

このファイルは2007年10月27日に国際高等研究所の研究会で石原が行なった講演に若干の加筆訂正を行なったものです。



電磁メタマテリアル

東北大学大学院
理学研究科物理学専攻
石原照也



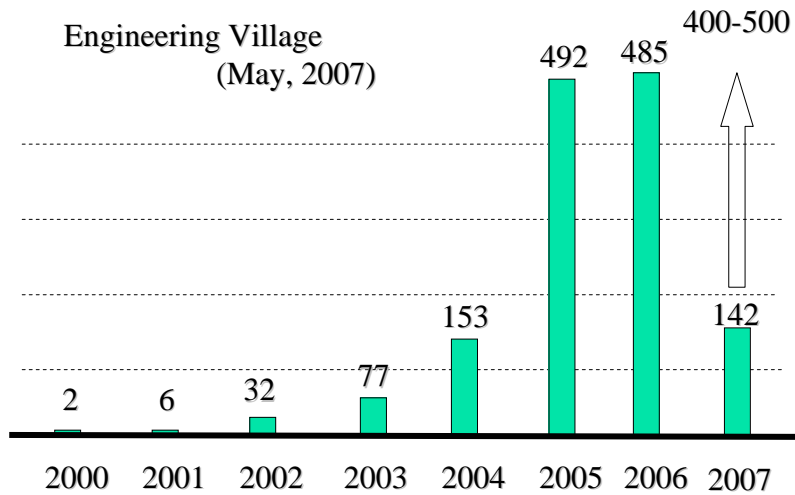
Metamaterials'2007

"First International Congress on Advanced Electromagnetic
Materials in Microwaves and Optics",
Oct.22-24, 2007, University of Roma III





メタマテリアル研究の論文数



メタマテリアルの定義

μετα: beyond
通常の物質を超えた物質

電磁メタマテリアル
波長より十分に小さい、
しかし原子・分子よりはずっと大きな構造に由来した、
「自然界の物質ではありえない電磁応答」
を示す構造体



「自然界の物質でありえない電磁応答」
は物理的に実現可能か？

もちろん！

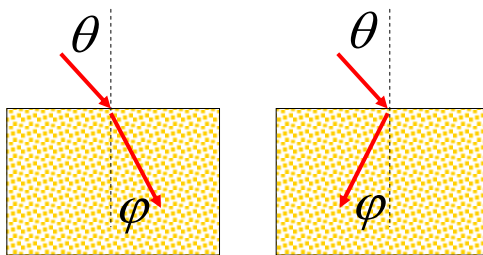
例：
携帯電話、パソコン、...

電磁メタマテリアル研究会 2005年10月発足
<http://www.metamaterials.jp/>

回路の物質化



ありえない電磁応答の例：負の屈折



$n > 0$

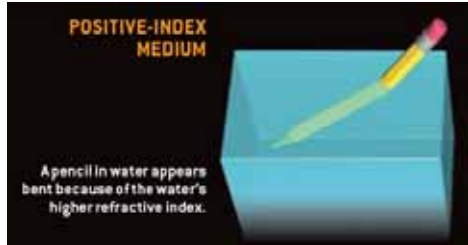
$n < 0$

$$\frac{\sin \theta}{\sin \varphi} = n$$

経験的には屈折は正。
これは自然の法則によるものか？



もし屈折率が負であったら？



Pendry and Smith
 "The quest for the Superlens"
 Scientific American 2006



Maxwell 方程式と波動伝搬

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$\text{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

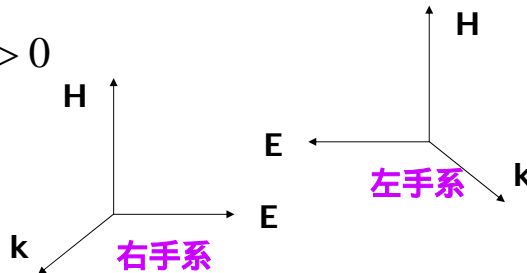
$$\vec{E}, \vec{H} \propto e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

