



<研究紹介・自己紹介>

研究項目 A01: 計画研究ウ

「構造共鳴を利用したマイクロ波の偏光及び伝播制御」

研究分担者 中西 俊博 (京都大学)

研究項目 A01 研究計画ウ「構造共鳴を利用したマイクロ波の偏光及び伝播制御」の分担研究者の中西俊博です。私の自己紹介並びに研究略歴と現在メタマテリアルに関して行っている研究について紹介させていただきます。

私は、学部生の4回生より、京都大学工学研究科電子工学専攻量子電磁分野に所属し、北野正雄先生の指導の下に研究を行ってきました。研究室は私の配属した当時は、メタマテリアルの研究は行っておらず、量子エレクトロニクスという分野で、光と物質の相互作用や量子力学の基礎的現象を研究していました。私も、学部から修士課程にかけて、原子のスピン制御に現れる量子 Zeno 効果について研究を行っていました。量子 Zeno 効果とは、量子状態を観測することによって生じるデコヒーレンスが量子状態の時間発展を止めるという現象を指します。一見、この現象は純粋に量子的な現象であって、古典系では現れないと思われま。しかし、結合共振回路のような古典系の結合共振器間のエネルギーのやり取りにおいても、量子 Zeno 効果のアナログが存在することを研究の中で知りました。このように、原子系で起こる現象を回路で表現することは、今思えばメタマテリアル研究の第一歩であったのだと思います。

その後は、光の量子性を研究する量子光学の研究として、光子対の生成とその2光子干渉の研究を中心に行ってきましたが、その傍ら、電磁波動伝播の群速度制御についても研究を行っていました。その一つが、当時物議を醸していた光速を越える群速度伝播現象を回路で実現するというものでした。回路は「おもちゃ」といってよいような非常に簡単なものですが、入力を入れる前に波形を保ったまま出力されるという直感に反する現象を引き起こします。この現象も、光領域で行われた複雑な物理現象のエッセンスだけを抽出して回路化するという点で、メタマテリアルの考え方につながっていると思います。逆に、光の群速度を減速する方法についても、回路アナログを提案し実験での実証も行いました。以上の、光の異常群速度伝播の回路モデルは、変調波をもたないベースバンド信号に対して動作しますが、言い方を換えれば直流を含むような非常に波長の長い電磁波に対する、メタマテリアルと言うこともできます。

以上のように、これまでは、本物の原子やその量子状態を対象に研究を行ってきました。それと同時に、量子系や波動伝播の回路シミュレーションについても研究を行ってきました。このような背景が、人工原子で波動伝播を制御するメタマテリアルの研究へとつながっていきました。次に、現在私が主に研究しているメタマテリアルの研究のうち主なもの2つを紹介します。

(a) 結合共振メタマテリアルを用いた群速度制御

群速度を制御する方法として原子系でよく知られているのが電磁誘起透明化現象 (Electromagnetically Induced Transparency, 以降 EIT 現象) です。EIT 現象とは、本来不透明な媒質に補助的な光 (コントロール光) を入射することで、媒質が透明になる現象を指します。この透明化は、非常に狭い周波数帯域で起こり、その透明化領域でパルスの伝搬速度である群速度が非常に小さくなります。この現象は、3 準位と 2 つの光の量子的な干渉効果によって引き起こされるものですが、波動的な性質のみを利用しているため、同種の現象が電子回路という古典系でも実現できることが報告されていました。

最近この回路モデルをメタマテリアルで実現することにより、メタマテリアル中の電磁波の群速度を低減できることが注目されています。人工的な原子であるメタマテリアルを用いることで、任意の波長帯で群速度制御を実現することができます。このような、EIT 現象を模擬するメタマテリアル(EIT メタマテリアル)は、図 1 のような低 Q 値の共振構造と高 Q 値の共振構造の

