

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：82108

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610090

研究課題名（和文）光波領域ディラックコーンの理論と応用展開

研究課題名（英文）Theory and applications of photonic Dirac cones

研究代表者

迫田 和彰（Sakoda, Kazuaki）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・上席研究員

研究者番号：90250513

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：この研究では、光ディラックコーンと呼ばれる特殊な光の分散関係について、基本的性質に関する理論解析を行うとともに、数値計算により具体的な試料構造を提案し、さらに、ディラックコーンを検出するための実験法を考案した。これに加えて、電子波などの他の波動現象への理論の拡張を行った。特に、電気の流れやすさを決める電子の有効質量を、ディラックコーンを用いて制御する手法を考案した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we theoretically analyzed the basic properties of a special dispersion relation of light, which is called photonic Dirac cone, proposed concrete specimen's structures by numerical calculations, and proposed an experimental method to detect Dirac cones. In addition, we extended our analysis to other wave phenomena such as electronic waves. We proposed, in particular, a method to control the electron effective mass by the Dirac cone, which determines the easiness of the flow of electric currents.

研究分野：光物性物理学

キーワード：ディラックコーン フォトニック結晶 メタマテリアル 量子井戸 有効質量 群速度 エネルギー伝搬速度

1. 研究開始当初の背景

申請者は、フォトニック結晶のブリルアンゾーンの中央 (Γ 点) に線形で等方的な光の分散関係 (ディラックコーン) を実現する方法を発見した。例えば、 C_{4v} 対称な 2 次元正方格子フォトニック結晶では A_1 モードと E モードの偶然縮退により、 O_h 対称な 3 次元立方格子フォトニック結晶では A_{1g} モードと T_{1u} モードの偶然縮退により、それぞれ 2 次元および 3 次元ディラックコーンが生成する。また、 C_{6v} 対称な 2 次元 3 角格子では E_1 モードと E_2 モードの偶然縮退により、2 重ディラックコーンが生成する (図 1 参照)。ディラック点 (ディラックコーンの頂点の周波数, ω_Γ) では実効的屈折率がゼロなので、フォトニック結晶のユニットセルよりも大きなスケールで見ると空間的な位相変化が無く、光の伝搬に伴う波面の変形も無いという著しい性質がある。このことを利用して極端な屈曲導波路やクロッキング (透明マント)、任意形状のレンズの実現などが議論されている。また、 Γ 点で線形な分散関係は漏れモードによる指向性マイクロ波アンテナの制御性向上など、工学的にも重要である。

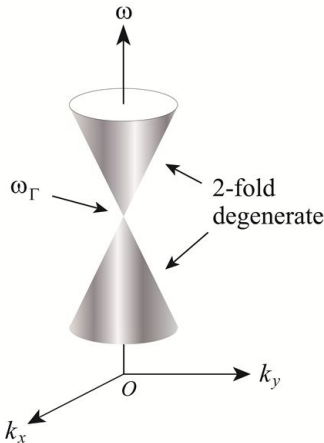


図 1 2次元3角格子フォトニック結晶の E_1 モードと E_2 モードの偶然縮退で生じる 2 重ディラックコーンの模式図。 ω_Γ : ディラック点。

2. 研究の目的

本研究では、(1)光波領域のフォトニック結晶の設計、(2)ディラックコーンと入射電磁波の結合性能の解析、(3)ディラックコーンの検出法の考案、を実施して光波領域でディラックコーンを実現する具体的な試料構造を提示する。また、(4)ゼロ屈折率による光散乱の低減と(5)バンドオフセットによる有効質量の制御を解析計算で示すとともに、(6)電子波やマグノン等の他の素励起への理論の拡張を行い、特に、(7)励起子ポラリトンの高温ボーズ凝縮の可能性を理論計算で示す。

3. 研究の方法

まず、申請者が独自に開発した解析的な手法、および、時間領域差分法などによる数値計算を利用して、光波領域のディラックコーンを実現する試料構造の設計、入射電磁波とディラックコーンの結合性能の解析、および、顕微レーザー分光法による高精度なディラックコーンの検出法の考案を実施する。特に、スラブ型フォトニック結晶とソフトコロイド結晶について、具体的な試料構造を提示する。次に、実効的屈折率がゼロであることに起因する光散乱の低減効果のグリーン関数法による解析と、バンドオフセットの調節による有効質量の制御に関する理論実証、および、電子波、音波、マグノン等の素励起への理論の拡張を実施する。特に、きわめて小さな有効質量に起因する、励起子ポラリトンの高温ボーズ凝縮の可能性について検討する。

