

%本稿は2008年度光物性研究会特別講演の抽象に一部加筆・修正を加えたものである%

メタマテリアル: サブ波長構造による新奇な光物性

石原照也

東北大学大学院理学研究科 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3

Metamaterials: Exotic optical properties due to sub-wavelength structure

Teruya Ishihara

Graduate School of Sciences, Tohoku University, 6-3 Aramaki-Aoba, Sendai 980-8578

A metamaterial is an artificial composite with exotic electromagnetic response that is not readily found in nature. It consists of a unit with a size smaller than the wavelength of incident electromagnetic wave while much larger than the atomic scale. Such a composite can be regarded as an effective new material, of which properties can be designed artificially by its structure. In optical frequency, the magnetic response is negligible and permeability is identical to that of vacuum. By designing appropriate metal-dielectric composite structure, however, it is possible to modify it significantly and can make it even negative. Furthermore if it is combined with negative permittivity, refractive index becomes negative. With metamaterials many unusual phenomena such as 'perfect' imaging and an invisible mantle emerge. The impact of the metamaterial paradigm to a research field of solid state photo-physics will be discussed in the lecture.

はじめに

光物性分野ではこれまでイオン結晶、半導体、有機物、ポリマーなどの物質に加え、半導体超格子、金属微粒子など人工物質も対象として、主として電子状態の研究がおこなわれてきた。ところが今世紀に入って、まったく新しい形の「物質」が現れ、今急速に発展してきている。その「物質」とは原子より十分大きく光波長のスケールより小さい人工構造であり、透磁率と誘電率を自在に制御し、屈折率を負にすることさえも可能となる。これをメタマテリアルと呼ぶ。負の屈折に関連する物理の2004年までの発展に関してはRamakrishnaによるレビュー¹⁾が参考になる。最近ではメタマテリアルを用いると物体を透明化する「隠れ蓑」や波長以下の構造が見える超解像イメージングといった「ありえない技術」も可能となることがわかってきた。現時点で可視光領域で実現できることは限られているが、マイクロ波領域の実験的な検証をよりどころに、可視光領域で実現するための努力がなされつつある。本講演では物理的な概念と現状について概観し、光物性

のトピックスとしての将来展望について考察する。

1. 負の屈折率

1967年(英訳は1968年)にソ連の実験物理学者ベセラゴはマックスウェル方程式の平面波解について議論し負の屈折率という概念を提案した²⁾。

物質中のマックスウェル方程式は

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

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

となるが、ここで平面波 $\vec{E}, \vec{H} \propto \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t)$ を仮定すると

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

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

これを組み合わせると、分散関係

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

が得られる。伝搬波が許されるためには、 ϵ と μ の積が正であることが必要となる。通常光学領域では $\mu=1$ であるので、平面波が存在するのは $\epsilon > 0$ の場合であるが、仮に $\epsilon < 0$ と μ が同時に負であっても平面波解は存在することになる。 $\epsilon < 0$, $\mu < 0$ の時、マックスウェル方程式は $\vec{E}, \vec{H}, \vec{k}$ が通常と逆に左手の関係をもつので、このような媒質を左手系媒質と呼ぶ。ポインティングベクトル $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ であるから、 \vec{k} と \vec{S} は反平行になる。通常の媒質 1 からこのような物質に光が入射するとき、界面に平行な波数ベクトルが保存されること：

$$k_1 \sin \theta_1 = k_2 \sin \theta_2$$

とエネルギーの流れが保存されることから、折り返すように屈折することになる。これは屈折率が負であることを意味している。すなわち ϵ と μ が同時に負である場合に屈折率が負となる。 ϵ と μ が複素数の場合の考え方に関しては文献³⁾で議論されている。左手系という名前は旋光性を連想させるが、これとは全く別の概念なので、最近では負屈折率媒質 (Negative Index Material; NIM) と呼ばれることが多くなっている。媒質が負の屈折率をもつとドップラー効果、チェレンコフ効果、光の放射圧が通常と逆向きになるなど、様々な常識はずれの性質をもつことになる。

