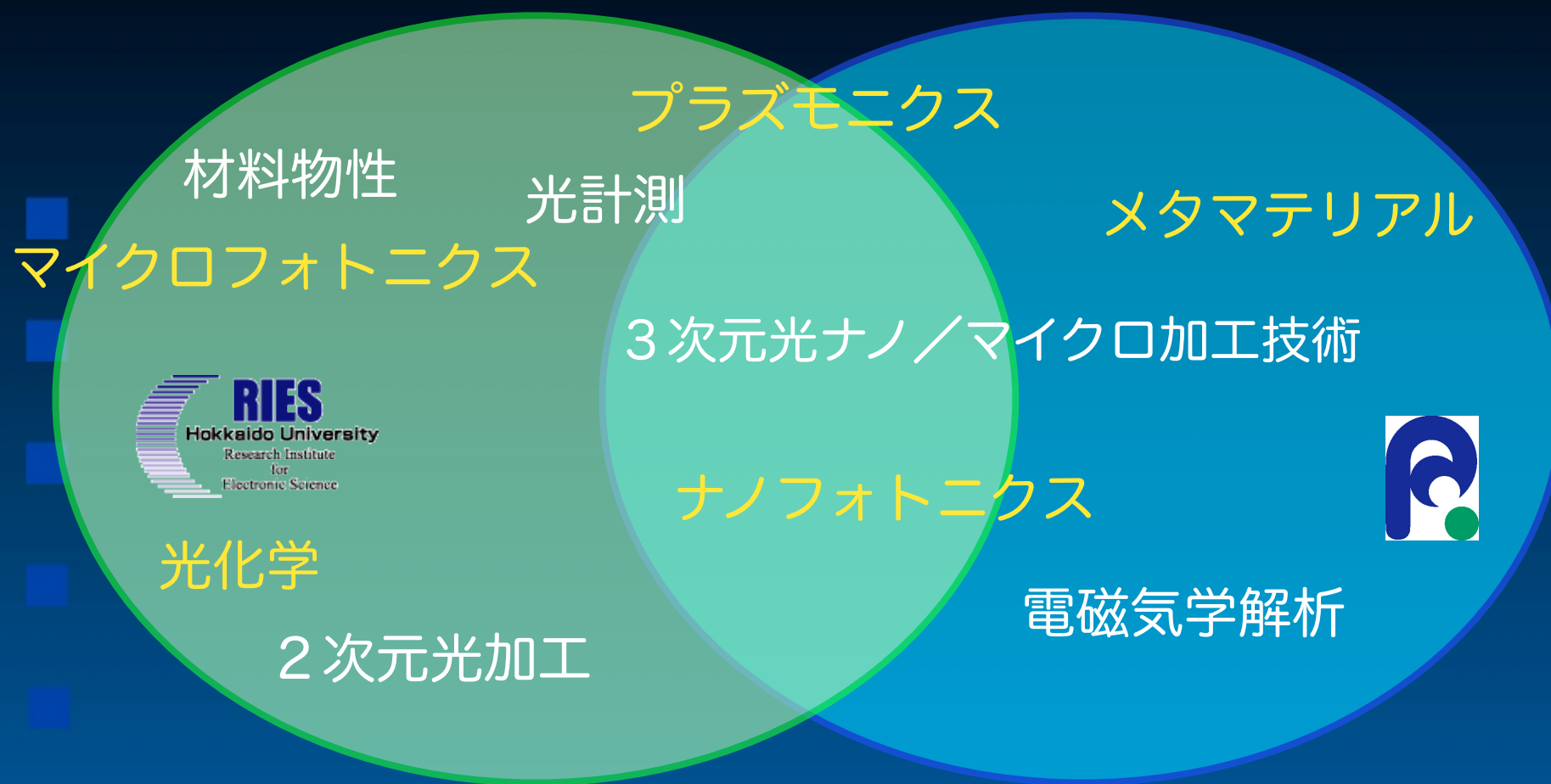
未知の現象, 機能, 効果

古典光学

$$\mu = \mu_0 \ (\mu_r = 1.0)$$



プラズモニクス, メタマテリアルとそれを応用した光機能素子への展開



Scientific Side

ナノ物質（金属）と光の相互作用

表面増強, 電場増強, 高感度光計測



新しい機能を引き出す (ナノ機能光学)