$\mu > 0$ の時、波が伝搬する

$$k^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon\mu; \quad \varepsilon\mu > 0$$

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega\mu\mu_0 \vec{H}$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega\varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}$$





左手系、右手系媒質における屈折

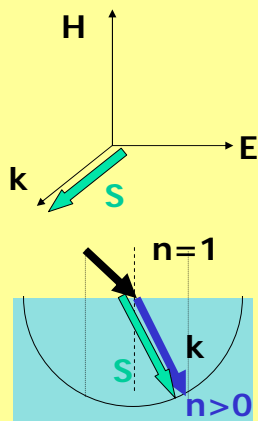
$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

$$\left(\frac{ck}{\omega}\right)^2 = \epsilon\mu$$

$$n \equiv \frac{k}{k_0} = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$$

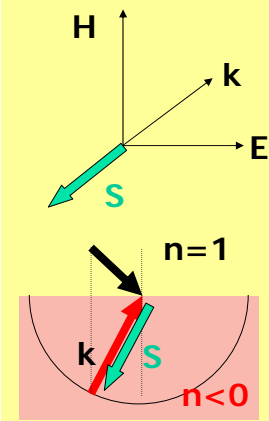
運動量とエネルギー流が
界面で連続となるよう
左手系では負の屈折が生じる

$\epsilon > 0, \mu > 0$; 右手系



通常の屈折

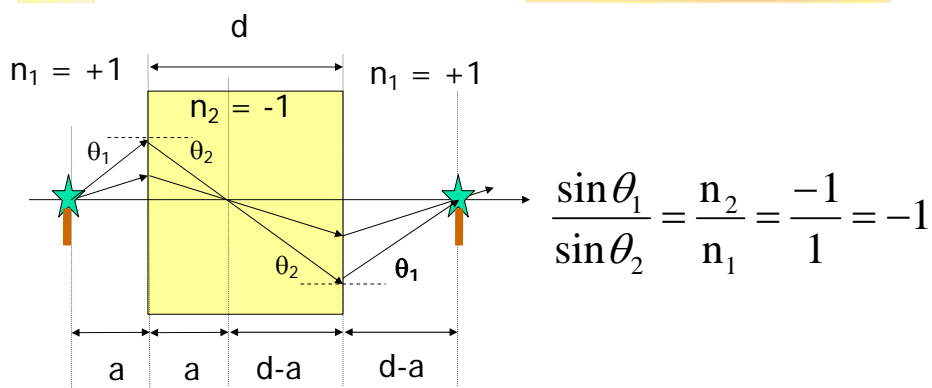
$\epsilon < 0, \mu < 0$; 左手系



負の屈折



負の屈折物質の平板



- $n = -1$ の平板はイメージを伝送する。

V.G.Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ .", Soviet Physics Uspekhi 10 (1968) 509



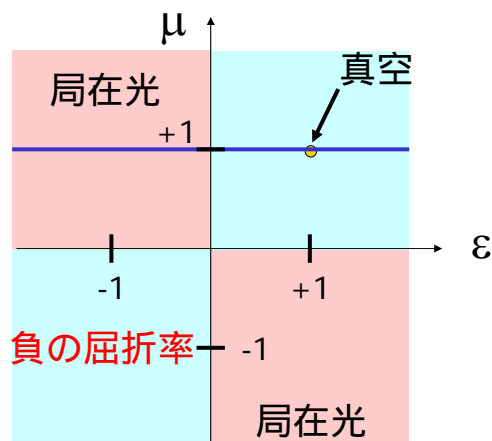
V. G. Veselago



Metamaterials'2007にて講演中のVeselago教授



物質の分類



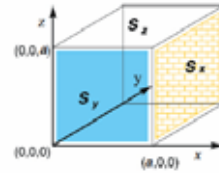
スピンや軌道角運動量に由来しない人工構造による磁性を利用する

透磁率の制御
物質概念の拡大



混合物の均質化

$$\text{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$



$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = -i\omega \int_S \vec{D} d\sigma$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = +i\omega \int_S \vec{B} d\sigma$$