さらに興味深いのはイメージング機能である。

ϵ_1, μ_1 の媒質に対して $\epsilon_2 = -\epsilon_1 < 0$, $\mu_2 = -\mu_1 < 0$ の平板状物体は、その近傍のある点から来た光を反射なしに反対側の点に結像する。作図してみると明らかのように平板から a だけ離れた点は厚さ d の平板の後ろ面から $d-a$ だけ離れたところに焦点を結ぶ。すなわち焦点距離は $2d$ であって、平板前面より d 以上はなれると像を結ぶことはできない。またこの「レンズ」は通常のレンズと異なり、像を正立のまま転送する。

このように誘電率と透磁率が同時に負である物質は興味深い性質を持つが、このような条件を満たすものが発見されるのにはその後 30 年以上も要

したのである。

2. マイクロ波領域の人工電磁媒質

2.1 負の誘電率

英国のペンドリーらは1996年に金属細線集合体がマイクロ波領域で負の誘電率をもつという論文を発表した⁴⁾。金属のプラズマ周波数以下であれば、プラズマ応答をするのは人工媒質を作らずとも当たり前であると思われる方もいるかも知れない。しかし、マイクロ波領域の振動数は金属の緩和定数よりも小さく、Hagen-Rubens領域と呼ばれる、誘電率が純虚数の世界である。金属を細線に分割し、有効電子密度を下げるとともに、インダクタンスが上がって電子の有効質量が大きくなることを利用して、有効プラズマ周波数を紫外線領域からマイクロ波領域に下げてそれを実現したのである。

2.2 人工電磁媒質の粗視化

次にペンドリーらはマイクロ波領域の磁場に対して応答する人工媒質を議論するため粗視化の処方箋を与えた⁵⁾。有効透磁率 μ は

$$B_{ave} = \mu \mu_0 H_{ave}$$

のように定義されるが、もしも平均のとり方が磁束密度と磁場で同じであるなら、透磁率は1となってしまう。しかし、人工構造の(波長より十分に小さい)構造単位に対してマックスウェル方程式の積分形を考えると、磁束密度と電束密度は面積分で、磁場と電場は線積分で定義すべきことがわかる。非磁性金属の構造体で透磁率が1から変化しうる理由は単位構造の中の場が不均一であるからである。このように構造単位の電磁場を微視的に計算してから粗視化して有効透磁率を求める考え方の詳細についてはスミスとペンドリーによるレビュー⁶⁾を参照されたい。

2.3 分割リング共振器

ほとんどの物質において磁気応答は数GHz程度以上でなくなってしまう。実際ランダウ・リフシッツの教科書⁷⁾では原子中の電子の軌道運動による磁性が光学領域で無視できるという一般的な議論を行っている。しかし金属の構造体では電流と分極電流が磁性を生じるのである。金属リングに切れ目をい

れた分割リングと呼ばれる構造体では内部の磁場変化を打ち消そうとする電流によって磁気的な応答を示す。カットはコンデンサの役割を果たすので、この構造は有限の周波数で共鳴応答を示し、負の透磁率を示す周波数領域が生まれる。しばしば逆の位置にカットをもつリングを大小二つのリングを組み合わせるのは強い電気的な応答が生じるのを抑えるためである。しかし、大小の2重リング構造では対称性が悪いので、共鳴は磁気応答と電気応答が混合した複異方性(bianisotropy)をもったものになっている⁸⁾。

3. マイクロ波領域における負の屈折と結像の実験的検証

3.1 分割リングと金属ワイヤ複合系

2000年にスミスらは負の透磁率を示す分割リングと負の誘電率を示す金属線を組み合わせて負の屈折率を示す最初のメタマテリアルを作製した⁹⁾。負の屈折率をもつことは、分割リングのみでは透過しない周波数帯が、金属線と組み合わせることで透過するようになることから結論された。