ミクロな領域での光と物質の相互作用が、マクロな機能を創出。
形、構造が意味を持ち、新しい現象を発現する。

自然界に存在しない光学特性の実現

新奇な光学現象の発現と光機能デバイスへの応用



Technical Side

● ナノ加工

トップダウン的手法のみならずボトムアップ手法

- 3次元ナノファブリケーション
- 2次元ナノファブリケーション
- 自己組織化
- 化学合成

● ナノ計測

プラズモニックな効果の利用

- 電場増強
- 高分解能 (Large k)
- 分光特性 (Resonance, Structure dependence)

● ナノマニピュレーション

- 単分子操作
- ナノスケール位置制御



高効率光電エネルギー変換デバイス



問題点：

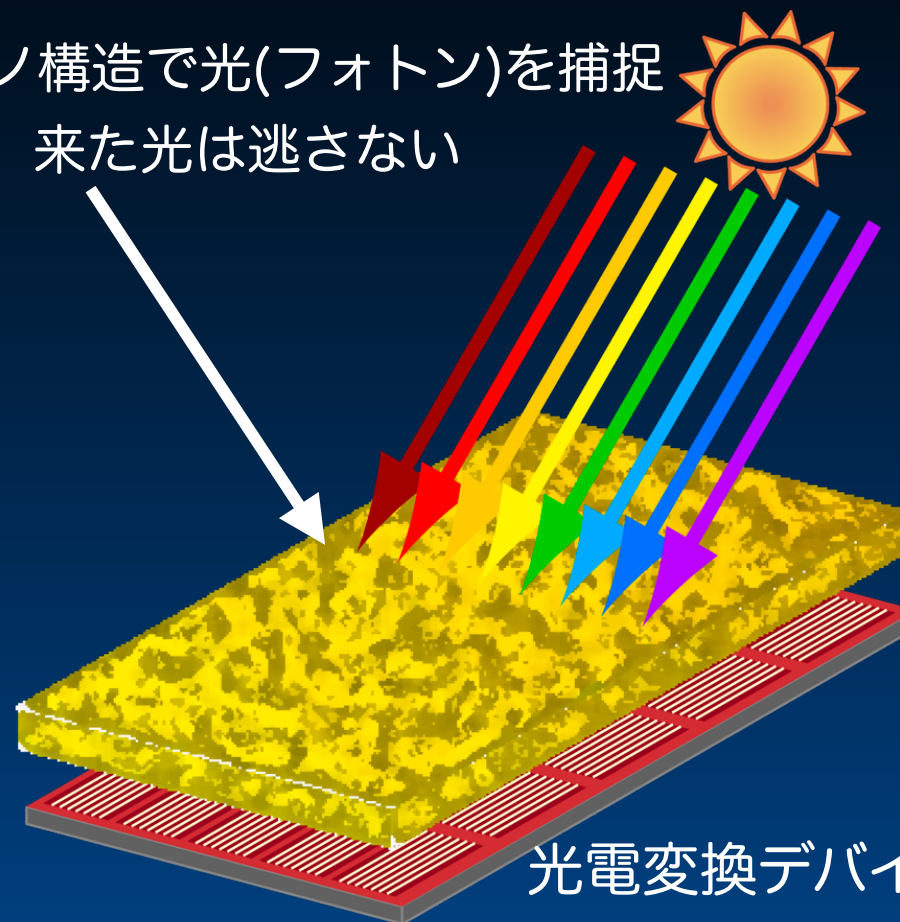
照射された光が反射して戻ってしまう



金属製 光のスポンジ

光にとっては、一度迷い込むと二度と出られない樹海

