

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目 ディラックコーンメタマテリアルとその特性

氏 名 永井 翔太郎

サブ波長の材料片を原子・分子に見立てて配列するメタマテリアルの概念に基づく右手/左手系複合(CRLH)メタマテリアルを用いて、ブリルアンゾーン中の Γ 点において群速度が非零となるディラックコーン分散特性が人工的に実現可能である。これまで、CRLH ディラックコーンはその存在が示されていたものの、その構成理論は無損失の系に限定されていた。またディラックポイントにおける群速度などの諸特性も実験や数値的に検討されているのみで理論的には未解明であった。

本論文では、現実の損失を考慮したCRLHメタマテリアルに対して、ディラックコーンの存在を理論的に示し、1次元および2次元の系に対してその基本特性を明らかにするとともに、その新たなマイクロ波応用の可能性について論じている。

第1章では、本研究の背景および目的、また、その学術的意義を述べている。

第2章では、従来の無損失CRLHディラックコーンメタマテリアルの物性についてまとめるとともに、損失がある場合の分散特性を理論的に示し、損失が Γ 点の群速度に与える影響について述べている。具体的には、回路論的アプローチにより、分散関係およびブロッホインピーダンスを理論的に導出し、CRLH バランス条件を満足する時に損失を考慮した場合にもディラックコーン特性を持つことを示している。また、損失を考慮した場合の Γ 点の群速度を導出し、CRLH バランス条件を満足する場合に Γ 点の群速度が非零となること、および損失が Γ 点の群速度に与える影響を理論的に論じている。ここでは、 Γ 点の群速度が回路モデルの直列および並列共振器の Q 値の比 Q_{sh}/Q_{se} に依存し、 Q_{se} と Q_{sh} が等しい場合、 Γ 点の群速度は最大となることを明らかにしている。なお、 Γ 点の群速度が最大となる時の条件式 $Q_{se} = Q_{sh}$ は、一般の分布定数線路が無歪みとなるヘヴィサイド条件と等しく、この時の最大値は背景の材料中の光速の半分の値となり、かつ無損失 CRLH ディラックコーンメタマテリアルのものと同じ値となっていることを理論的に示している。

第3章では、導波管系1次元ディラックコーンメタマテリアルとそのビーム走査アンテナ応用検討について述べている。はじめに、単位セル構造の分散関係およびブロッホインピーダンスを導出し、CRLH 媒質として動作することを示し、また、ビーム走査漏洩波アンテナに応用可能であることを示している。次に、電磁界シミュレーションによる構造設計を行い、設計した構造の通過反射特性を計算しその動作帯域を確認している。さらに、試作実験を行い、 Γ 点周波数 51.9GHz のディラックコーンを確認するとともに、そのアンテナ特性を測定し、ディラックコーンを持たせることによって、ブロードサイド方向への放射が可能となり、バックワード方向からフォワード方向への連続的なビーム走査が実現可能であることを実験的に確認している。

第4章では、反射型の2次元CRLHディラックコーンメタマテリアルと異常吸収について述べている。まず、単位セル構造の分散関係を示し、2次元CRLH媒質として動作することを示すとともに、異常吸収の動作原理を述べ、その現象が通常の共振器における外部回路との結合関係によって説明できることを示している。また、メタマテリアルがディラックコーンを持つことにより、外部入射波との結合が強められ、通常困難であった垂直入射に近い波に対しても強結合を実現し、異常吸収を発生させ易くなることを示している。次に、電磁界シミュレーションにより設計した構造に対して試作実験を行い、35dB以上の強い異常吸収特性が得られることを実験的に確認している。また、時間領域測定により、異常吸収が面内伝搬波の再放射成分に起因する現象であることも示している。

第5章では、透過型の2次元CRLHディラックコーンメタマテリアルと異常透過について述べている。まず、単位セル構造を示した後、異常透過の動作原理を説明している。電磁界シミュレーションにより設計したディラックコーンメタマテリアルに対して試作実験を行い、 Γ 点周波数 62.1GHz のディラックコーンを実験的に確認している。また、メタマテリアルにディラックコーンを持たせることにより、正面方向への透過係数が1を超える異常透過特性が得られることを示している。また、時間領域測定により、異常透過も面内伝搬波の再放射成分に起因する現象であることを示している。さらに、放射特性測定により、垂直入射波によってメタ表面の Γ 点の面内伝搬波が励振されていることを確認している。

第6章では、本研究の結論と成果、また今後の展開と課題を述べている。

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	Dirac Cone Metamaterials and Their Characteristics
氏 名	NAGAI Shotaro

The Dirac cone with non-zero group velocities at the Γ -point in the Brillouin zone can be artificially realized by using composite right/left-handed (CRLH) metamaterials based on the concept of artificial materials composed of subwavelength constituents. It has been theoretically shown that the Dirac cone can exist in CRLH metamaterials, however the theory is limited only for lossless systems. On the other hand, for lossy CRLH systems, Dirac cone characteristics such as group velocities at the Dirac point have been discussed only numerically and experimentally. Rigorous theoretical values of the group velocities at the Dirac point have not been derived so far. Theoretical support for the CRLH Dirac cone metamaterials is required for CRLH engineering and applications.