2001年にはメタマテリアルの最初の屈折実験がマイクロ波領域で行われた¹⁰⁾。分割リングと金属ワイヤをプリントした基板を井桁仕切り状にならべることにより、平面内で等方的(4回対称)なプリズムを作製し、導波路でマイクロ波を照射し、負の屈折を示すように設計された構造体と通常物質であるテフロンを比較して、負の屈折を実証した。これに関しては導波路の存在による付加的影響が懸念されたが、後にボーイングのグループによる自由空間における実験が行われ、ここに負の屈折現象が実在することはゆるぎないものになった¹¹⁾。負の屈折現象自体は格子定数が大きく、回折が存在してメタマテリアルとは見せないフォトニック結晶においても見られる場合がある^{12,13)}。

負の屈折は日常観察することができない現象なので、多くの議論を生み出した。ホイヘンスの原理によって作図を行うと外側の光線は一瞬のうちに有限の光路差に追いつかなくてはならないように見える。バラジューらは2つのわずかに異なった周波数の光を干渉させ、干渉面が負の屈折率をもった媒質においてどのようになるかを調べ、干渉の方向を群速度の方向、したがってエネルギーの流れの方

向と考えて負の屈折について批判した¹⁵⁾。しかしその後、干渉縞の方向と群速度の方向は一般に異なりエネルギー流れは確かに負の屈折をすること¹⁶⁾、時間領域の計算から屈折方向が定まるには有限の時間がかかること¹⁷⁾が数値計算によって示され、現在では負の屈折が現実的なものであることが広く認められている。

3.2 伝送線路によるアプローチ

マイクロ波領域においてスミスらが負の屈折を実証してまもなく、電波工学の分野で知られていた後進波との関係が指摘された。これを屈折が議論できるように伊藤¹⁸⁾とエレフテリダデス¹⁹⁾は独立に2次元に拡張した。伝送回路線路網の考え方では通常の導波路の等価回路のLとCをいれかえたデュアル回路がハイパスフィルターとなることに注目し、ある周波数領域で群速度と位相速度が逆向きとなる、左手系の振る舞いをするを示した。現実には物理的な長さや浮遊容量によって必ず右手系の成分が存在するため、左右混合した系が実現される。真田は左手系2次元の分布定数回路を設計して、平面構造がVeselagoレンズとして働くことをシミュレーションと実験によって示した²⁰⁾。負の屈折をしめすバンド幅はカットオフ周波数とシリーズ(直列)またはシャント(並列)のLC共鳴のうち低いほうの周波数で決まり、SRRで達成されるバンド幅に比べてずっと大きくなる。これは単位胞同士の電磁的結合が強いことに由来している。固体電子論において、無機結晶の荷電子電子バンド幅が分子結晶のバンド幅にくらべてずっと大きいことに対応する現象である。

4 完全レンズとスーパーレンズ

4.1 負の屈折率をもった平板の結像作用

ペンドリーはベセラゴの議論した平面レンズが、伝搬波のみならずエバネッセント波も同様に伝達することを示した²¹⁾。

分散関係式は自由空間で

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \equiv k_0^2$$

であるから、光源の微細な空間構造は大きな波数に対応し、上の式からそれに垂直な成分の波数を負に、

すなわち、エバネッセント波にしてしまう。その結果、従来の結像系ではこれらのモードは探知されない。しかし走査型近接場顕微鏡(SNOM)のように近接場を測定するならば、空間分解の制約は逃れることができる。z成分が伝搬するという条件をはずせば、空間分解能はいかようにも大きくできる。3次元空間を2次元でマップするために、このようなことが可能となる。

ペンドリーはベセラゴの平面レンズに関して以下の議論をおこなった。誘電率と透磁率が-1で、屈折率が-1であるような平面スラブの真空に対する反射率は0であり、透過率は $\exp(-ik_z d)$ となる。