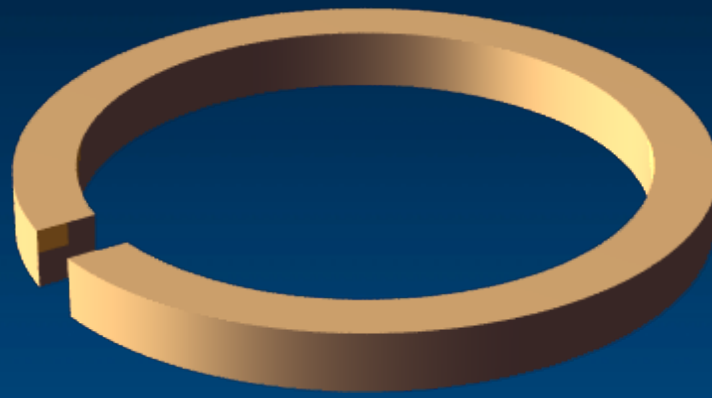
全スペクトルを光電エネルギー変換に利用
金属ナノ構造で光(フォトン)を捕捉
来た光は逃さない

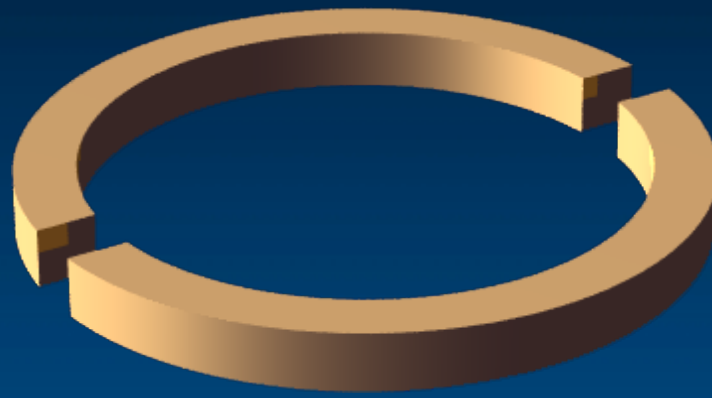


構造はナノ，サイズはc m， m





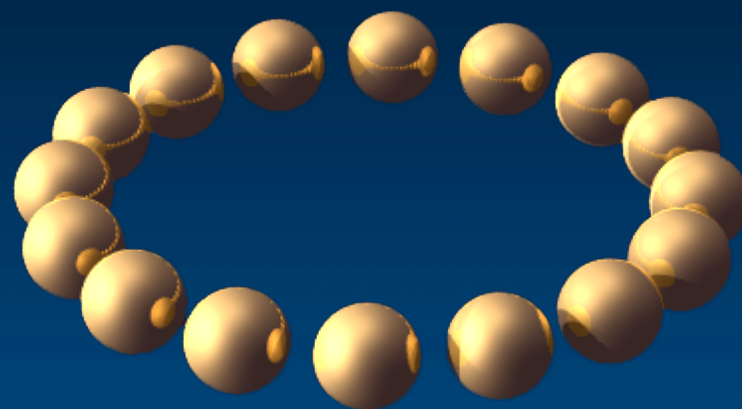


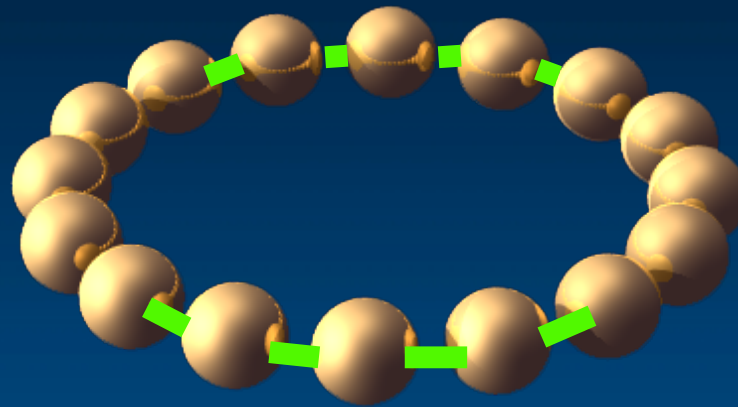












Nano-size metal particles aligned roundly



まとめ

1. 光
プラズモニック・メタマテリアル
2. プラズモニック・メタマテリアル
微小な金属リングで物質を変える
3. プラズモニック・メタマテリアルの加工法
レーザーで金属を作るー2光子還元法
4. プラズモニック・メタマテリアルの応用
スーパーレンズ（完全レンズ）
無反射素子
透明人間
プラスチックの屈折率を上げる.