$$E_{eff}^{(x)} = \frac{1}{a} \int_{(0,0,0)}^{(a,0,0)} E_x dx, \quad H_{eff}^{(x)} = \frac{1}{a} \int_{(0,0,0)}^{(a,0,0)} H_x dx,$$

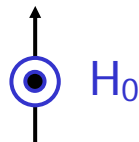
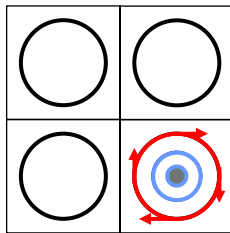
$$D_{eff}^{(x)} = \frac{1}{a^2} \int_{S_x} D_x d\sigma_x, \quad B_{eff}^{(x)} = \frac{1}{a^2} \int_{S_x} B_x d\sigma_x, \dots$$

電場E, 磁場Hには縦平均、電束密度D、磁束密度Bには横平均



金属円筒配列の透磁率

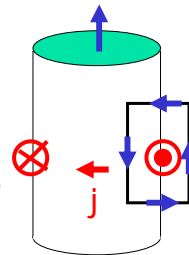
J. Pendry (1999)による



$$H_{in} = H_0 - j + \frac{\pi r^2}{a^2} j < H_0$$

$$H_{out} = H_0 + \frac{\pi r^2}{a^2} j > H_0$$

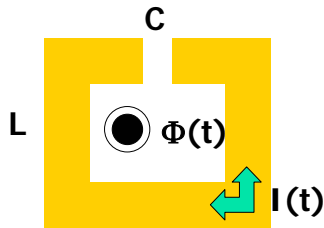
$$\mu_{eff} = \frac{B_{eff}}{\mu_0 H_{eff}} = 1 - \frac{\pi r^2 / a^2}{1 + i2\rho / (\mu_0 \omega r)} < 1$$





分割リング共振器による磁気共鳴

First proposed by J. Pendry (1999)



$$LI + \frac{1}{C} \int Idt = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi = \mu_0 HS$$

$$\ddot{I} + \frac{1}{LC} I = \omega^2 \frac{\mu_0 S}{L} H$$

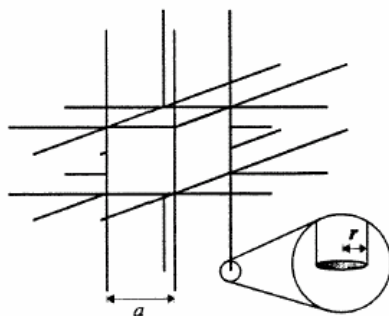
$$M = \frac{N}{V} IS = \chi_m H$$

$$\mu = 1 + \chi_m = 1 + \frac{f\omega^2}{\omega_{LC}^2 - \omega^2}$$



金属細線配列の電磁応答

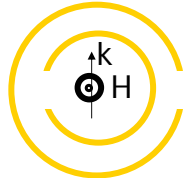
First proposed by J. Pendry et al. (1998)



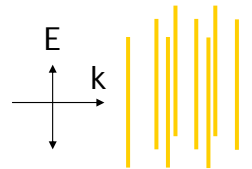
$$\varepsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$$

$$\omega_p^2 = \frac{n_{eff} e^2}{\varepsilon_0 m_{eff}} = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln(a/r)}$$