これからまず伝搬波については、スラブ前後の空気中の位相変化

$\exp(+ik_z x)\exp(+ik_z(d-x)) = \exp(+ik_z d)$ をスラブ内部での位相変化が打ち消すために、物体面 $z=0$ から像面 $z=2d$ までのトータルな位相変化が0となるのがわかる。一方、エバネッセント波は正の虚部 $k_z=i$ をもつから、自由空間で減衰したエバネッセント波は負の屈折率をもつスラブの中で振幅が大きくなることを意味している。この現象はしばしば「増幅」と呼ばれるが、エバネッセント波はエネルギーを伝搬しないからエネルギーが増加しているわけではない。表面に局在したモードをその端において励起しているに過ぎない。このように伝搬波もエバネッセント波も像面で同じであるから、像を再構成するすべての情報はそろっていることになる。その意味で負の屈折率(真空とインピーダンスマッチさせる場合は誘電率-1、透磁率-1で屈折率-1)をもつスラブを完全レンズと呼ぶ。界面におけるエバネッセント波の大きなエネルギー密度はファブリペロー共振器の中の高い電場強度と同様に、時間をかけて蓄積される。完全レンズの条件は正負の屈折率物質の界面で電氣的表面プラズモン(波数と磁場が垂直)と磁氣的表面プラズモン(波数と電場が垂直)が同時に存在する条件と等価である。

完全レンズはその条件からのずれに対してはなほ敏感であることが指摘されている。損失を0にして完全レンズを実現するために、光学利得を導入することが提案されている。完全レンズの条件が満たされていなくてもある程度の解像度は可能であ

り、これをスーパーレンズと呼ぶ。うまくデザインされたメタマテリアルを用いれば、SNOMを並列化して、実時間のサブ波長イメージングが可能となることが期待される。

4.2 準定常極限と銀レンズ

光領域で ϵ と μ を同時に-1にするのは難しい。ペンドリーは問題とする構造のスケールが光の波長よりもずっと小さければ、p偏光の透過率は透磁率は無関係となり、誘電率の条件 $\epsilon=-1$ のみが有効となることを指摘した。すなわちただの金属が完全レンズの代役となる。誘電率の虚部が小さいほうがよいので、銀がよい候補となる。銀レンズがないと識別できないダブルスリットパターンが、銀の平板を挿入すると識別できるようになる。シャン・チャン(Xiang Zhang; 張翔)らは実際に銀の薄膜を用いてサブ波長の分解能が可能であることを実験的に示している²²⁾。

5 短波長化に関する話題

5.1 SRRの変形による短波長化

サブ波長分解能を実現する完全レンズの議論はマイクロ波領域よりも波長の短い可視光領域での利用価値が高い。そこでより短い波長で負の屈折を実現することに対する競走が生じた。テラヘルツでも分割リングが働くことは2004年に確認された²³⁾。しかし分割リングと細線の組み合わせをスケールダウンするだけでは光領域の負の屈折の実現は難しいであろうと議論された。周波数が高くなるにつれ金属は完全導体ではなくなり、電場が金属中に侵入するため損失が大きくなるからである。

河田らは可視光領域におけるSRRの応答を計算し、銀のSRRであれば実現可能であると論じた²⁴⁾。シャラエフらは分割リングを最大限に抽象化した金属板片を誘電体で挟んでならべた構造において近赤外での透磁率共鳴、負の屈折の実現に成功した²⁵⁾。リンデンらは同じ構造で測定を行い、負の屈折を実現した²⁶⁾。一方、シュアン・チャン(Shuang Zhang; 張霜)らは図5に示すような金属誘電体金属の3層構造に光干渉リソグラフィで正方配列の孔をあけた構造(ダブルフィッシュネット構造)で負の屈折率を報告した²⁷⁾。図の破線部分が磁場に、黒い部分が電場に応答する。この構造は金属/誘電体/金属の