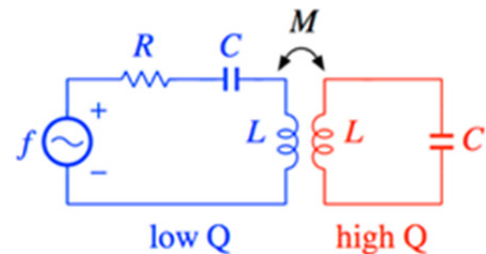


図 1 EIT 現象の回路モデル

結合で実現することができます。EIT メタマテリアルにおいて、外部電磁場によって直接励振されるのは低 Q 値共振構造ですが、結合によって高 Q 値共振構造にエネルギーが移ることで、電磁場の吸収が非常に小さくなります。また、透明化帯域は結合の強さに比例して広くなり、結合の大きさを制御することで、電磁波の群速度を制御することが可能となります。現在、EIT メタマテリアルの群速度の動的制御と、非線形相互作用の増大について研究を行っています。

(b) 二重共振メタマテリアルを用いた第二次高調波の増大

共振型メタマテリアルにおいて、共振による電磁場の集中が起こることから、その場の集中した部分に非線形要素を導入することで非線形効果が増強されます。これまで、単一共振構造をもつメタマテリアルにおける第二次高調波の発生が研究されてきました。それに対して、基本波に共振する共振構造と第二次高調波に共振する共振構造をもつメタマテリアル（二重共振メタマテリアル）を用いることで、従来の単一共振構造しかもたないメタマテリアルより効率的に第二次高調波を発生できることに注目して研究を行っています。

二重共振メタマテリアルの最初の研究として、図 2 のようなメタマテリアルを研究をしました。図 2(a) がユニットセル、(b) が一次側共振器、(c) が二次側共振器を示しています。一次側共振器には I 型のパターンに非線形容量をもつ素子としてショットキーダイオード(Rohm RB886G)が挿入されています。二次側共振器は少し短い金属ワイヤ構造で、一次側共振器の共振周波数の 2 倍の周波数で共振するように設計されています。この 2 つの共振構造が近くに配置されることで磁気的な結合が生じます。ここに、一次側共振器に共振する電磁波が入射したとき、ダイオードの非線形性と共振電流により、第二次高調波が発生します。発生した第二次高調波は磁気的な結合を通して、二次側共振器に移り、共振電流を流すことで、強い第二次高調波が外部へと放射されます。この実験によって、単一共振メタマテリアルの約 5 倍の第二次高調波発生を実現しました。現在、第二次高調波発生の効率をさらに向上する方法について研究を行っています。

以上の二つの研究は、いずれも結合共振器を基本とするメタマテリアルに関する研究です。これまでのメタマテリアルの研究は単一共振構造からなるものが多く、これは単一の機能を持つ「メタ原子」ということができます。ここに、複数の共振構造を結合させることで、「メタ原子」間に結合を導入することができ、人工的な分子「メタ分子」を作ることができます。さらに、共振

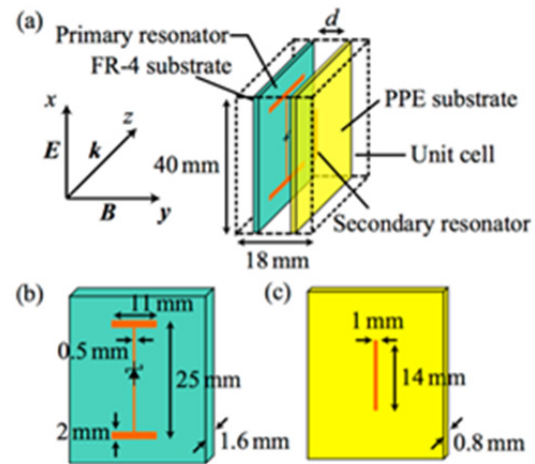


図2 (a) ユニットセル (b) 一次側共振器 (c) 二次側共振器の構造



器構造をネットワーク状に配置することで「メタ固体」も実現することができます。このような、「メタ分子」や「メタ固体」といった新たな概念を利用することで、より多様な特性を実現できると期待して研究を行っています。

