

＜研究紹介・自己紹介＞

研究項目 A02: 計画研究力

「プラズモン共鳴型光波メタマテリアル表面の創製技術の開発」

研究分担者 岩長祐伸（物質・材料研究機構）

＜自己紹介に代えて 一新学術研究のなかの役割＞

新学術領域研究の計画研究で光周波数におけるプラズモン共鳴をもつメタマテリアル表面の研究に参画しています。研究課題名は実証主義的な色彩が濃く、物材機構のナノ加工技術を生かす立場を鮮明に示したものと見えます。

表面と言えるくらい“浅い”構造においても特徴的な共鳴状態を発現するプラズモン共鳴を切り口に特徴ある光（電磁波）の状態を実現すること、および、その光を使うことではじめて可能になる現象の開拓が主たる課題となると、個人的に理解しつつ、ナノ加工技術のその先にあるものを開拓する部分が私の連携内容となりそうだと思います。

本新学術研究領域はマイクロ波から光周波数まで広範な研究者が集っておりますので、周波数軸の広がり度で光において設計されたデザインがマイクロ波でも使われるようなことがあれば望外の喜びです。スプリットリング共振器がマイクロ波から光にアイデア供給されたことはメタマテリアル分野の研究者には周知のことですが、逆のことがこの研究領域で起こることを期待もしておりますし、その一翼を担うことも目指したいと考えています。

当計画研究班で目下遂行中の研究内容については同じ班のほかの方々から紹介されるものと思われるので、以下ではここ数年のメタマテリアル関連の研究結果について述べながら、メタマテリアル研究の特徴にも触れようと思います。

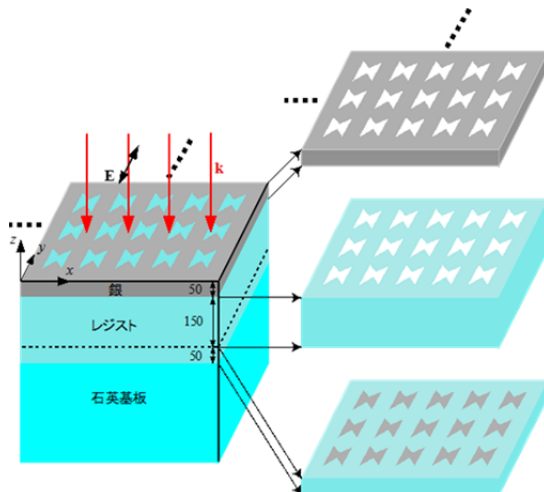


図1 相補的積層構造の概念図。孔の空いた金属膜（上層）と金属ナノ構造配列（下層）が近接場を介して結合し、異方的な局在プラズモン共鳴を生じる。蝶型の配列周期は 1000 nm であり、上中下層の厚さはそれぞれ 50, 150, 50 nm である。単位構造の寸法については [1] 参照。

<研究紹介>

私がここ数年で行った研究は「光波操作素子の極小化」、「プラズモニック結晶の固有状態の解明」と大別できます。

光波操作素子とは偏光子や波長板、円二色性素子などのことで、平面波の偏光ベクトルと位相を操作する際にその効率を最も高める構造を導入することでサイズ（厚み）を極小化することができることを示しました。

図1は実際に作製した相補的積層構造と呼んでいる3層1セットの積層構造の模式図で、この構造はサブ波長の厚さで偏光子として機能します。相補的な積層は偏光選択性を向上するのに有利な構造であることはバビネの原理を使って示すことができます。実際、波長 1650 nm で 10^3 より大きな消光比を実現しました。金属（銀）と透明誘電体（ここではレジストと石英基板、いずれも近赤外光域で誘電率 1.5 程度）からなり、レジストに孔の空いた中間層の厚さを 150 nm 程度にすると上下層のプラズモニック電磁場が最も効果的に近接場結合して一つの局在プラズモン共鳴を形成します[2]。そのサブ波長空間における電磁ダイナミクスはプラズモン共鳴の自由度の大きさを示唆して興味深いですが、長くなるので詳細な説明は文献に譲ります（日本語では[3]）。