サンドイッチ構造とバビネ相反の関係にある。ドリリングらは実質的に同じ構造で性能係数(屈折率の虚部に対する実部の比)が3の共鳴を報告した²⁸⁾。さらに2007年になって、目に見える780nmの光での負の屈折を報告した²⁹⁾。短波長化が可能となった理由は構造の単純化、損失の少ない銀の使用、デザインの最適化にある。磁気的な応答のみに限れば様々な可視光領域で共鳴がすでに実現している³⁰⁾。

5.2 薄膜試料における誘電率、透磁率の抽出

光領域では3次元的な構造を作製するのが極めて困難であるので、負の屈折率は間接的な方法で確認せざるを得ない。スミス、スクリス(Soukoulis)らは実験的に複素透過率と複素反射率を実験的に測定することで、有効誘電率と有効透磁率を決定する手続きを見出した³¹⁾。与えられた構造に対して転

送行列を用いると複素透過率 \tilde{t} と複素反射率 \tilde{r} が得られる。これを再現するような様な有効媒質があったとして、その誘電率と透磁率を決定するという考え方である。垂直入射におけるFresnel方程式は複素屈折率と複素インピーダンスについて解くことができ、

$$\tilde{n} = \pm \cos^{-1} \left(\frac{1 - \tilde{r}^2 - \tilde{t}^2}{2\tilde{t}} \right)$$

$$\tilde{Z} = \pm \left(\frac{(1 + \tilde{r})^2 - \tilde{t}^2}{(1 - \tilde{r})^2 - \tilde{t}^2} \right)^{1/2}$$

となる。複号は $\text{Im} \tilde{n} > 0, \text{Re} \tilde{Z} > 0$ となるように

選ぶ。その上で $\tilde{n} = \sqrt{\tilde{\epsilon}\tilde{\mu}}$, $\tilde{Z} = \sqrt{\frac{\tilde{\mu}}{\tilde{\epsilon}}}$ の関係を使っ

て有効誘電率と有効透磁率を求めることができる。マイクロ波領域ではベクトルネットワークアナライザによって波の振幅と位相が複素Sパラメタという形で直接的に求められる。テラヘルツ波領域ではフェムト秒レーザーを用いた時間分解分光法で複素光学定数を求めることができる。光領域ではマッハツェンダー干渉計やマイケルソン干渉計を用いて複素光学定数が求められている^{32,33)}。

5.3 光領域のs偏光ブリュースター現象

p偏光の光に対してある角度で反射率が0になるブリュースター現象は光物性の研究者にはおなじみであろう。この現象がp偏光のみに対して起こる非対称性は光領域において透磁率が1であって、磁気的な応答がないからである。s偏光でブリュースター現象を実現できるデモンストレーションは京大の北野のグループで分割リングメタマテリアルを用いてマイクロ波領域で行われた³⁴⁾。最近われわれのグループで光領域のs偏光ブリュースター現象を実現することに成功した³⁵⁾ので、簡単に紹介する。

光領域で磁気的な応答が存在することはすでに微小金属板対によって実現しているが、我々は単純な金属誘電体の多層膜が適当な構造パラメタで磁気的な応答を示すことを利用した。30nmの銀と60nmのアルミナからなる多層膜に対して転送行列法を用いて反射スペクトルを計算するとある角度で0となるのがわかる。これが有効透磁率の発現によるものであることを予想して、我々は垂直入射に対して定式化された電磁場サンプリングの方法を斜入射の場合に拡張し、確かに有効透磁率が1から顕著に外れていること、その透磁率を用いてs偏光ブリュースター現象が再現できることを見出した。一方、実際に多層膜試料をスパッタリングで作製し、実験で測定された反射スペクトルが計算でよく再現できることを確かめた。

6 興味深い新概念

メタマテリアルを用いて誘電率と透磁率の空間分布を独立に制御すると波動インピーダンスを一定に保ったまま、屈折率の分布を変えることができる。このことを利用してある領域の周りを光が迂回するようにデザインすることができる。これをクロッキング(隠れ蓑)装置と呼び、すでにマイクロ波領域で実証されている³⁶⁾。このようなことが可視光全域に対して成り立てばハリポッターの魔法のマントが実現することになるが、そのような広い帯域で負の屈折を実現するめどは今のところ立っていない。携帯電話の帯域に対してクロッキングを行えば、新しいビルが次々に建設される大都会においても電波障害に悩まされることがなくなるかもしれない。一方、非等方的なメタマテリアルによって近

