

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13496

研究課題名（和文）電流注入法による超伝導ヒッグスモードの観測方法の確立とその応用

研究課題名（英文）Establishment and application of a current-inducing method to observe superconducting Higgs modes

研究代表者

中村 祥子（Nakamura, Sachiko）

東京大学・低温科学研究センター・特任助教

研究者番号：00726317

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、直流の超伝導電流を流しながら超伝導エネルギーギャップの周辺の光学伝導度を測定するという、超伝導ヒッグスモードの新しい観測方法を確立した。ヒッグスモードとは超伝導秩序変数の振幅の集団励起で、電気・磁気分極を伴わないので、一般には電磁波と線形に結合しない。しかし、超伝導体に直流電流を注入すれば、線形の光吸収として観測できることが理論的に予測されていた。そこで、超伝導薄膜に巨大な直流電流を注入しながらテラヘルツ伝導度測定を行い、理論予想が成り立つことを量的にも質的にも実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導ヒッグスモードは、超伝導体における超伝導秩序の成長や抑制をピコ秒の超高速なタイムスケールで観測できるプローブである。ヒッグスモードは電磁場との相互作用が非線形なので、通常は高強度の光源を用いて観測・駆動するが、本研究は、電流注入下なら線形の相互作用が実効的に現れるので、低強度の光源でも観測・駆動できることを示した。ヒッグスモードの対象を、高強度光源の実現が難しい周波数帯域にヒッグスモードが現れる物質系だけでなく、測定による擾乱が小さいことで、光誘起した過渡的または準安定な非平衡状態にも広げる重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：This research established a new observation method of superconducting Higgs mode where the optical conductivity around the superconducting gap energy in the presence of dc supercurrents.

The Higgs mode is the collective excitation of the amplitude of the superconducting order parameter, which does not generally couple to electromagnetic waves in the linear conducting regime because it does not associate with electric nor magnetic polarizations. However, it was theoretically predicted that the Higgs mode can be observed as a linear absorption if a dc current is introduced to the superconductor. We measured the terahertz conductivity of superconducting thin films in the presence of large dc currents and demonstrated the prediction qualitatively and quantitatively.

研究分野：物性物理学実験

キーワード：超伝導 ヒッグスモード 電流注入 テラヘルツ 光学伝導度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究で対象としている超伝導ヒッグスモードは、超伝導秩序変数の振幅が時間的に振動する集団励起である。2013~2014年に、高強度テラヘルツ波パルスを用いた観測が初めて報告され、超伝導波動関数という巨視的量子状態を光で動的に制御する手段となることを見出された。本研究を開始する直前には、銅酸化物超伝導体においてもヒッグスモードが観測され、ヒッグスモードは、非従来型超伝導体も含めた広範な超伝導体に普遍的に存在し、その性質を知ることが超伝導機構の解明につながる「分光対象」としての重要性も注目されている。

そのような背景のもと、2017年に、電流注入下では線形の光吸収としてヒッグスモードが観測できるという理論が発表された。この理論を実証し、新しい分光法として確立すれば、より広範な超伝導体・超伝導状態に適用できると考え、本研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究では、超伝導体に超伝導電流を注入すると、線形光吸収でもヒッグスモードが観測できるという理論予測を実証し、広範な物質系で超伝導ヒッグスモードを調べることを可能とする新しい観測技術を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、超伝導体薄膜の表面に金属電極を設け、直流の大電流を注入しながら、比較的弱い強度の広帯域テラヘルツ波パルスを用いて、透過配置の光学伝導度測定を行った。続けて、高強度の狭帯域テラヘルツ波パルスを用いて、電流注入下の非線形応答の測定も行った。

4. 研究成果

本研究では、超伝導 NbN の薄膜において、電流注入下のテラヘルツ光学伝導度測定によるヒッグスモードの観測に成功した。実際の測定では電流注入による発熱が問題となったので、他の超伝導体への拡張も見据え、大電流を小さな接触抵抗で導入するための要素技術を開発した。電流注入の手法を、非線形応答の測定にも拡張したところ、ヒッグスモードは観測できなかったが、磁束量子の運動に起因する巨大な非相反・非線形応答を観測した。各項目について、以下にまとめる。

(1) 電流注入によるヒッグスモードの赤外活性化

超伝導秩序変数の振幅の振動モードであるヒッグスモードは、電気・磁気分極を伴わないので、電磁波と線形には結合せず、線形応答としては観測できない。しかし、超伝導体に直流電流を印加すると、電流に平行な電場成分を持つ偏光の電磁波とヒッグスモードが線形に結合し、光学伝導度スペクトルの実部において、超伝導ギャップのエネルギーに共鳴ピークが現れることが理論的に提案されていた。

