

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 19日現在

機関番号：10101
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22540355
 研究課題名（和文）超伝導クーパー対発光の理論

研究課題名（英文）Theory of the luminescence of Cooper pairs

研究代表者

浅野 泰寛（ASANO YASUHIRO）
 北海道大学・大学院工学研究院・准教授
 研究者番号：20271637

研究成果の概要（和文）：

本研究では超伝導クーパー対が再結合して発光する機構を理論的に解明し、実験に超伝導pn接合で見出される発光強度や寿命の特徴的な振る舞いを説明した。また、次世代の量子情報基盤となるマヨラナ粒子の電磁気学的性質を調べた。固体中で現れるマヨラナ粒子は必ず奇周波数クーパー対を伴うこと、奇周波数クーパー対が電磁気学的な不安定性を内在していることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We have theoretically made clear the mechanism of luminescence of Cooper pairs on the basis of the mean-field theory of superconductivity. The characteristic features of luminescence intensity observed in superconducting pn junctions have been explained by the theory. In addition, we have investigated the electromagnetic properties of Majorana fermion which is a promising candidate of quantum information

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	0	1,000,000
2012年度	900,000	0	900,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	330,000	3,330,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：物性Ⅱ

キーワード：超伝導、発光

1. 研究開始当初の背景

発光ダイオード（LED）は交通信号や懐中電灯に使われるなど日々の営みに深く浸透し、省エネルギーの達成と快適な生活の維持を両立させる優れた電子素子である。半導体pn接合で生じる発光という物理現象は、このように極めて身近なものである。最近、発光現象の新たな側面に注目した研究が精力的に行われている。

2. 研究の目的

半導体発光ダイオードに超伝導体を接合する事により、超伝導転移温度より低温において発光強度が一桁も増大する、という実験結果を本研究計画の連携研究者が昨年報告した。本研究の目的は、超伝導クーパー対の発光機構を理論的に解明し、実験で示された発光増大現象の謎を解くことである。本課題は、超伝導クーパー対が如何にしてフォトンに

変換されるか、という超伝導現象の新たな研究分野を開拓する意義を持つ。

3. 研究の方法

超伝導pn接合における発光強度を、電子・光子相互作用に関する摂動展開に基づき理論計算する。2次摂動項に超伝導特有の異常項があり、この項は発光の増大を説明すると同時に理論の特異性をもたらす。摂動展開の有効性を保証するためには、4次項の評価や自己エネルギーに関してその大きさを評価する。また、理論に用いた現象論的な関係式を微視的に導く。近接効果の影響を調べる事、ジョセフソン型発光素子の特徴的な発光現象を予言する事、実験的に見出される発光強度や発光寿命の温度依存性を理論的に説明する事が課題である。超伝導秩序がある場合だけでなく、超伝導相関が発達した近接効果の元でも発光が起きるかどうかを準古典近似の下で検証する、発光した光子間に生ずる量子もつれ合いの有無を超伝導の平均場理論に基づき検証する。量子可干渉性を保つとされるマヨラナ粒子の電磁気学的な安定性について、準古典理論を用いて明らかにする。

4. 研究成果

計画時に予測していた理論上の難点の多くは、改めて理論に改良を加える必要が無く解決できた。超伝導クーパー対が再結合した場合、2光子発光は電磁場と電子系の相互作用を摂動とした2次過程にあたる。この高次の発光強度が大きいことは、摂動論を用いる有効性に疑問を生じるが、解析の結果以下の事が分かった。

(1) 1次の摂動の発光強度には超伝導はほとんど寄与しない。

(2) 2次の発光過程では、超伝導秩序のために摂動の中間状態のエネルギーと摂動の始状態・終状態のそれとが近接し、共鳴的に発光現象が起き、その結果発光強度の増大が導かれる。