4. 研究成果

(1) 光波領域フォトニック結晶の設計

光波領域の試料作製が比較的容易なフォトニック結晶スラブについて、数値計算による試料設計を行い、ディラックコーンを実現する試料構造を見出した。まず、図 2 は 2 次元正方格子フォトニック結晶スラブに関する計算結果の一例で、スラブが比較的厚く、回折損が少ない場合の光の分散関係である。 Γ 点上にディラックコーンと 2 次の分散曲線が 1 本存在する。これに対して、回折損が大きい場合にはディラックコーンが変形することを見出した (図 3)。

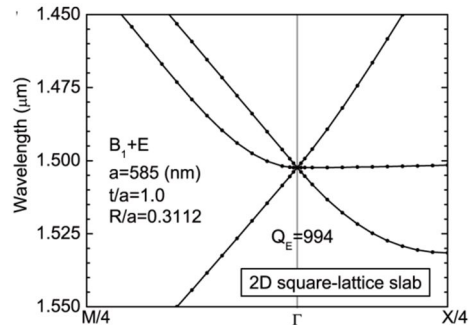


図 2 2次元正方格子フォトニック結晶スラブのディラックコーン (回折損が小さい場合)

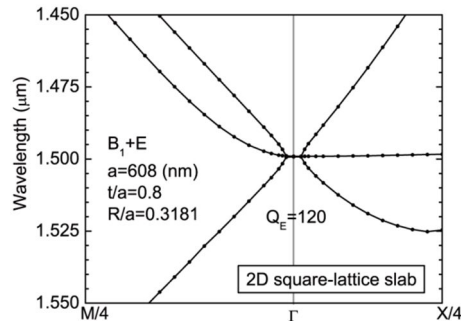


図 3 2次元正方格子フォトニック結晶スラブのディラックコーン (回折損が大きい場合)

この結果は、以前に導いた有効ハミルトニアンの方法による解析計算でも導出することができ、変形の立ち上がり部分の関数形は波数の平方根である。したがって、立ち上がり部分の曲線の傾きは無限大であり、群速度が光速を超えて発散する。これは、回折損を起源とする超光速伝搬である。

(2) 入射電磁波との結合性能の解析とディラックコーンの検出法の考案

グリーン関数法を用いて、入射平面波とディラックコーンモードの結合強度の解析表現を導出した。2次元正方格子 (C_{4v} 対称) と2次元3角格子 (C_{6v} 対称) の場合について、結果を表1に示す。

表1 入射平面波とディラックコーンモードの結合強度

Lattice symmetry	Mode1	Mode2	Angular dependence
C_{4v}	E	A_1	$\cos^2(\phi - \theta)$
	E	A_2	$\sin^2(\phi - \theta)$
	E	B_1	$\cos^2(\phi + \theta)$
	E	B_2	$\sin^2(\phi + \theta)$
C_{6v}	E_1	E_2	1
	E_1	A_1	$\cos^2(\phi - \theta)$
	E_1	A_2	$\sin^2(\phi - \theta)$
	E_2	B_1	silent
	E_2	B_2	silent

この表で、 θ は入射波の磁場の偏光方向、 ϕ はディラックコーンモードの進行方向である。ディラックコーンを構成するモードの対称性毎に、結合強度の偏光依存性が異なる。したがって、伝搬方向の偏光依存性を測定することで、関与するモードの対称性が判別できる。また、このような偏光依存性はディラックコーンに固有の現象なので、ディラックコーンの検出法として利用できる。

(3) 電子波への理論の拡張とバンドオフセットによる有効質量の制御

これまでの光ディラックコーンの理論を電子波の場合に拡張した。GaAsの量子井戸について、井戸厚を周期的に変調した場合に、ディラックコーンが生成する条件を有効質量近似と有限要素法で算出し、電子波のサブバンドにディラックコーンと2重ディラックコーンが生成することを確認した。この結果は、 $k \cdot p$ 摂動法による解析計算とも整合した。

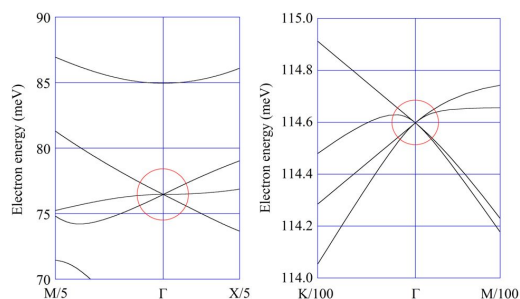


図4 変調量子井戸の電子準位のディラックコーン。(左) 正方格子、(右) 3角格子

Γ 点での縮退が完全ではなく、有限のオフセットがある場合も $k \cdot p$ 摂動法で解析でき、分散曲線の2次微分から計算した電子の有効質量がオフセットに比例することが示せる。すなわち、オフセットを小さくすることで電子の有効質量をいくらでも小さくできることを見出した。