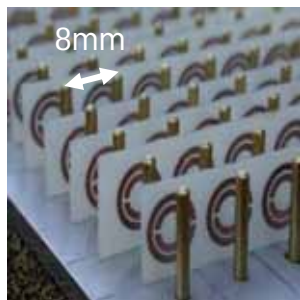
最初のメタマテリアル



分割リング:
透磁率の共振

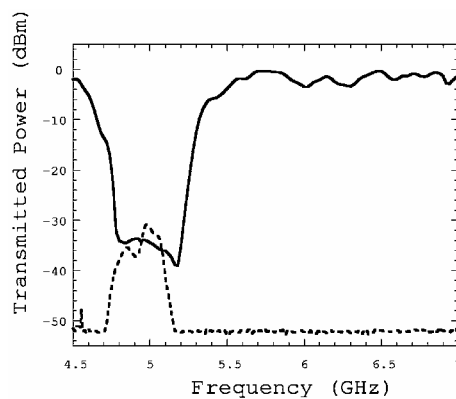


金属細線:
負の誘電率



5GHz ($\lambda = 6\text{cm}$) で負の屈折率をもつ
世界最初のメタマテリアル
Smith et al. (2000)

マイクロ波透過実験

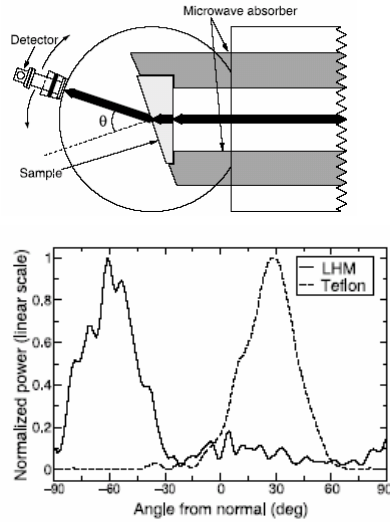


実線: 分割リングだけの場合の透過。
破線: 分割リングとワイヤの複合系の透過。
ワイヤだけの場合の透過はノイズレベル(-52dB)

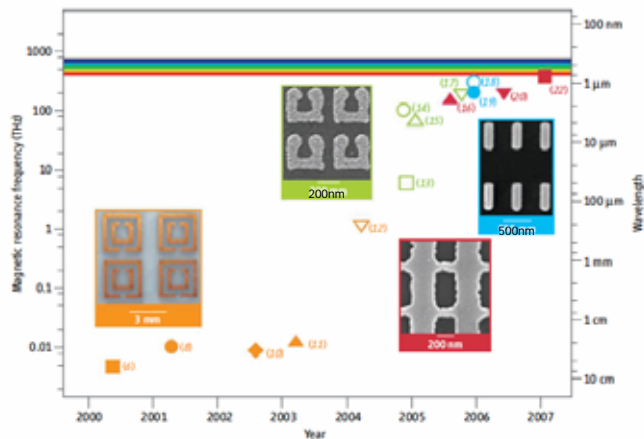


負の屈折現象に関する最初の実験

Shelby, Smith et al. 2001



より短い波長をめざして

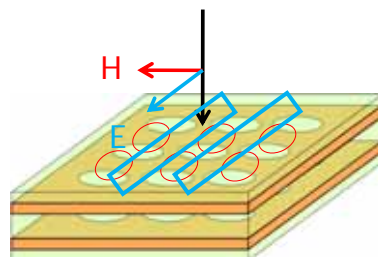


Advances in metamaterials. The solid symbols denote $n < 0$; the open symbols denote $\mu < 0$. Orange: data from structures based on the double split-ring resonator (DSRR); green: data from U-shaped SRRs; blue: data from pairs of metallic nanorods; red: data from the "fishnet" structure. The four insets give pictures of fabricated structures in different frequency regions.