(3) 3次以上の高次過程の発光強度は、2次のそれと比較して極めて小さい。

以上によって、摂動論の適用が可能であることが分かった。実験的に見出されていた発光強度と発光寿命の間の関係は、素子の量子効率を考慮すると矛盾無く説明できることが分かった。実験的には応用目的に合致した量子効率を制御する必要がある事も分かった。理論的にも実験的にも研究の進捗はおおむね順調で、理論的には想定されていなかった新たな課題に取り組んだ。超伝導クーパー対が再結合した場合、発光した2つの光子の間に量子力学的なもつれが発生しているかどうかを考察した。理論的な結果は、確かにもつれあった量子状態を示唆しているが、実験的にもそうなっているかどうかについては今後の課題として残されている。

量子情報を操作・記憶するには量子状態を様々な外的擾乱から守りその可干渉性を保つ必要があるが、電子はどうしても背景電荷揺らぎや熱揺らぎの影響で可干渉性を失ってしまう。この難点を解決する可能性があるのが、マヨラナ粒子である。これまでにマヨラナ粒子はスピン3重項超伝導体の表面やその接合界面に現れることが知られており、我々はこれまでに異常近接効果と呼ばれる現象を見出していた。異常近接効果を支えるのは奇周波数クーパー対と呼ばれる奇妙な超伝導電子対であるが、マヨラナ粒子を固体の中で創出するには奇周波数電子対が必要であることを明らかにした。また、マヨラナ粒子と奇周波数クーパー対は電磁気学的に不安定であることを理論的に予測し、表面インピーダンスの測定からそれを検証する実験を提案した。

5. 主な発表論

(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10件)

- ① Majorana Fermion and Odd-frequency Cooper Pairs in a Nano Wire, Y. Asano and Y Tanaka, Physical Review B Vol. 87, Art NO 104513(1)-(10) (2013). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.87.104513
- ② Photon-pair Generation based on Superconductivity, I Suemune, H Sasakura, Y. Asano, H Kumano, R Inoue, K Tanaka, T Akazaki, and H Takayanagi, Electronics Express Vol 9, pp 1184-1200 (2012). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.87.104513
- ③ Anomalous Surface Impedance in a Normal-metal/Superconductor Junction with a Spin-active Interface, Y. Asano, M. Ozaki, T. Habe, A. A. Golubov, and Y Tanaka, Physical Review B, Vol 86, Art No 024510(1)-(8) (2012). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.86.024510
- ④ Cooper-pair Radiative Recombination in Semiconductor Heterostructures: Impact on Quantum Optics and Optoelectronics, I Suemune, H Sasakura, Y Hayashi, K Tanaka, T Akazaki, Y. Asano, R Inoue, H Takayanagi, E Hanamura, J.-H Huh, C Hermannstadter, S Odashima, and H Kumano, Japan Journal of Applied Physics Vol 51, Art No 010114(1)-(10) (2012). 査読有 DOI: 10.1143/JJAP.51.010114

⑤Enhanced photon generation in a Nb/n-InGaAs/p-InP superconductor /semiconductor-diode light emitting device,
H Sasakura, S Kuramitsu, Y Hayashi, K Tanaka, T Akazaki, E Hanamura, R Inoue,
H Takayanagi, Y. Asano, H Kumano, and I Suemune,
Physical Review Letters Vol 107, Art No 157403 (1)-(4) (2011). 査読有
DOI:10.1103/PhysRevLett.107.157403

⑥Josephson Effect in Noncentrosymmetric Superconductor Junctions,
Y. Asano and S. Yamano,
Physical Review B Vol 84, Art No 064526 (2011). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.84.064526

⑦Unconventional Surface Impedance of a Normal-Metal Film Covering a Spin-Triplet Superconductor Due to Odd-Frequency Cooper Pairs,Y. Asano, A A Golubov, Ya V Fominov, and Y Tanaka, Physical Review Letters Vol 107, Art No 087001(1)-(4) (2011). 査読有
DOI:10.1103/PhysRevLett.107.087001