接場を伝搬波に変換する技術も開発された³⁷⁾。このようなものをハイパーレンズと呼び、今後の発展が期待される。

8 今後の展望

最初メタマテリアルが誕生して8年。当初はまだまだ先のことと思われていた可視光の負の屈折も現実のものとなってきた。

光物性の研究対象としてのメタマテリアルの面白さは種々の状況を自由に設計できるところにある。光物性はこれまでも様々な新物質を開拓して興味深い物理を研究してきた。しかし、化学的手法による化合物合成では必然的に基底状態が安定な物質しか手に入れられない。一方、メタマテリアルでは構造の安定性を決めているものと構造体の配置は独立に決められる。このことが「メタマテリアルは自然界に存在しない」と定義されること理由である。そのような配置をもたらすのは自由エネルギー最低の条件ではなく、我々が考えるデザインなのである。

現在のメタマテリアルは比較的単純な分布型LC共振回路に他ならないが、電子回路がさまざまな機能をもつように、メタマテリアルのデザインも無限の可能性をもつ。今後もますます新しい物理的な状況を提供することで、物理を発展させてくれるものと期待している。

文 献

- 1) S.A. Ramakrishna: "Physics of negative refractive index materials," Rep. Prog. Phys. **68**, (2005)449.
- 2) V. G. Veselago: "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," Soviet Physics USPEKHI, **10**(1968)509.
- 3) S.A. Ramakrishna and O.J.F. Martin: cond-mat/0402570 (2004).
- 4) J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, I. Youngs: "Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures," Phys. Rev. Lett., Vol. **76**, (1996) 4773.
- 5) J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, and W.J. Stewart : "Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena," IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., **47**(1999)2075.
- 6) D.R. Smith and J.B. Pendry: "Homogenization of metamaterials by field averaging," J. Opt. Soc. Am. **B23** (2006)391.
- 7) L.D.ランダウ、V.M.リフシツ「連続媒質の電気力学2」(東京図書, 1983)。
- 8) R. Marques, F. Medina, R. Rafii-El-Idrissi, "Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials," Phys. Rev. **B 65** (2002) 144440.
- 9) D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz : "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," Phys. Rev. Lett., **84** (2000) 4184.
- 10) R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz: "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction", Science, **292**(2001) 77.
- 11) C. G. Parazzoli, R. B. Gregor, K. Li, B. E. C. Koltenbah, and M. Tanielian : "Experimental Verification and Simulation of Negative Index of Refraction Using Snell's Law," Phys. Rev. Lett. **90** (2003)107401.
- 12) H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Sato, and S. Kawakami: "Super-prism effect in photonic crystals," Phys. Rev. **B 58** (1998) R10096.
- 13) M. Notomi, "Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap, " Phys. Rev. **B62** (2000) 10696.
- 14) H. Lezec and H. Atwater, "How to drive light round the wrong bend," Nature (2007).
- 15) P. M. Valanju, R. M. Walser and A. P. Valanju : "Wave refraction in negative-index media: Always positive and very inhomogeneous," Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 187401.
- 16) D.R. Smith, D. Schurig and J.B. Pendry, "Negative refraction of modulated electromagnetic waves," Appl. Phys. Lett. **81**(2002)2713.