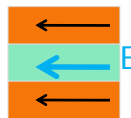
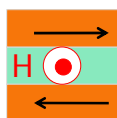
C. Soukoulis et al. , Science, Jan.5 (2007)



ダブルフィッシュネット構造の電磁応答

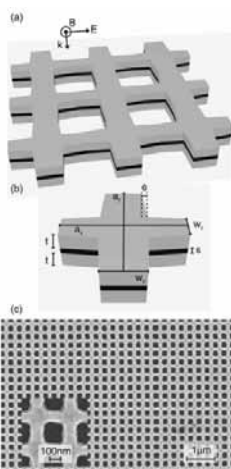


S. Zhang et al.
PRL (2005).

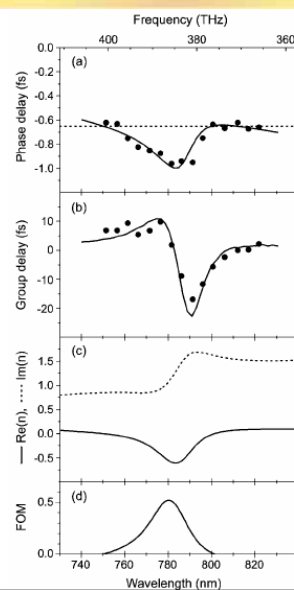


$n = -0.6 @ 780\text{nm}$

Dolling, Wegener, Soukoulis, Linden
Opt. Lett. 32(2007)53.

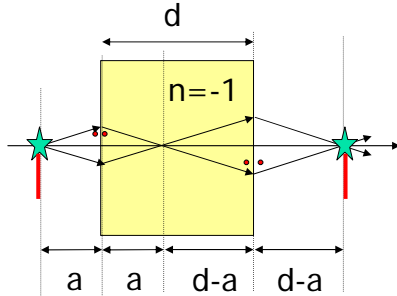


Ag/MgF₂/Ag
 $a_x = a_y = 300\text{nm}$
 $t = 40\text{nm}$
 $s = 17\text{nm}$





完全レンズ



$n=-1$ の平板は反物質

波長よりも小さい構造が「見える」

J.Pendry: PRL85(2000)3966.

回折限界を超えた結像

Reconstruction of the object in the image plane

Electric field of the object in the object plane, $z=0$,

$$E(x, y, z=0, t) = \sum_{\alpha, \beta, \gamma} E_{\alpha}(k_x, k_y) \exp(+ik_x x + ik_y y - i\omega t)$$

After transmission through a slab, $n = -1$, thickness d , distance d from the object,

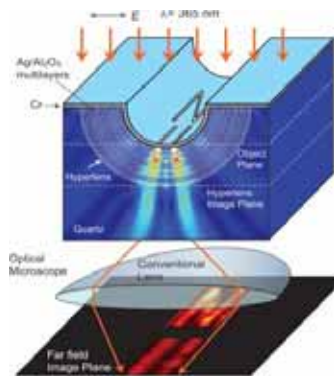
$$E(x, y, z=d+d, t) = \sum_{\alpha, \beta, \gamma} T(k_x, k_y) E_{\alpha}(k_x, k_y) \exp(+ik_x d + ik_y y - i\omega t) \\ = \sum_{\alpha, \beta, \gamma} \exp(-ik_x d) E_{\alpha}(k_x, k_y) \exp(+ik_x d + ik_y y - i\omega t)$$

i.e. the lens

- corrects the phases of propagating waves
 - corrects the amplitudes of evanescent waves
- and hence combines all waves to make a perfect focus.



ハイパーレンズ



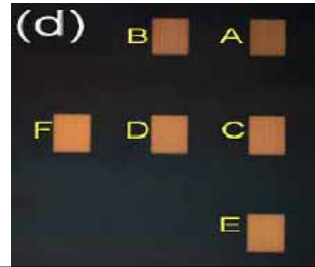
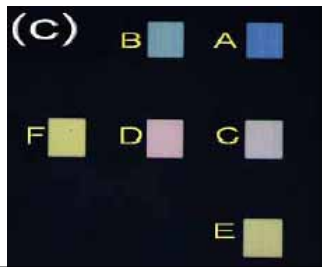
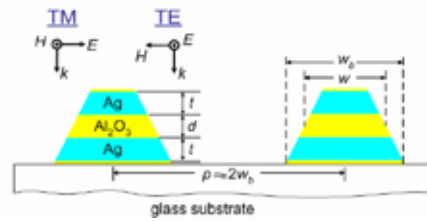
金属 / 誘電体積層膜の
曲面によって
近接場を伝播波に変換