当初計画していた研究項目のうち、ゼロ屈折率による光散乱の低減と、励起子ポラリトンの高温ボーズ凝縮の可能性に関する検討は未完である。今後、さらに検討を続ける予定である。他方、光波領域フォトニック結晶スラブの試料設計の過程で、当初予想していなかった変形ディラックコーンと超光速伝搬を見出した。これらは、ディラックコーンモードが回折損をもつ場合にだけ見られ、光物性物理学の長年の課題である、異常分散域の励起子ポラリトンの超光速伝搬と類似の現象である。両者はともに非エルミート系であることから、超光速伝搬を広く非エルミート系の問題と捉えることで、変形ディラックコーンの超光速伝搬問題の解決が、励起子ポラリトン等、超光速伝搬問題全般の解決の糸口になる可能性がある。

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 4件)

Yuanzhao Yao and Kazuaki Sakoda, Dirac cones in periodically modulated quantum wells, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 85巻, 2016, 065002/1-2
DOI: 10.7566/JPSJ.85.065002

迫田 和彰, 光ディラックコーンの原理と応用, レーザー研究, 査読有, 44巻, 2016, 21-26

迫田 和彰, 屈折率って何? - 現代の巨視的電磁場問題 -, 日本物理学会誌, 査読有, 70巻, 2015, 812-813

Kazuaki Sakoda, Polarization-dependent continuous change in the propagation direction of Dirac-cone modes in photonic crystal slabs, Physical Review A, 査読有, 90巻, 2014, 013835/1-8
DOI: 10.1103/PhysRevA.90.013835

〔学会発表〕(計 11件)

Kazuaki Sakoda, Lossy photonic Dirac cones stop light, The 37th Progress in Electromagnetics Research Symposium (招待講演), 2016年8月8日~2016年8月11日, 上海国際会議場(中国, 上海)

Kazuaki Sakoda, Superluminal propagation

of Dirac-cone modes in photonic crystal slabs, The 4th Advanced Electromagnetics Symposium (招待講演), 2016年7月26日~2016年7月28日, Convention & Exhibition Centre (スペイン, マラガ)

Kazuaki Sakoda, Dirac cones in photonic crystal slabs, The 10th International Symposium on Modern Optics and its application(招待講演), 2015年8月10日~2015年8月13日, バンドン工科大学 (インドネシア, バンドン)

Kazuaki Sakoda, Photonics research activity at NIMS, Nano Korea 2015 (招待講演), 2015年7月1日~2015年7月3日, COEX(韓国, ソウル)

Kazuaki Sakoda, Dirac cones in photonic crystal slabs, The 5th Korea-Japan Metamaterials Forum(招待講演), 2015年6月29日~7月1日, Seoul National University (韓国, ソウル)

迫田 和彰, 姚 遠昭, 人口ディラックコーンと有効質量の制御, 日本物理学会春季講演会, 2015年3月21日~2015年3月24日, 早稲田大学 (東京)

Kazuaki Sakoda, Artificial Dirac cones and effective mass engineering, 第4回日韓メタマテリアルフォーラム (招待講演), 2014年12月22日~2014年12月24日, 大阪大学 (豊中市)

迫田 和彰, 光波領域のディラックコーン (2), 物理学会秋季講演会, 2014年9月7日~2014年9月10日, 中部大学 (春日井市)

Kazuaki Sakoda, Isotropic Dirac cones in the Brillouin-zone center of photonic crystals and metamaterials, SPIE Optics + Photonics 2014(招待講演), 2014年8月17日~2014年8月21日, サンディエゴ会議場 (アメリカ, サンディエゴ)

Kazuaki Sakoda, Method for detecting photonic Dirac cones in optical frequencies, META 2014 (招待講演), 2014年5月20日~2014年5月23日, ナンヤン工科大学 (シンガポール)

Kazuaki Sakoda, Design of photonic Dirac cone in the Brillouin-zone center of photonic crystal slabs, PECS XI (招待講演), 2014年5月11日~2014年5月15日, 復旦大学 中国, 上海)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0件)

取得状況 (計 0件)

〔その他〕

無し

6. 研究組織

(1)研究代表者

迫田 和彰 (SAKODA, Kazuaki)
国立研究開発法人 物質・材料研究機構・
機能性材料研究拠点・上席研究員
研究者番号: 90250513