

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：74417

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560057

研究課題名(和文)負の屈折率メタマテリアルによるコヒーレント放射光源研究開発

研究課題名(英文)Research on the coherent radiation source with negative-index meta-material

研究代表者

李 大治 (Li, Dazhi)

公益財団法人レーザー技術総合研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：00373209

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、従来の電子ビーム放射を用いた電磁波放射の手法に、新たに登場したメタマテリアルを導入し、新型光源を開発する基礎研究を行った。小型電磁波放射源における電子ビームと電磁波との相互作用について、従来の理論と異なる物理の本質を正しく反映した厳密な理論を確立した。また、負の屈折率メタマテリアルにおける電磁波の特性を研究して電磁モードの存在条件を解明した。その上で、低エネルギーの電子ビームと相互作用できるような電磁波モードを発見し、外部の反射機構が不要で新型チェレンコフ電磁波放射発振器を提案した。さらに、負の屈折率を有するメタマテリアルを設計した。

研究成果の概要(英文)：We carried out the research on the application of negative-index meta-material in the development of radiation sources with low energy electron beam. A new theory was presented to correctly describe the beam-wave interaction and the process of electromagnetic wave radiation. The theory was used to study the characteristics of electromagnetic wave induced from negative-index meta-material, and we found that some modes are possible to interact with the low energy electron beam. Based on this, a Cherenkov oscillator without external reflectors was studied. Finally, some types of negative-index meta-material were designed.

研究分野：ビーム放射、テラヘルツ工学

キーワード：負の屈折率 電子ビーム メタマテリアル 理論解析 シミュレーション 電磁波放射源

1. 研究開始当初の背景

通常の物質では屈折率は正であり、その中を伝播する電磁波は電場、磁場、波数ベクトル（伝播方向）の方向が右手系の関係になるため右手系物質と呼ばれる。しかし、誘電率と透磁率が共に負の物質は、負の屈折率を有し、その中では電場、磁場、波数ベクトルの方向が左手系の関係を持つため、左手系物質と呼ばれる。このような系は全く新しい光学材料として機能する可能性を秘め、学術的基礎研究が活発に行われ、応用面の研究も展開され始めた。

一方で、小型の電子ビームを用いた電磁波放射装置はマイクロ波からテラヘルツ波までの広い帯域を重要な電磁波放射源として使われている。ところが、電子ビームと従来の誘電体や金属構造との相互作用を利用する電磁波の放射では、発振のための最低限の電流強度（閾値電流）や放射強度に限界がある。電磁波に対する物質の応答は誘電率と透磁率によって表されるが、通常の物質では誘電率と透磁率は共に正であり、この場合屈折率は正となる。しかし、金属を電磁波の周期よりも十分短い周期で加工した人工構造体（メタマテリアル）では、構造をうまく設計すれば、有効誘電率や有効透磁率を同時に負にすることができる。このとき、屈折率は負となり（左手系物質）、従来と異なる相互作用が期待でき、新しい物理メカニズムによる新型電磁波放射源の開発が可能と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、従来の電子ビーム放射を用いた電磁波放射の手法に、新たに登場した左手系メタマテリアルを導入し、新型光源を開発する基礎研究を行う。そのために、①小型電子ビームを用いた電磁波源における、電子ビームと電磁波相互作用のメカニズムを正しく反映できる新理論を構築する。②新理論を用いて左手系メタマテリアルで発生する

様々な電磁特性を解析し、電磁波と電子ビームとの相互作用に有利な特性を探し出す。③それにより、新たな電磁波放射源開発の可能性を探求し、基礎理論と技術の先行研究を行う。

3. 研究の方法

理論解析、**particle-in-cell** シミュレーションの手法で負の屈折率を有する媒質に誘起される電磁波放射の特性を研究する。媒質の中を伝播する電磁波の電場、磁場、反射、回折、屈折などの特徴を明らかにし、メタマテリアルによる電子ビームからの自然的な放射からコヒーレント放射のメカニズムを理論解析する。これを基にして **particle-in-cell** シミュレーションを行い、電子ビームによる電磁波放射の動作機構を検証する。その上で、電磁波放射特性のメタマテリアルの特性依存性を研究し、効率を向上させる実用的な方法を調べ、それらの放射の特徴を比較し、最適な機構を見出し、その利点を高める研究を行う。それにより、放射装置に適用可能な負の屈折率を有すメタマテリアルをデザインし、電磁波の反射、回折、屈折などを **FDTD** シミュレーションの手法で検証する。これは、電子ビームを用いた放射実験の先行研究として重要なことである。