そこで、*s* 波超伝導体である NbN の薄膜 (26 nm 厚、 $T_c=14.5$ K) に、臨界電流密度 ($J_c=3$ MA/cm²) に匹敵する直流電流を流しながら、比較的低強度 (電場は最大で 20 V/cm 程度) の広帯域 THz 波パルスを入射させ、透過した THz 波を時間領域分光することで、直流電流の注入による超伝導体の光学伝導度の変化を求めた。その結果、測定する偏光の方向が電流と平行な配置において、超伝導ギャップ付近に、電流密度の 2 乗に比例するピークが観測された。電流と偏光が直交する配置では、このピークは消失した。ピークの強度は、先述の理論に則った計算結果にオーダーで一致した。やや厚い試料との比較では、超伝導ギャップの拡大に連動して、このピークのエネルギーも高くなることを確認した。測定温度を上げていくと、超伝導ギャップエネルギーの縮小とともにピークが現れるエネルギーが低下した。温度上昇に伴いピークはブロードになり、準粒子励起に伴うピークも成長し、流せる直流電流密度も小さくなるので、全体的に条件が良くなるが、偏光依存性からヒッグスモードによるピークを分離することで、超伝導転移温度の近傍 ($T>0.9T_c$) まで観測できた。測定に用いた直流電流密度の範囲内 (対破壊電流密度の 1/10 以下) では、超流動密度や超伝導ギャップは、ほとんど変化しなかった。

これらの振る舞いから、観測されたピークは、電流注入によるヒッグスモードの赤外活性化現象で、この方法を用いれば、広い温度・周波数範囲で、大きな擾乱を与えることなくヒッグスモードを観測できると結論づけた。

(2) 大電流を小さな接触抵抗で導入するための技術開発

テラヘルツ波は典型的に、波長が 300 マイクロメートル、スポットサイズは数ミリメートルのオーダーである。そのため、サンプルもその程度の大きさである必要があり、本研究でも、測定に使った超伝導体のサイズは 4 mm 角程度と大きい。そのため、注入した電流は数アンペアのオーダーである。絶縁体の透明基板上に成膜された超伝導サンプルは、グラウンドから隔絶されており、サンプルを冷却するのは、ヘリウムの熱交換ガスと電流注入用のリード線のみである。加えて、局所的に超伝導体が破壊された場合、超伝導破壊による発熱が生じ、連鎖するため、超

伝導体の極近傍における発熱は極力抑える必要がある。これらの事情を総合すると、電流注入のための電極の接触抵抗は、1 m Ω 程度に抑えたい。

NbN の場合は、接触抵抗が極めて小さい Au/Ti パッドが蒸着されており、そこに数十本のアルミ線をボンディングするという方法で、これを実現したが、基板との密着性が低い超伝導薄膜が対象の場合は、ボンディングの衝撃や、ワイヤーの熱収縮によって薄膜が剥離する不良が発生した。これについては、試行錯誤の結果、インジウムを挟んでパッドと面電極を圧着する方法を用いれば、極めて低い接触抵抗と、サーマルサイクルへの耐久性が実現できることがわかった。最表面が変質するタイプの超伝導体では、インジウムの圧着・剥離を繰り返すことで変質した層が取り除かれ、金属伝導が復活する振る舞いも確認された。

このインジウム圧着の方法は汎用性が高く、広範な超伝導体に対して電流注入によるヒッグスモードの赤外活性化を行う場合に実用的な手法であると考えられる。

(3) 電流注入下の超伝導体による巨大な非相反第2高調波発生

電流注入によるヒッグスモードの赤外活性化は、理論的には、作用の中に現れる、凝縮体の運動量(超伝導電流)の2乗とヒッグスモードの積の項によって説明される。それによると、照射した電磁波の周波数と同じ周波数のヒッグスモードが励起されるはずである。超流動密度は超伝導秩序変数の2乗なので、ヒッグスモードと同じ周波数で振動するはずで、振動電場によって超伝導体に流れる電流は、超流動密度と振動電場の積になるはずなので、照射した電磁波の周波数の倍の周波数で振動するはずである。すなわち、電流注入下の超伝導体に、ヒッグスモードの周波数付近の電磁波を照射すれば、2倍の周波数の電磁波(第2高調波)を放射するはずである、と考え、電流注入下のNbNに対して、高強度・狭帯域テラヘルツ波を照射し、透過テラヘルツ波を観測したところ、ヒッグスモードから期待されるよりも、はるかに強く、シャープに共鳴する第2高調波が観測された。2次の非線形感受率を計算すると、テラヘルツ帯で大きな値を示す既知の物質LiTaO₃の10,000倍に達した。