- 17) S. Foteinopoulou, E. N. Economou, and C. M. Soukoulis, "Refraction in Media with a Negative Refractive Index," *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 107402.
- 18) L. Liu, C. Caloz, C. Chang, T. Itoh: "Forward coupling phenomena between artificial left-handed transmission lines, " *J. Appl. Phys.* **92** (2002) 5560.
- 19) A. Grbic and G.V. Eleftheriades, "Experimental verification of backward-wave radiation from a negative refractive index metamaterial." *J. Appl. Phys.* **92** (2002) 5930.
- 20) A. Sanada, C. Caloz and T. Itoh, "Planar Distributed Structures With Negative Refractive Index," *IEEE Trans. Microwave Theo. and Tech.* **52** (2004)1252.
- 21) J.B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," *Phys. Rev. Lett.*, **85** (2000) 3966.
- 22) N. Fang, H. Lee, C. Sun and X. Zhang, "Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens", *Science* **308**(2005)534.
- 23) T.J. Yen, W.J. Padilla, N. Fang, D.C. Vier, D.R. Smith, J.B. Pendry, D.N. Basov and X. Zhang: "Terahertz Magnetic Response from Artificial Materials" *SCIENCE* **303** (2004)1494.
- 24) A. Ishikawa, T. Tanaka, and S. Kawata, "Negative Magnetic Permeability in the Visible Light Region," *Physical Review Letters* **95**(2005) 237401.
- 25) V. M. Shalaev, W. S. Cai, U. K. Chettiar, H. K. Yuan, A. K. Sarychev, V. P. Drachev, and A. V. Kildishev, "Negative index of refraction in optical metamaterials," *Optics Letters* **30**, 3356 (2005).
- 26) S. Linden, C. Enkrich, G. Dolling, M.W. Klein, J. Zhou, T. Koschny, C.M. Soukoulis, S. Burger, F. Schmidt and M. Wegener: "Photonic Metamaterials: Magnetism at Optical Frequencies," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics* **12** (2006)1097.
- 27) S. Zhang, W. J. Fan, N. C. Panoiu, K. J. Malloy, R. M. Osgood, and S. R. J. Brueck: "Experimental demonstration of near-infrared negative-index metamaterials," *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 137404.
- 28) G. Dolling, C. Enkrich, and M. Wegener C. M. Soukoulis and S. Linden: "Low-loss negative-index metamaterial at telecommunication wavelengths," *OPTICS LETTERS* **31** (2006) 1800.
- 29) G. Dolling, M. Wegener, C. M. Soukoulis, and S. Linden, "Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength," *Optics Letters* **32**, 53 (2007).
- 30) W. Cai, U.K. Chettiar, H. Yuan, V. C. de Silva, A. V. Kildishev, V. P. Drachev, and V. M. Shalaev: "Metamagnetics with rainbow colors" *OPTICS EXPRESS* **15** (2007) 3333.
- 31) D. R. Smith, S. Schultz, P. Markos and C. M. Soukoulis : "Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients, " *Phys. Rev.* **B65** (2002)195104.
- 32) V.P. Drachev, W. Cai, U. Chettiar, H.-K. Yuan, A.K. Sarychev, A.V. Kildishev, G. Klimeck, and V.M. Shalaev: "Experimental verification of an optical negative-index material," *Laser Phys. Lett.* **3** (2006) 49.
- 33) G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener, C. M. Soukoulis, and S. Linden: "Simultaneous negative phase and group velocity of light in a metamaterial," *Science* **312**, 892-894 (2006).
- 34) Y. Tamayama, T. Nakanishi, N. K. Sugiyama, and M. Kitano, "Observation of Brewster's effect for transverse-electric electromagnetic waves in metamaterials: Experiment and theory," *Physical Review B* **73**, 193104:1-4(2006).
- 35) Ryosuke Watanabe, Masanobu Iwanaga and Teruya Ishihara, "s-polarization Brewster's angle of stratified metal-dielectric metamaterial in optical regime," *physica status solidi (b)* **245**, 2696 (2008)..
- 36) D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies," *Science* **314**, 977-980 (2006).
- 37) Z. Liu, H. Lee, Y. Xiong, C. Sun and X. Zhang, "Far-Field Optical Hyperlens Magnifying Sub-Diffraction-Limited Objects," *Science* **315**, 1686 (2007).