



Title	ハイパボリックメタマテリアルを用いた光導波路及び光共振器に関する研究
Author(s)	樋口, 舞衣
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/69556
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (樋 口 舞 衣)	
論文題名	ハイパボリックメタマテリアルを用いた光導波路及び光共振器に関する研究
論文内容の要旨 ナノフォトニクスの領域において、波数増大は一つの重要なキーワードである。波数の増大によって、強い局在性や電場増強効果、高い光の状態密度等ナノフォトニクスにとっての強みが発揮されるからである。しかし一般に、誘電体の等周波数面は球や回転楕円体の形状をとり、波数ベクトルはその面上にしか存在できない。すなわち、誘電体では閉じた等周波数面によって波数増大が制限されてしまう。 従来の波数増大の制約を突破するために、本論文ではハイパボリックメタマテリアル(hyperbolic metamaterial: HMM)に着目した。HMMとは波数空間における等周波数面がその名の通り双曲面状(hyperboloid)となるメタマテリアルを指し、その誘電率テンソルの対角成分のうち1つが他の2つと異なる符号をとる。等方的な誘電体の閉じた等周波数面とは異なり、HMMの双曲面状に開いた等周波数面が意味するところは、波数増大に上限がないということである。波数増大によって光の強い閉じ込め効果が得られ、結果として光の回折限界以下の微細構造で光の制御や検出を行うことが可能となる。本研究では誘電体／負誘電体の周期多層膜構造によるHMMに焦点を当て、HMM内の光の挙動及び、外部光に対するHMMの光学応答という二つの側面から系統的に調べた。 まずHMM内の光の挙動については、HMMを用いた光導波路の伝搬モードを解析することで詳細に調べた。HMMの光学応答について議論する際は、有効媒質近似(effective medium approximation: EMA)を用いて周期多層膜を均質媒質とみなし、HMM全体を巨視的に捉えて解析するのが一般的である。しかし、この近似は個々の誘電体／負誘電体界面での表面プラズモンポラリトン(surface plasmon polariton: SPP)の存在を無視しているため、その有効性を検討する必要がある。本論文では、EMAによって得られる近似解を数値計算解と詳細に比較することにより、誘電体／負誘電体界面のSPPによる結合モードの対称性がHMMの伝搬モード特性に大きく寄与していることを示した。さらに、ブロッホの定理を用いた厳密解をEMAによる近似解と比較することにより、周期多層膜HMMのType I 及びType II の特性の起源がSPP結合の対称性によって説明できることを明らかにした。また、EMAの有効性を担保できる範囲についても議論した。 次に、外部光に対するHMMの光学応答については、HMM 光共振器の解析を行った。既に述べた通り、HMM内のモードは非常に大きな波数を有する上に、等周波数面の異方性光学軸方向には波数が存在できない。すなわち、HMM内のモードの外部光による励起を議論するに当たっては、光の入射角や運動量保存の条件を考慮することが重要となる。本研究では、HMMの共振モードと外部光との結合に関して、等周波数面を通して異方性光学軸に対する界面の傾きや入射角への依存性を示した。また、実際に金属や半導体を用いたHMMによる、非常に大きな波数を生かした超小型光共振器や広帯域光吸収体への応用を提案した。最後に、実験的に作製したHMM光共振器について光学応答を調べ、原理実証を行った。 HMMの大きな波数や光学的異方性などの特異な特性によって、高感度センサーや角度センサー、吸収体、熱輻射光源等の光デバイスへの応用が期待できる。このような光デバイス応用へ向けては、HMMの伝搬モードや光学応答を基礎から理解することが重要であり、本論文で示した理論や結果はHMMの光デバイス応用を大きく前進させるものであると考えられる。	

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (樋口 舞衣)			
論文審査担当者	(職) 氏 名		
	主 査	教授	高原 淳一
	副 査	教授	井上 康志
	副 査	教授	関谷 毅
	副 査	教授	原口 雅宣 (徳島大学 大学院社会産業理工学研究部)

論文審査の結果の要旨

本論文は樋口舞衣氏が大阪大学大学院工学研究科に在籍中に行った研究の成果をまとめたものである。

本論文は序論と 5 つの章および結論から構成されている。序論では本研究の背景と目的に続いて本論文の構成が示されている。1 章では等周波数面の形状が双曲面 (ハイパーボロイド) となり波数空間でオープンになるというハイパボリックメタマテリアル (HMM) の基本的な概念が導入されている。これにより光の回折限界を超える大きな波数を実現できることが説明されている。続いて、一葉性および二葉性双曲面の区別とそれらを実現する具体的なメタマテリアル構造が紹介され、様々な応用の可能性を示している。最後に、研究目的が述べられている。2 章では表面プラズモン、平面型プラズモニク導波路の理論的背景を述べた後、HMM 内部でのポインティングベクトルと後退波について理論的な説明を行っている。3 章は本論文の中心である。有効媒質近似 (EMA) を用いて HMM 導波路のモード解析解と金属・誘電体多層膜に有限要素法を適用して得られた数値厳密解とを比較することにより、EMA では得ることのできない伝搬モードの存在を見出し、EMA の定量性には問題があることを指摘している。この原因が多層膜の各界面を伝搬する表面プラズモンポラリトン (SPP) の結合の偶奇性に起因することを理論的に明らかにしている。さらに、ブロッホ関数による厳密解を用いて等周波数面について議論し、EMA の限界を定量的に評価している。最後に EMA、数値厳密解、ブロッホ関数の結果を統合して、HMM 導波路の伝搬モードにおける統一的な理解を得ている。4 章では 3 章の成果をもとに HMM 光共振器の共振モードを理論的に調べ、ファブリ・ペロー (FP) 共振器モデルの有効性を見出している。5 章は 4 章の成果をもとに、HMM 光共振器を用いた光吸収制御についてシミュレーションと実験を比較している。金とアルミナからなる多層膜に集束イオンビーム加工を行うことにより、実際に HMM 光共振器を作製することに成功し、中赤外域において共振モードのスペクトル観測に成功している。結論では、これらの成果をまとめている。

HMM はスーパーレンズの一種として提案されたハイパーレンズの本質をなす構造であり、超解像イメージングに関して過去に多数の研究が行われてきた。HMM では光の波数が極めて高い状態が実現できるので、ナノフォトニックデバイスへの応用が期待されている。申請者は光エレクトロニクスデバイスの基礎となる光導波路と光共振器について、HMM を用いると何ができるかを理論的に解明したといえる。特に、EMA の適用限界を明らかにし、これまでばらばらに行われていた EMA、数値厳密解、ブロッホ関数の結果をまとめ、統一的な見方を提示したことは高く評価される。さらに、申請者は導波路で得られた知見をベースとして、HMM 光共振器の特性の解明を行った。その結果、共振モードが FP 共振器モデルで良く説明できることをシミュレーションと解析理論により示した。さらに、実験で得られた共振スペクトルは単純な直方体共振器モデルとの差異を示したが、申請者はこれが側壁のテーパ化によるものと予測し、それをシミュレーションにより実証することに成功している。

本成果は HMM から成る光導波路および光共振器の光学特性をシミュレーションのみに頼ることなく解析的理論を併用して系統的に解明するとともに、HMM 光共振器を実際に作製し、その特性を実証したものといえ、プラズモニクスおよびメタマテリアルの発展に大きく貢献している。将来は光エレクトロニクスにおけるデバイス応用が期待される。本成果は応用物理学、特にメタマテリアルの新しい応用の可能性を切り開いた点で高く評価される。よって本論文は、博士論文として価値あるものと認める。