この第2高調波発生の微視的起源は、第II種超伝導体であるNbNにピン止めされた磁束量子だと考えられる。磁束量子には、超伝導電流から力を受けて運動し、その運動によって電場を放射する性質がある。本研究のセットアップでは、薄膜に垂直な方向に凍結された磁束量子が、直流電流によって傾けられた実効的ピン止めポテンシャルの中で、テラヘルツ波に誘起された電流から力を受けて振動している。モデル計算を行い、観測された共鳴周波数から磁束量子の質量を決定した。決定された磁束量子の質量は、他の方法で決定した先行研究より3~5桁小さく、磁束コアの裸の質量として理論的に得られる値とオーダーで一致した。これは、高強度テラヘルツ波を用いて高速に駆動したことで、周囲の準粒子を置き去りにしたコアのみの運動を初めて観測できたものだと考えられ、磁束コア内状態の研究への応用が期待される。

また、この実験は、超伝導体に直流電流を注入して時間・空間反転対称性を同時に破ることで、非相反性を発現させ、第2高調波を発生させたと解釈することもできる。反転対称性の破れの影響を受ける現象だけが第2高調波を発生させうるため、磁束量子の運動が、準粒子励起等の他の現象から分離され、あらわになったのである。電流注入による非相反性の獲得は、磁束量子に限らず、そもそも狙っていたヒッグスモードも含め、様々な微視的起源の応答に対して発展させうる手法であると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakamura Sachiko, Katsumi Kota, Terai Hiroataka, Shimano Ryo	4. 巻 125
2. 論文標題 Nonreciprocal Terahertz Second-Harmonic Generation in Superconducting NbN under Supercurrent Injection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 097004-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.097004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Sachiko, Iida Yudai, Murotani Yuta, Matsunaga Ryusuke, Terai Hiroataka, Shimano Ryo	4. 巻 122
2. 論文標題 Infrared Activation of the Higgs Mode by Supercurrent Injection in Superconducting NbN	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 257001(1) ~ (5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.257001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 中村祥子, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮
2. 発表標題 テラヘルツ第2高調波発生から見る超伝導NbNにおける磁束量子ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村祥子, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮
2. 発表標題 非相反テラヘルツ第2高調波発生から見る超伝導NbNにおける磁束量子ダイナミクス
3. 学会等名 第12回低温科学研究センター研究交流会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Nakamura, Y. Iida, R. Matsunaga, H. Terai, R. Shimano
2. 発表標題 Infrared-active Higgs mode in superconducting NbN by supercurrent injection
3. 学会等名 SNS2019: Spectroscopies in Novel Superconductors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Nakamura, Y. Iida, R. Matsunaga, H. Terai, R. Shimano
2. 発表標題 Infrared-active Higgs mode in superconducting NbN by supercurrent injection
3. 学会等名 The Challenge of 2-Dimensional Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村祥子, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮
2. 発表標題 電流注入下の s 波超伝導体 NbN におけるピン止めされた磁束に由来する偶数次高調波発生
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村祥子, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮
2. 発表標題 電流注入下の s 波超伝導体 NbN における非相反テラヘルツ第 2 高調波発生
3. 学会等名 第11回低温科学研究センター研究交流会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Nakamura, Y. Iida, R. Matsunaga, H. Terai, and R. Shimano
2. 発表標題 Infrared-active Higgs mode in an s-wave superconductor NbN under DC current injection
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村祥子, 飯田雄大, 室谷悠太, 松永隆佑, 寺井弘高, 島野亮
2. 発表標題 直流電流注入下でのs波超伝導体NbNの赤外活性ヒッグスモード
3. 学会等名 日本物理学会 2018 年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村祥子, 富田圭祐, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮
2. 発表標題 電流注入下のs波超伝導体NbNにおけるテラヘルツ第2高調波発生
3. 学会等名 第10回東京大学低温センター研究交流会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村祥子, 富田圭祐, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮
2. 発表標題 電流注入下のs波超伝導体NbNにおけるテラヘルツ第2高調波発生
3. 学会等名 日本物理学会第 74 回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------