実時間、超解像イメージング
への第一歩
X. Zhang (2007)



磁気応答による虹色

Cai, ..., Shalaev;
(Optics Express, March 2007)



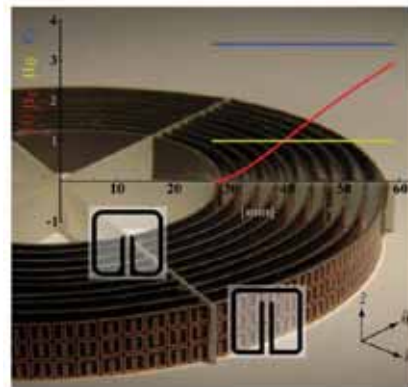
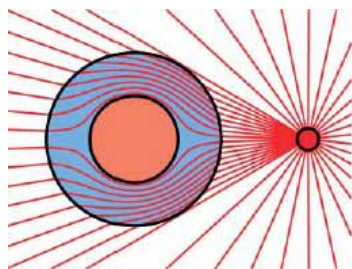
隠れ蓑技術

波動インピーダンス

$$Z = \sqrt{|\mu|/|\varepsilon|}$$

屈折率

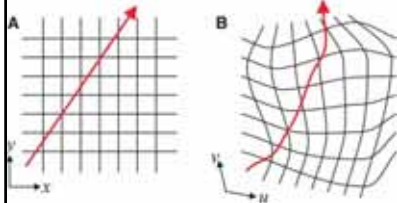
$$n = \pm \sqrt{|\varepsilon||\mu|}$$



隠れ蓑のデモンストレーション
Schurig, Smith, Pendry (2006)



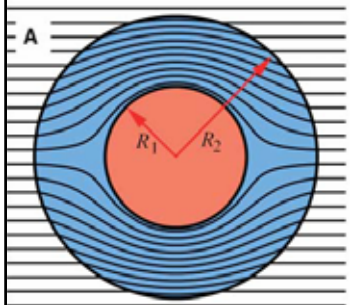
等角写像



$$E'_i = Q_i E_i$$

$$H'_i = Q_i H_i$$

$$\epsilon'_{ii} = \mu'_{ii} = \frac{Q_1 Q_2 Q_3}{Q_i^2}$$



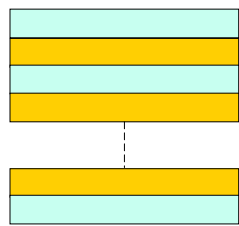
$$\theta' = \theta$$

$$z' = z$$

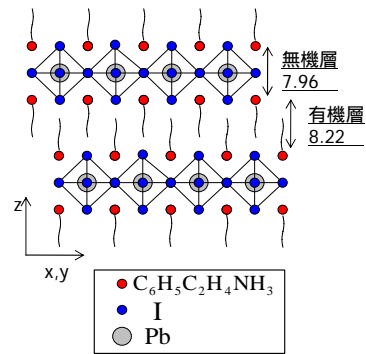
$$r' = \begin{cases} r(R_2 - R_1) / R_2 + R_1 & (0 \leq r \leq R_2) \\ r & (r \geq R_2) \end{cases}$$