4. 研究成果

4.1 相互作用新理論の構築

表面電磁波を用いたコヒーレントな放射源（スミス・パーセル型やチェレンコフ型など）を開発するには、電子ビームと電磁波との相互作用を効率よく生じさせる必要があり、その放射機構を正しく物理的に表現し、正確な理論の導出が不可欠である。本研究では、電子ビームと周期構造体との相互作用のメカニズムに対する物理的イメージが、従来の理論でのそれと大きく異なる新発想を提案し、それを数学的に表現す

るために、新しい方程式を構築し、物理の本質を正しく反映した厳密な理論システムを確立した。周期構造体グレーティング型放射源を例として新理論の発想を紹介する。

グレーティング表面電磁波の分散曲線とエネルギー流の伝播方式に関して従来の考えを図 1(a)に示す。表面電磁波の分散カー

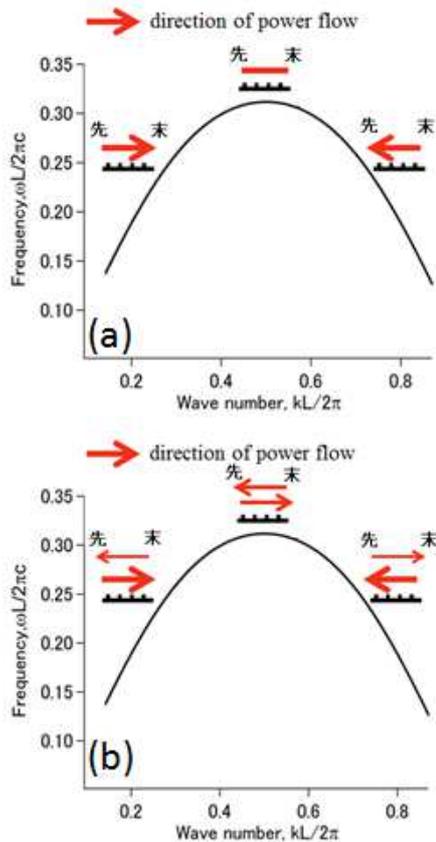


図 1 表面電磁波の分散特徴曲線とエネルギー流の伝播方式の(a)従来理論の考えと(b)新理論の考え

ブを中

心点で分け、左の半分と右の半分の領域で考える。左の半分の領域では、電磁波位相の伝播方向が電磁波エネルギー流の方向と一致しており進行波と呼ばれ、右の半分では方向が逆となるため、後進波と呼ばれる。電子ビームが後進波と相互作用する場合は、電磁波エネルギーがグレーティングの末端から先端へ伝搬するため、自然にフィードバックでき、キャビティを使わなくても発

振が可能となる。共振器として末端に入力がないので、電磁場が末端に存在しないという境界条件が設定されている。一方、電子ビームが進行波と相互作用する場合には、エネルギーが先端から末端に伝搬するため、後進波のような自然なフィードバックが起こらないので、キャビティを使わないと発振できない。しかし、シミュレーションの結果では、進行波の場合でも後進波と同様にキャビティを使わなくても発振が可能となるため、理論結果と一致しない。さらに、中心点では、群速度がゼロになることで、エネルギー流がそこで止まるという怪異な考えになる。図 1(b)に我々の提案するエネルギー流の伝播方式の新発想を示す。従来の理論とは異なり、分散カーブ上のどの位置でも末端向きと先端向きの電磁波が同時に存在するとしている。また、それぞれの電磁波の位相伝搬方向とエネルギー流の伝搬方向は一致している。右半分の領域では、末端向きのエネルギーよりも先端向きのエネルギーが多く、左半分の領域では、逆に先端向きエネルギーよりも末端向きのエネルギーが多い。中心点では、先端向きのエネルギーと末端向きのエネルギーが等しい。このように考えると、従来の理論の中に、位相伝搬方向とエネルギー流伝搬方向とが逆になることや、中心点でエネルギーが止まることなどの異常な概念がなくなる。さらに、左半分でも先端に向かうエネルギーがあるため、右半分と同様に自然なフィードバックがあり、キャビティを使わなくても発振できるため、シミュレーションにより観測される結果と一致する。