偏光子の他にも波長の3分の1以下の薄さをもつ波長板の具体的な設計[4]、波長よりも薄い円二色性素子の設計[5]など光波操作素子の系統的な極小化が可能であることを示しました。既存の固体材料の研削、貼り合わせなどでは到底達成できない薄さであり、メタマテリアル（“超”物質）と呼ぶに値する機能だと考えています。

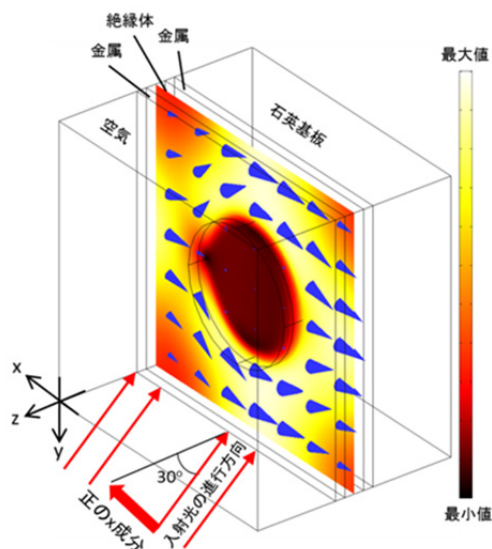


図2 フィッシュネット・メタマテリアルの最低次の TM 固有状態の電磁エネルギー密度流（ポインティングベクトル）の計算結果。入射光の面内波数ベクトル成分と逆向きの流れが励起されていることが分かる。図では単位ドメインを示している。

もう一つの研究群では、金属ナノ周期構造体であるメタマテリアルをプラズモニック結晶と素直に理解して、その固有状態を直接的に明らかにすることを行っています。先述の相補的積層構造の固有状態解明[6]に続いて、フィッシュネット・メタマテリアルの固有状態を明らかにし[7]、最近では円環孔アレーからなるプラズモニック結晶の固有状態も最近報告しました[8]。

フィッシュネット・メタマテリアルは光周波数で最も成功したメタマテリアルと言ってよく、有効屈折率が負の値をとることがよく知られています。この負の有効屈折率に対応する固有状態はこれまで未解明でしたが、分散関係の解析と固有電磁場を直接的に計算することによって、面内で負の群速度をもつ状態であることを示しました。これにより、斜め入射下の負の屈折現象が生じる起源を知ることができました。図2はその様子を示しています。数値計算の方法としては有限要素法を用い、マクスウェル方程式を空間座標で直接解いた結果です。このように、近似的なモデルや概念（有効屈折率など）はメタマテリアル研究のなかに必要なものではなく、直接的に第一原理計算（電磁気学においてはマクスウェル方程式を直接的に解くこと）を実施し、解析結果を吟味することが今後の本流になるものと考えています。

メタマテリアル研究の特徴として、移り変わりの早さが挙げられます。一例として、ヨーロッパのメタマテリアル会議（Metamaterials 20XX シリーズ）では 2007 年当時は負の有効屈折率が盛んに扱われましたが、2009 年ではクロッキングに置き換わり、2011 年では話題が応用も含めて多方面に広がっていました。いまや負の有効屈折率に関する発表を聞くこと自体が珍しいといった具合です。本新学術領域研究の成果としてこの先何が現れてくるか、私としても楽しみにしながら研究に参画している次第です。

参考文献

- [1] M. Iwanaga, Appl. Phys. Lett. **96**, 083106 (2010).
 - [2] M. Iwanaga, Opt. Express **18**, 15389 (2010).
 - [3] 岩長祐伸, 「プラズモニクス—光・電子デバイス開発最前線」(エヌ・ティー・エス刊, 2011) p. 37-51.
 - [4] M. Iwanaga, Appl. Phys. Lett. **92**, 153102 (2008).
-



- [5] M. Iwanaga, “Collective Plasmonic States Emerged in Metallic Nanorod Array and Their Application,” in *Nanorods (InTech, Rijeka, to appear in Feb. 2012)*.
- [6] M. Iwanaga, *Phys. Rev. B* **82**, 155402 (2010).
- [7] M. Iwanaga, *Opt. Lett.* **36**, 2504 (2011).
- [8] M. Iwanaga, N. Ikeda, and Y. Sugimoto, *Phys. Rev. B* **85**, 045427 (2012).