金属 / 誘電体 短周期多層膜



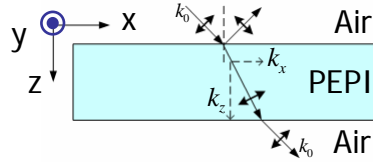
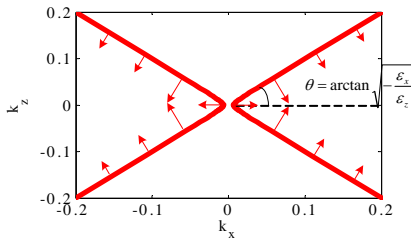
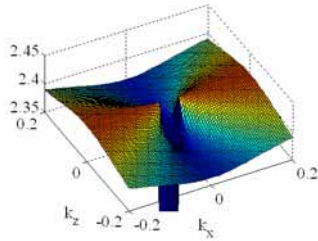
金属 / 誘電体多層膜
 xx と zz が異符号の時、
 異常な光伝播が生じる。



励起子の横波共鳴と
 縦波共鳴の間のエネルギーでは
 誘電率が負
 金属 / 誘電体多層膜の代替品



誘電率の符号が異なる場合の分散関係 (Wood, Pendry, Tsai PRB 74(2006)115116.)



TM wave: $\frac{k_x^2}{\epsilon_z} + \frac{k_z^2}{\epsilon_x} = \frac{\omega^2}{c^2} = k_0^2$

$\Rightarrow k_z = \sqrt{-\epsilon_x \left(\frac{k_x^2}{\epsilon_z} - k_0^2 \right)} > 0$

If $\epsilon_x < 0, \epsilon_z > 0$

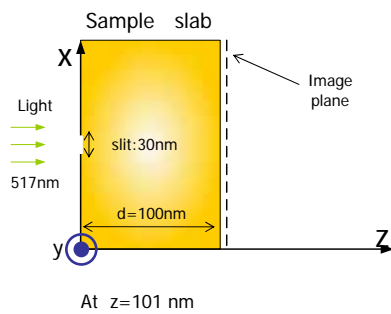
k_z は実数 for $k_x \geq \sqrt{\epsilon_z} k_0$

k_z は虚数 for $0 \leq k_x < \sqrt{\epsilon_z} k_0$

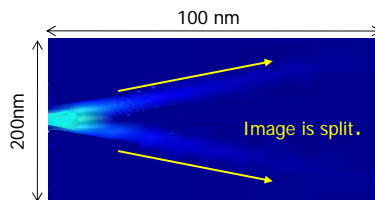
- 大きな k_x に対して, k_z は実数
媒質内を伝搬
- 群速度は二つの方向を向く
特定方向を伝搬



イメージングのシミュレーション



$$H_{\text{image}}(x, z) = \frac{H_0}{k_0} \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{30k_x}{2}\right) t(k_x, \omega) e^{ik_x x + ik'_z(z-d) - i\alpha} dk_x$$

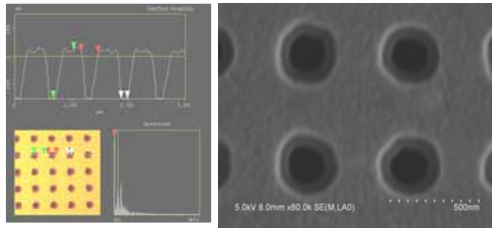




ダブルフィッシュネット構造

◆ Standard Semiconductor Process

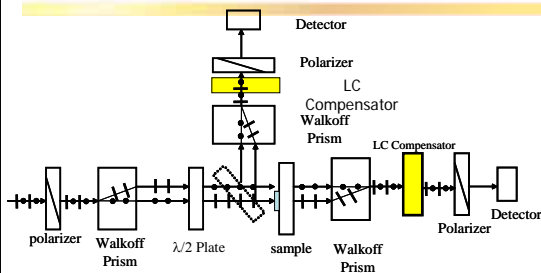
- ◆ Spattering
- ◆ E-beam writing
- ◆ Ion-beam etching