⑧Theory of quantum transport in Josephson junctions with a ferromagnetic insulator,
S Kawabata and Y. Asano,
Low Temperature Physics vol 36, pp 915-919 (2010).
査読有 DOI:10.1063/1.3515524

⑨Tunneling between Two Helical Superconductors via Majorana Edge Channels,
Y. Asano, Y Tanaka, and N Nagaosa,
Physical Review Letters Vol 105, Art No 056402(1)-(4) (2010). 査読有
DOI:10.1103/PhysRevLett.105.056402

⑩A Cooper-pair Light Emitting Diode: Temperature Dependences of Quantum Efficiency and Radiative Recombination Lifetime,
I Suemune, Y Hayashi, S Kuramitsu, K Tanaka, T Akazaki, H Sasakura, R Inoue, H Takayanagi,Y. Asano, E Hanamura, and H Kumano,
Applied Physics Express 査読有vol 3, Art No 054001(1)-(3) (2010).
DOI:10.1143/APEX.3.054001

[学会発表] (計10件)

①Majorana fermions and Odd-frequency Cooper Pairs,
Y. Asano, MTI Nonconventional Insulators Workshop 2012, Illinois, U. S. A. 13 November, 2012 (12-16 November, 2012). Argonne National Laboratory

②Majorana fermions and Odd-frequency Cooper Pairs, Y. Asano,
9th International Conference on New Theories, Discoveries and Applications of Superconductors and Related Materials, Roma, Italy, 17 September, 2012 (16-20 September, 2012). Donostia International Physics Center

③Majorana fermions and Odd-frequency Cooper Pairs,
Y. Asano, Workshop on Superconducting Nanohybrids 2012, San Sebastian, Spain, 5 September, 2012 (3-7 Sep, 2012). Donostia International Physics Center

④Odd-frequency Cooper Pairs in spin-triplet superconducting junctions,
Y. Asano, The International conference Dubna-Nano2012, Dubna, Russia, 13 July, 2012 (9-14 July, 2012). Key-note Talk of the conference. Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics

⑤Odd-frequency Cooper Pairs in ferromagnetic junctions,Y. Asano,
8th International Workshop on Nanomagnetism & Superconductivity, Spain, 5 July 2012 (1-5 July, 2012). Hotel Marvel, Coma-ruga

⑥Proximity Effect of Odd-frequency Cooper Pairs,Y. Asano, International Conference on Topological Phenomena, TQP2012, Nagoya, Japan, 19 May, 2012 (16-20 May, 2012). 名古屋大学

⑦Odd-frequency Cooper Pairs and Their Effects on Surface Impedance,
Y. Asano, Superconductivity and Magnetism, SM-2011, Kishinev, Moldva, (7 October, 2011). モルドヴァ科学学校

⑧Anomalous Surface Impedance due to Odd-frequency Cooper Pairs,
Y. Asano, 7th International Workshop on Nanomagnetism & Superconductivity, Coma-ruga, Spain, 5 July, 2011. Hotel Marvel, Coma-ruga

⑨Anomalous Surface Impedance due to
Odd-frequency Cooper Pairs,
Y. Asano, 8th International Conference
on New Theories,
Discoveries and Applications
of Superconductors and
Related Materials,
Chongqing, China,
9 June, 2011.

J.W.Marriott Hotel

⑩Tunneling between Two Helical
superconductors via Majorana
Edge Channels,

Y. Asano, Superconductivity
and Magnetism 2010,
Paestum, Italy, 7 September, 2010.
サレルノ大学

[その他]

ホームページ等

[http://zvine-
ap.eng.hokudai.ac.jp/~asano/index.html](http://zvine-
ap.eng.hokudai.ac.jp/~asano/index.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅野 泰寛 (ASANO YASUHIRO)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：20271637

(2) 研究分担者 なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

末宗 幾夫 (SUEMUNE IKUO)
北海道大学・電子科学研究所・教授
研究者番号：00112178