本研究ではグレーティングをベースにして放射理論を築くことを目的にしているが、その理論は、例えば、進行波管、後進波管、メタマテリアル新電磁材料などのあらゆる周期構造体と電子ビームとの相互作用に応用できる。

4.2 負の屈折率媒質による電磁モード研究

真空と誘電体との境界面に沿って伝搬する表面電磁波は、チェレンコフ型の電磁波放射源の開発に重要な役割を果たすことはよく知られていることである。一定の速度で誘電体表面を移動する電子ビームは、電子の速度と同期した位相速度を持つ表面電磁波と相互作用し、また、発振条件を満足させれば、電磁波が増幅されて空間に放出される。そのため、表面電磁波の研究は小型の電磁波放射源の開発に重要である。

我々は負の屈折率を有する媒質平板における電磁モードを研究した。無限厚さ、有限厚さ、金属基板付きから構成された三つの媒質平板モデルを解析して、表面電磁モードの存在条件を導出し、その結果を図2に示す。無限厚さの平板においては、正の屈折率の場合には表面電磁モードが存在しないが、負の屈折率の場合には、AとBの領域に存在する可能性が

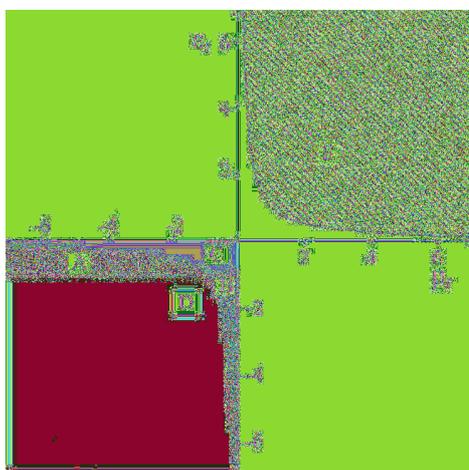


図2 平板モデルにおける電磁モード存在の誘電率と透磁率依存性

ある。有限厚さと金属基板付きの平板においては、正の屈折率の場合には表面電磁モードがEの領域に存在する可能性があり、負の屈折率の場合には、A、B、C、Dの領域、つまり全区域に存在するのが

可能である。境界条件を考慮してマクウェル方程式を解くと、具体的な電磁モードを解出でき、計算の一例とした金属基板付き負の屈折率平板における電磁モードを図3に示す。二つピークはそれぞれ二つ電磁モードを表した。

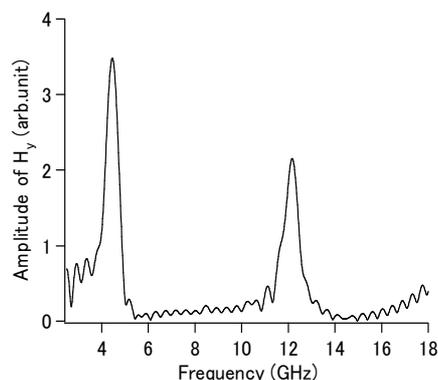


図3 金属基板付き負の屈折率平板における電磁モードの計算例

4.3 新型チェレンコフ放射発振器

従来のチェレンコフ型電磁波放射を利用した発振器では、電子ビームと誘電体表面を伝搬する進行波との相互作用を維持するために、外部の反射機構によるフィードバックが不可欠である。一方、周期的な溝を持つ金属構造体を用いた後進波管型の発振器では、構造体表面を伝搬する後進波を利用するため外部の反射機構が不要となるが、後進波は電子ビームと相互作用した進行波と同時に構造体の表面（構造体外部）を伝搬するためフィードバックが弱く、これが装置の効率を低下させる要因となっている。我々は負の屈折率を持つ媒質表面に存在し、低エネルギーの電子ビームと相互作用できるような電磁波モードを発見した。この電磁波モードは負の屈折率物質に対してのみ現れるモードで、正の屈折率物質に対しては存在しないものである。この電磁波モードの特徴は、従来の誘電体や周期的な溝の構造体などの表面に存在する電磁波モードと異なり、媒質の表面