In this thesis, the characteristics of the CRLH Dirac cone metamaterials with realistic losses are elucidated theoretically. In addition, CRLH Dirac cone metamaterials are discussed for 1-dimensional (1-D) and 2-dimensional (2-D) cases, and their characteristics are revealed as well as their potential microwave applications.

Chapter 1 is dedicated to the backgrounds, objectives, and academic significances of this study.

In Chapter 2, properties of lossless CRLH Dirac cone metamaterials are summarized for completeness. Then, the dispersion characteristics for lossy CRLH Dirac cone systems are derived and the influence of losses on the Γ -point group velocities is discussed theoretically based on the equivalent circuit theory. In particular, the dispersion relation and Bloch impedance are derived, and it is shown that the Dirac cone characteristics can be realized with the CRLH balanced condition. In addition, rigorous theoretical values of the Γ -point group velocities for lossy systems are derived, and it is revealed that the Γ -point group velocity takes non-zero value when satisfying the CRLH balanced condition. Furthermore, the influence of losses on the Γ -point group velocities is discussed. It is shown that the Γ -point group velocities depend on the ratio of Q values of the series and shunt resonators in the circuit model, Q_{sh}/Q_{sc} , and the Γ -point group velocity takes the maximum value if Q_{sc} and Q_{sh} are identical. Moreover, the condition of $Q_{sc} = Q_{sh}$ is the same form as the Heaviside condition providing distortionless transmission for conventional transmission lines. It is theoretically shown that the maximum value of the Γ -point group velocities becomes a half of the speed of light in the background medium and is the same value as that in the lossless system.

In Chapter 3, a waveguide type 1-D Dirac cone metamaterial are discussed. First, the dispersion relation and Bloch impedance of the 1-D Dirac cone metamaterials are derived, and it is shown that the 1-D waveguide configuration exhibits CRLH Dirac cone properties and can be applied for a beam steering leaky wave antenna (LWA). Next, a beam steering LWA is designed by numerical electromagnetic simulations. Experiments are carried out with a prototype and it is shown that Dirac cone operating with the Dirac point frequency of 51.9 GHz is realized. Moreover, by measuring antenna characteristics of the prototype, it is experimentally shown that the continuous beam steering properties from the backward direction to the forward direction including the broad side radiation is obtained.

In Chapter 4, a reflection type 2-D CRLH Dirac cone metamaterials and its anomalous absorption are discussed. First, the dispersion relation of the structure is derived, and the principle of the anomalous absorption is expounded. It is shown that the phenomenon can be explained by a conventional resonator model with 1 external port. Moreover, it is shown that the coupling between the metamaterial and the external incident wave becomes stronger with the Dirac cone and the anomalous absorption for nearly normal incident waves is realized, which is difficult to realize with conventional periodic structures. In addition, a strong anomalous absorption characteristic more than 35 dB is confirmed experimentally with a designed prototype. By carrying out time-domain measurements, it is also shown that the anomalous absorption is originated by reradiation of the guided waves.

In Chapter 5, a transmission type 2-D CRLH Dirac cone metamaterials and its extraordinary transmission are discussed. The unit cell structure is presented, and the principle of the extraordinary transmission is expounded. Then, the Dirac cone with the Γ -point frequency of 62.1 GHz is experimentally confirmed with a prototype. It is experimentally shown that an extraordinary transmission characteristic with the broadside transmittance over unity is realized by using the 2-D CRLH Dirac cone metamaterial. Time-domain measurements are also carried out and it is also shown that the extraordinary transmission is originated by reradiation of the guided waves. Moreover, by near- and far-field measurements, the excitation of the Γ -point guided wave by normal incident waves is confirmed.

Finally, in Chapter 6, the results of this study are summarized with future works and challenges.