- Diameter of hole : 250nm in average
- Lattice constant : 600nm
- Depth : 150nm



干渉計による位相測定



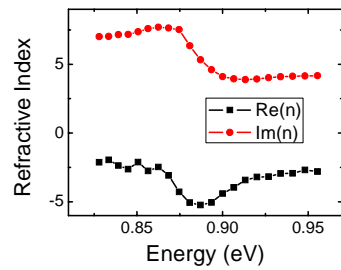
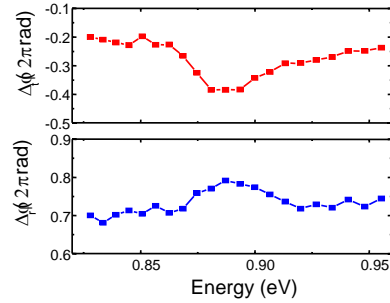
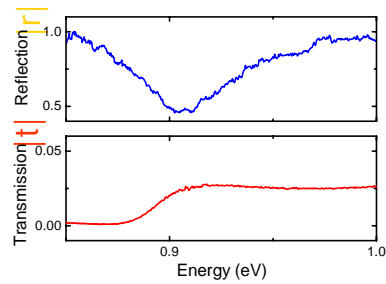
マッハツェンダー型の干渉計
液晶位相補償板で位相測定

複素透過率、反射率から屈折率をもとめる。

$$\cos n \frac{\omega}{c} d = \frac{1 - r^2 + t^2}{2t}$$



屈折率の測定



Young-Geun Roh,
T. Ishihara et al.
Metamaterial' 2007



物理のフロンティアとしての メタマテリアル

新しい状況の発現 物理の発展
(高エネルギー、極限条件、新物質)

新物質の拡張としてのメタマテリアル

電磁場に対する固体物理学のようなものの建設



新物質としてのメタマテリアル

従来の物質科学
巨視的操作によるナノ構造の実現

メタマテリアル
微細加工による新構造の作製

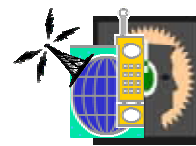
自己組織化、ハイブリッド法によるナノ構造の実現



メタマテリアルの応用

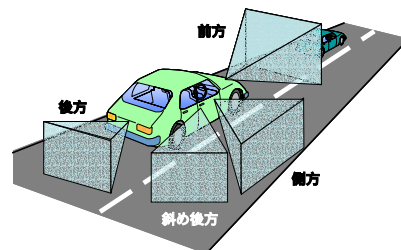
マイクロ波・ミリ波帯

- 指向性制御による**広範囲操作レーダー**
- 隠れ蓑技術による**電波障害の解決**
- 磁気壁をもちいた**極薄型アンテナ**、**薄型ICタグ**



光波帯

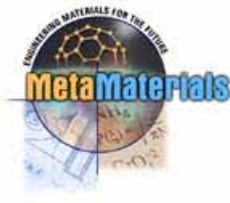
- 光アンテナによるセンサ応用
- 非線形光学デバイス
- 熱くないエコ電球
- メタマテリアルペンキ





研究助成の原状: 諸外国の場合

メタマテリアルは本質的に学際的
さまざまなバックグラウンドの研究者を束ねる枠組みが必要



アメリカ: DARPA
2000 ~



中国: Meta973
2004 ~



EU: Metamorphose
2004 ~



まとめ

1. 波長よりも小さい構造で電磁波応答を大きく変えることができる。
2. マイクロ波やミリ波では携帯電話やレーダー関連の技術として応用が期待される。
3. 負の屈折は光学設計に革命的な影響を与える可能性がある。
4. メタマテリアルによりこれまで経験したことのない物理的な状況が実現する。
5. 電波工学と物理学の交流によって新しいパラダイムが生まれつつある。



メタマテリアル特集の御案内

日本光学会会誌
「光学」2007年10月号
メタマテリアル - 左手系材料を中心として -
総合報告
解説
最近の技術から

メタマテリアル - 最新技術と応用 -
シーエムシー出版

<http://www.cmcbooks.co.jp/books/t0585.php>



END