を進行波のように伝播する一方、媒質内部では後進波のように伝播する。これを活用すれば、外部の反射機構が不要で、効率の高いチェレンコフ型電磁波放射発振器を実現することが可能となる。図4に示したように、媒質の表面を放射装置の末端に向けて伝搬する進行波は、電子ビームとの相互作用により増幅され、獲得したエネルギーは構造体内部の後進波を通じて先端（相互作用の開始点）に運ばれるため、外部の反射機構なしに自然なフィードバックを達成できる。前述の相互作用新理論を用いて解析とシミュレーションにより、相互作用の基礎原理を解明し、この発想を検証した。計算の一例として、図5に指数増幅の発振様子を示した。

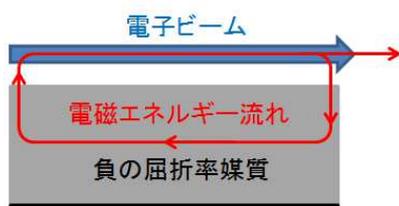


図4 外部反射機構なしチェレンコフ型発振器

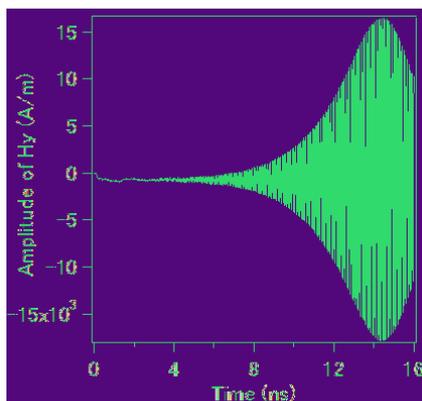


図5 外部反射機構なしチェレンコフ型発振器の発振計算例

4.4 負の屈折率光学素子設計

誘電率と透磁率は電磁波モードの属性を決めるため、実際の応用には重要な研究項目である。前述の理論モデルを解析した結果により、実際の応用に要求された負の屈折率を

実現できるような実際の人工材料（メタマテリアル）をデザインした。誘電率と透磁率をコントロールできるような人工材料の研究は、現在も世界的に注目されているフロンティアな課題であり、これまでの研究結果により、金属分割リングで透磁率をコントロールして金属棒で誘電率をコントロールする方法がある。分割リングと棒を周期的に配列することで放射機構用の平板形の構造体を作ることができる。分割リングと棒のサイズは波長より10倍程度小さいことが要求され、その構造のパラメータにより誘電率と透磁率が決まる。シングルセルを構成する際に分割リングと棒、並びに平板を構成する際にセルとセルの間に、互いに影響を与えるため、所要の誘電率と透磁率の実現は厳しくなり、そこに工夫する必要がある。

