

＜研究紹介＞

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」

研究代表者 迫田 和彰(物質・材料研究機構)

研究代表以外のメンバーは、杉本喜正(物質・材料研究機構)、宮崎英樹(同)、岩長祐伸(同)、岡本敏弘(徳島大学)、田丸博晴(東京大学)です。

計画研究力では、極微プラズモン共振器の2次元配列を基礎とした、メタマテリアル表面(以下、メタ表面と略記)の作製技術の開発と機能化を行います。この研究の基礎となる極微プラズモン共振器は、宮崎英樹さんの開発によるものです。

プラズモン共振器の機能実証のために、宮崎さんは最初、FIB(収束イオンビーム)加工で試料を作製しました。図1に電子顕微鏡写真を示します。基板上に真空蒸着とスパッタリングで作製した金とSiO₂の3層構造について、FIBで前後を切り落とすことで開口部をもつプラズモン共振器が作製できます。SiO₂層の厚み(T)は最小で3nm、奥行き(L)の代表的な値は数十 nm です。図2は共同研究者の黒川要一さんが境界要素法で計算した電磁界分布で、金属層に挟まれた SiO₂ 層に電磁界が凝縮されていることがわかります。反射スペクトルの実測値と計算値もよく一致し、わずか 3nm 厚で奥行きが数十 nm の SiO₂ 層に、波長 651nm の赤色光を表面プラズモンの形で閉じ込め得ることが実証されました。

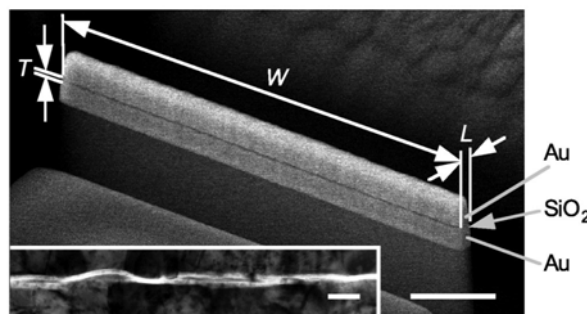


図1 極微プラズモン共振器のSEM像

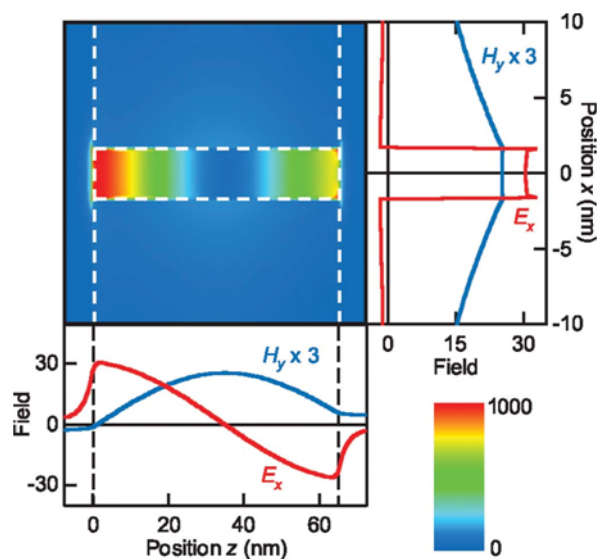


図2 プラズモン共振器中の電磁界分布

宮崎さんは研究の第2段階として、トレンチ型MIM共振器(基板表面に開口部をもつプラズモン共振器、MIMは metal-insulator-metal の略)の2次元配列を作製しました。図3に示すように、エッチングでSi基板に凹凸を作製して、

金を真空蒸着した後、エポキシ樹脂に転写し、最後に基板をアルカリで除去することで、数百 nm 幅の空気ギャップをもつトレンチ型MIM共振器を作製しました。基板のエッチングは任意のパ

ターンで行うことができるので、例えば、図3の右下に示すような溝の方向が互いに直交し、溝間の間隔が異なる2種類のMIM共振器列をチェッカーボードのように配列することができます。共振器に共鳴するプラズモンモードは溝に垂直に偏光しているので、このようなチェッカーボード構造は偏光と波長の異なる2種類のプラズモンモードと共鳴します。それで、試料を熱して赤外光を発生させると、2つのプラズモンモードに対応して、偏光の異なる2つの発光ピークをもつユニークな赤外光源が得られ、2成分の混合試料の組成分析などへの応用が期待されます。

