

時間変調磁性メタマテリアルの実現に向けて

東北大学 高度教養教育・学生支援機構
児玉俊之

東北大学 高度教養教育・学生支援機構
兼 大学院理学研究科物理学専攻
富田知志

1. はじめに

メタマテリアルは波長よりも十分小さな人工構造（メタ原子）から構成される人工物質である。人工構造を上手く設計し、作製することで、誘電率（ ϵ ）や透磁率（ μ ）を自在に制御できることから注目を集めている。最も有名なメタマテリアルとしては、負の屈折率媒質¹⁾や透明マント²⁾があり、マイクロ波領域で実証されている。これらのメタマテリアルは屈折率を空間的に変化させているので、空間変調メタマテリアルと呼ぶことができる。これに対して最近、時間領域で屈折率を変化させる時間変調メタマテリアルが提案されている³⁾。屈折率の空間領域での界面（空間壁）では電磁波の波数に変化する。一方で、時間領域での界面（時間壁）では周波数に変化する。時間壁を用いた時間変調メタマテリアルの出現は、電磁波操作の新たなパラダイムとして盛んに研究が進められている。数ある時間変調の話題の中でも本稿では周波数変換デバイスへの応用の可能性に焦点を当てる。

ある周波数で屈折率が変調された時間変調メタマテリアルでは、入射電磁波の一部は屈折率変調周波数を足し引きした周波数に変換される。これは通信分野での FM/AM 変調や、光通信分野での電気光学変調器に見られるサイドバンドの発生として解釈できる。簡単のため周波数 ω で屈折率の実部が時間変化する時間変調メタマテリアルを考える。入射する電磁波を $\exp(j\Omega t)$ で表すと、時間変調メタマテリアルを透過した電磁波は位相変調を受け、 $\exp(j\Omega t + jA\sin\omega t)$ と表される。定数 A は変調指数と呼ばれる。この式は Bessel 関数型をしており、周波数領域で見ると Ω , $\Omega \pm \omega$, $\Omega \pm 2\omega$, \dots の波が存在していることになる。固体物理での物質の格子振動に起因するラマン散乱と似た描像である。

ではそもそもどのようにして屈折率の時間変調を実現するのか？実は屈折率時間変調の話題は電気光学効果や可変キャパシタンスなど古くからある。最近ではイプシロンニアゼロ材料での光誘起キャリア^{4,5)}、プラズマミラー⁶⁾、フォトリソニック結晶キャビティ⁷⁾、導波路の分散スイッチング⁸⁾、微小電気機械システム (MEMS) による機械的な構造変形⁹⁾などが提案されている。これらの手法は全て ϵ 変調を介して屈折率を変調している。時間 t に依存する屈折率は $n(t) = \sqrt{\epsilon(t)}\sqrt{\mu(t)}$ で与えられるので、 μ を変調する時間変調メタマテリアルも当然考えられる。しかしながら μ の時間変調による周波数変換の実験報告はこれまでされていない。

光領域では μ は通常 1 として扱われ、あまり注目されることはない。一方で GHz 帯のマイクロ波領域になると、 μ は電磁波によく応答し 1 以外の値を示す。したがってマイクロ波に対し、GHz の周波数で屈折率を変調させたい場合は、 μ の時間変調が有利であると考えられる。つまりマイクロ波を入力して、数 GHz 間隔でサイドバンドを立てる（あるいは数 GHz のラマンシフトと考えても良い）ことが可能となる。さらにこの変換を複数回繰り返すことで、マイクロ波からの周波数アップコンバージョンによって、ポスト第 5 世代移動通信システムに用いられるミリ波やテラヘルツ光の光源の創出にもつながる。さらに、従来の ϵ の時間変調と同時に μ の時間変調も行うことで、静止した媒質でのフレネ