デザインの一例として、電場と磁場三次元成分を持つ電磁波に対応できる負の屈折率を有する素子を図6に示した。金属は銅、基

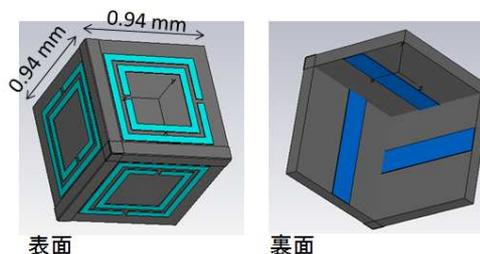


図6 金属分割リングと棒を構成した負の屈折率を有する光学素子

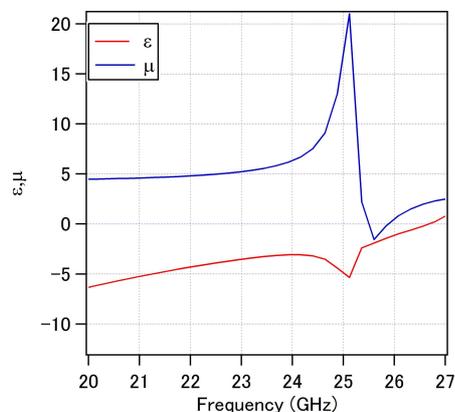


図7 比誘電率と比透磁率の周波数依存性

板材料は Rogers5880 を採用した。構造のシミュレーション結果により、比誘電率と比透磁率を導出し、その結果を図 7 に示した。図 7 によると、25.6 GHz 付近に比誘電率と比透磁率両方とも負になり、つまり、このデザインでは負の屈折率性質が得られる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① D.Li, Y.Wang, M.Hangyo, Y.Weil, Z.Yang, S.Miyamoto, “Cherenkov radiation oscillator without reflectors”, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 1940102 (2014) 査読有
- ② Y.Wang, Y.Weil, D.Li, M.Hangyo, Y.Gong, J.Feng, “Surface waves excited from negative-index materials”, *Physics Letters A* **378**, 2345 (2014) 査読有
- ③ Minghao Zhang, Yanyu Wei, Guo Guo, Lingna Yue, Yuanyuan Wang, Xianbao Shi, Xianfeng Tang, Yubin Gong, Wenxiang Wang, and Dazhi Li, “Study on two kinds of novel 220GHz folded-waveguide traveling-wave tube”, *Japanese Journal of Applied Physics* **53**, 036201 (2014) 査読有
- ④ 橋本智、陳彩華、小林花綸、川田健二、李大治、天野壯、宮本修治、「小型電子線形加速器 LEENA を用いたテラヘルツ光源開発」、電気学会論文誌 C、vol. 134、p. 495 (2014) 査読有
- ⑤ D.Li, M.Hangyo, Z.Yang, Y.Tsunawaki, Y.Weil, Y.Wang, S.Miyamoto, M.R.Asakawa and K.Imasaki, “Theoretical analysis and simulation of growth rate and start current in Smith–Purcell free-electron lasers”, *Terahertz science and technology* **6**, 189 (2013) 査読有
- ⑥ Xiaopin Tang, Zongjun Shi, Ziqiang Yang, Dazhi Li, “Dispersion analyses of a slow wave structure with a periodic slot-array-grating inside a rectangular waveguide”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **703**, 64 (2013) 査読有
- ⑦ T.Fu, Z.Yang, Z.Shi, F.Lan, D.Li, X.Gao, “Dispersion properties of a 2D magnetized plasma metallic photonic crystal”, *PHYSICS OF PLASMAS* **20**, 023109 (2013) 査読有
- ⑧ D.Li, M.Hangyo, Y.Tsunawaki, Z.Yang, Y.Weil, S.Miyamoto, M.R.Asakawa, K.Imasaki, “Growth rate and start current in Smith–Purcell free-electron lasers”, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 191001 (2012) 査読有

[学会発表] (計 7 件)

- ① Dazhi Li, M.Hangyo, Y.Tsunawaki, Z.Yang, Y.Weil, S.Miyamoto, M.R.Asakawa and K.Imasak “Theoretical study of Smith-Purcell free-electron lasers”, *International Free-Electron Laser Conference*, 26-31 Aug. 2012, Nara, Japan, FEL12 – Proceedings, 85
- ② D.Li, M.Hangyo, Y.Tsunawaki, S.Miyamoto, K.Imasak, “Theoretical analysis of grating-based radiation”, *International Symposium on Frontiers in THz Technology*, 26-30 Nov. 2012, Nara, Japan
- ③ 李大治、高野恵介、中嶋 誠、宮本修治、「負の屈折率媒質による電子ビームからの電磁波放射」、応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月
- ④ 李大治、萩行正憲、宮本修治、「負の屈折率平板表面電磁モード研究」、応用物理学会春季学術講演会、2014 年 3 月
- ⑤ 李大治、萩行正憲、宮本修治、今崎一夫、レーザー学会第 454 回研究会、2013 年 12 月
- ⑥ 李大治、萩行正憲、宮本修治、今崎一夫、「グレーティングによる放射の理論研究」、応用物理学会秋季講演会、2013 年 9 月
- ⑦ 李大治、萩行正憲、今崎一夫、「メタマテリアルによるテラヘルツ放射源の研究」、応用物理学会春季学術講演会、2012 年 3 月

[その他]

ホームページ等

<http://www.ilt.or.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

李大治 (LI DAZHI)

公益財団法人レーザー技術総合研究所・研究員

研究者番号：00373209

(2) 連携研究者

萩行正憲 (Hangyo Masanori)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号：10144429

網脇 恵章 (Tsunawaki Yoshiaki)

大阪産業大学・工学部・教授

研究者番号：90030056