学位論文審査の結果及び試験，試問の結果報告書

(論文博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博乙 第 140 号	氏名	永井 翔太郎
最終試験担当者	主 審 査 委 員	嶋村 修二 久保 洋 羽野 光夫 堀田 昌志 山本 綱之 真田 篤志	
【論文題目】			
ディラックコーンメタマテリアルとその特性 (Dirac Cone Metamaterials and Their Characteristics)			
【論文審査の結果及び試験，諮問の結果】			
<p>サブ波長の材料片を原子・分子に見立てて配列して新奇物性を実現するメタマテリアルの概念に基づいた右手/左手系複合(CRLH)メタマテリアルが提案されている。CRLH メタマテリアルはブリルアンゾーンのΓ点においてディラックコーン分散特性が人工的に実現可能であり、Γ点におけるエネルギーの伝送など特異な物性を示すため注目を集めている。これまで、ディラックコーンを持つ CRLH メタマテリアルの構成理論は無損失の系に限定されており、損失のある系に対しては、実験や数値シミュレーションによって取り扱われているのみで、理論的にディラックコーンの存在は示されていない。</p> <p>本論文では、損失を考慮した CRLH メタマテリアルの構成理論を提案している。回路モデルに基づき損失のある系においてディラックコーンの存在を理論的に示すとともに、ディラックポイントにおける群速度と単位セル内の共振器のQ値の関係を初めて導出し、動作の明快な物理的解釈を与えている。また、1次元系に対して速波領域における漏洩現象を利用したビーム走査アンテナ、2次元系に対して異常反射現象・異常透過現象を利用した反射板・透過板を提案し、新たな動作原理に基づくマイクロ波応用の可能性を示すとともに、提案する理論の妥当性・有用性を示している。</p> <p>本論文の概要は以下の通りである。</p> <p>第1章では、本研究の背景、目的、学術的意義を述べている。</p> <p>第2章では、既存の無損失 CRLH ディラックコーンメタマテリアルの物性をまとめるとともに、本論文で提案する損失がある CRLH メタマテリアルの理論を提示している。回路モデルから分散関係式およびブロッホインピーダンスを理論的に導出し、CRLH バランス条件下でΓ点の群速度が非零となることを理論的に示している。同時に、Γ点の群速度が単位セル中の直列共振器のQ値Q_{sh}と並列共振器のQ値Q_{sc}の比に依存し、この比が1の場合にΓ点の群速度が最大値をとり、かつその値が無損失の場合と同じく、背景の材料中の光速の半分の値となることを示している。さらにこの条件が、一般の分布定数線路が無歪みとなるヘビサイド条件と同じであることを指摘し、その物理的解釈を与えている。</p> <p>第3章では、1次元系のディラックコーンメタマテリアルとして、導波管型ディラックコーンメタマテリアルを提案している。分散関係およびブロッホインピーダンスを導出し、ビーム走査漏洩波アンテナとして利用可能な設計理論を与えている。数値シミュレーションにより設計を行いその動作を確認するとともに、ミリ波帯における試作実験によりディラックコーンの存在と、ブロードサイド方向を含むバックワード方向からフォワード方向への連続的なビーム走査動作を実験的に確認している。</p> <p>第4章では、2次元系ディラックコーンメタマテリアルの異常吸収動作を指摘し、入射角度と周波数に選択性の非常に高い反射板への応用について述べている。マッシュルーム構造の単位セルの2次元周期構造を取り上げ、共振器モデルにより異常吸収現象が説明できることを示し、ディラックコーン特性により通常困難であるほぼ垂直入射の波に対しても異常吸収が発現することを示している。ミリ波帯における試作実験では、構造が約20分の1波長の薄さにもかかわらず35dB以上の強い異常吸収特性が得られることを実験的に確認している。また、時間領域測定により異常吸収が面内伝搬波に起因する現象であることも確認している。</p>			

第5章では、2次元系ディラックコーンメタマテリアルの異常透過動作を指摘し、入射波よりも透過波の電力密度が大きくなる異常透過現象について述べている。ディラックコーンを持つメタマテリアルに対してミリ波帯において試作実験を行い、正面方向への透過係数が1を超える異常透過特性が得られることを示している。また、その動作を時間領域測定によっても確認している。さらに、構造表面の近傍界測定により、垂直入射波によってメタ表面の Γ 点の面内伝搬波が励振され、遠方界のビームがE面H面共に34~22%まで絞られていることを直接的に観測している。

第6章では、本研究の結論と成果、また今後の展開と課題を述べている。

以上のように本論文で示された損失を考慮した場合のディラックコーンメタマテリアルの理論と、それが示す特異現象の解明は学術的にも独創的で、電磁波および光波領域において新たな材料・デバイス応用への展開が期待できる。

公聴会における主な質問内容は、有限周期がメタ表面動作へ与える影響、特性の偏波依存性、ディラックコーンとヘビサイド条件との関係、通信応用の可能性に関するものなどについてであった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計4編, 参考論文 計2編)

- 1) S. Nagai and A. Sanada, "Gamma-point group velocity of lossy Dirac cone composite right/left-handed metamaterials," *IEICE Electronics Express*, Vol. 13, No. 10, 20160281, pp. 1-6, May, 2016.
- 2) A. Sanada and S. Nagai, "Extremely high absorption by Dirac cone mushroom metasurfaces in millimeter-wave regions," *Proc. of the 5th Int'l Conf. on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, A4-15, May 2014, pp. 1398-1400.
- 3) S. Nagai, A. Sanada, M. Kawashima, and T. Seki, "Angle selective high absorption by a mushroom metasurface at V-band," *Proc. of 2013 Asia-Pacific Microwave Conf.*, T2F-3, Nov. 2013, pp.336-338.
- 4) A. Sanada, S. Nagai, and T. Yamamoto, "Composite right/left-handed waveguide and its application to V-band beam steering leaky-wave antennas," *Proc. of 2011 Int'l Symp. on Antennas and Propag.*, WeA3-2, Oct. 2011, pp. 1-4.