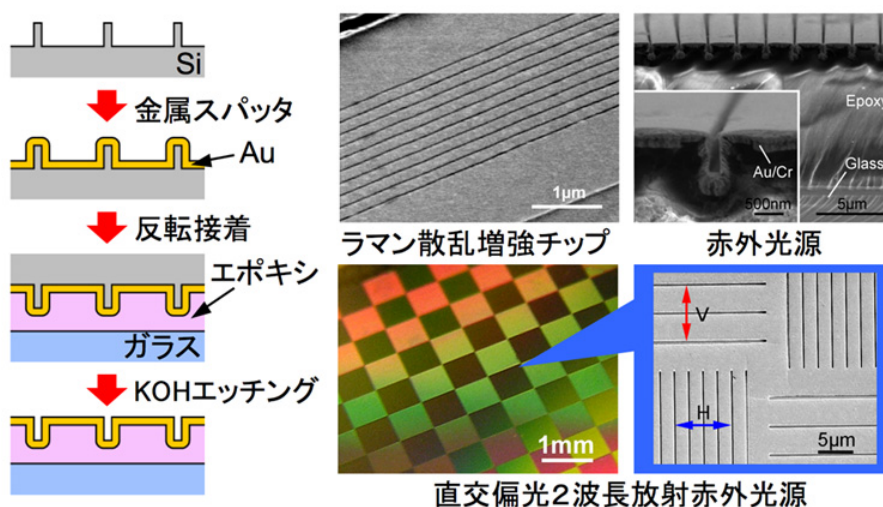


図3 トレンチ型MIM共振器の作製方法と応用例

このようなトレンチ型MIM共振器の二次元配列は赤外発光以外にも、プラズモン共鳴に由来する電磁界の閉じ込めや局所電場の増強、線形および非線形光学過程の増強効果、特異な分散関係による負の屈折現象等、ユニークな特性の発現が期待されます。そこで、計画研究力ではトレンチ型MIM共振器の二次元配列をメタ表面と呼び、試料設計と特性評価を通じて新規デバイスのプロトタイプの実現を目指して研究を行います。

試料設計については、時間領域差分法(FDTD法)、有限要素法、境界要素法、厳密結合波解析(RCWA法)などの数値解析法を対象に応じて使い分けます。これと並行して、光の分散関係や回折強度などを定性的、ないし、半定量的に理解するための解析的手法を開発します。具体的には、単位構造に立つ共鳴モードの数値解を基底関数として、強束縛近似によるモード解析を行います。

メタマテリアルは従来、負の実効的屈折率による光学特性の解釈とデバイス設計が行われてきました。このような解釈は新現象を予測したり、研究を見通し良く行うために有効ですが、いつもこのような解釈を行う必要はありません。たとえば、負の屈折について言えばメタマテリアルに限らず、従来から知られているフォトニック結晶の分散関係を利用しても容易に実現でき、現象を基礎から

説明するのはむしろ光の分散関係です。また、空間的に平均値を取った実効的屈折率による解釈では、メタマテリアルが実際には離散的な構造物の集積体であって、近接場については波面が大きく乱れていることが考慮されていません。このことは現実のデバイスではたいへん重要な因子であり、実効的屈折率のような便宜的な手法に依らないデバイス設計が要求されます。

メタマテリアルでは単位構造の電磁共鳴が負の実効的透磁率の実現などに利用されます。このような共鳴モードは概ね単位構造に局在していますので、これを強束縛近似の基底として利用すれば、比較的高精度で分散関係などが解析的に算出できると期待されます。図4は、単位構造の1次元配列について、2つの共鳴モードが偶然縮退するとき波数空間の原点(Γ 点)で線形の分散関係が実現できる様子を示した強束縛近似による計算結果です。BO(Band offset)は Γ 点での2つの分散曲線の周波数差です。ここで重要な因子は2つのモードの対称性であり、 Γ 点では交差、それ以外の点では反交差する対称性の組合せにより、BOがゼロの時に Γ 点近傍で線形な分

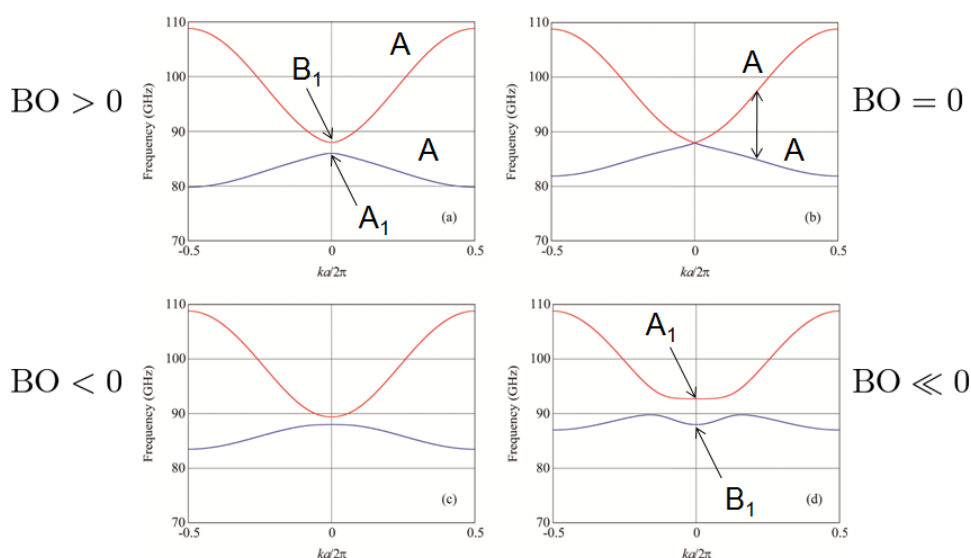


図4 偶然縮退による線形の分散関係 (ディラックフォトン)

散関係が実現できます。

このような強束縛近似による解析計算は2次元配列や3次元配列にも拡張できます。高次元では偶然縮退ではなく、対称性により必然的に縮退するモードも利用できるのです。さらに多彩な分散関係が実現でき、このような知見をメタ表面によるデバイス開発へ応用します。