

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420350

研究課題名(和文) TDGL方程式のシミュレーションによる超伝導ストリップライン検出器の高性能化

研究課題名(英文) Numerical simulation based on the TDGL equations for high-efficient superconducting-strip detectors

研究代表者

馬渡 康德 (Mawatari, Yasunori)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・上級主任研究員

研究者番号：70358068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：時間依存 Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式を基にした数値シミュレーションにより、超伝導ナノストリップを用いた単一光子検出器および生体分子イオン検出器の検出・動作機構について理論的考察を行った。光子の場合は渦糸運動による発熱により超伝導ストリップが局所的に常伝導転移するのに対し、分子イオンの場合はすでに常伝導転移するホットスポットモデルが妥当であり、また MgB₂ ストリップによる分子イオン検出器は熱的に安定で検出効率が高いことを理論的に明らかにした。さらに、光子の吸収により発生する渦糸を単一磁束量子(SFQ)回路で直接検出する新型の単一光子検出器を理論的に提案した。

研究成果の概要(英文)：We have theoretically investigated single-photon and biomolecular-ion detectors using superconducting nanostrips on the basis of the numerical simulation solving the time-dependent Ginzburg-Landau (TDGL) equations. We numerically verified that the hot-spot model without nucleation of vortices is adequate for ion detectors, whereas the vortex motion plays crucial roles for local normal transition of superconducting strips for single-photon detectors. Biomolecular-ion detectors using MgB₂ superconducting nanostrips are thermally stable and have high detection efficiency. Furthermore, we have theoretically proposed a new single-photon detectors in which photon assisted vortices in superconducting nanostrips are detected by single-flux-quantum (SFQ) circuits.

研究分野：工学

キーワード：超伝導ストリップ検出器 単一光子 分子イオン 時間依存 Ginzburg-Landau方程式 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

超伝導ナノストリップを用いた単一光子検出器および分子イオン検出器は、従来の半導体検出器に比べて、高い計数率(高速動作)、高い検出効率、低い暗計数率(低雑音)、およびゲート動作不要などの優れた特徴を持ち、光子検出器は量子情報通信等へ、分子イオン検出器は質量分析等への実用化が期待されている。

超伝導ストリップ検出器においては、薄膜をミアングダ状に加工した超伝導ストリップに臨界電流より小さいバイアス電流を流し、光子やイオンが衝突すると、超伝導ストリップが局所的に常伝導転移して発生する電圧パルスを計数する。本研究の開始当初は、超伝導ストリップ単一光子検出器における局所的常伝導転移に関して、時間依存 Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式を用いた数値シミュレーションが他研究機関より報告され始め、物理現象としての検出機構が解明されつつある状態であった。

しかし、TDGL 方程式に基づくこれらの研究は、どちらかと言うと物理的(学術的)興味に基づくものであり、検出器開発という工学的応用を指向したものではなかった。また、分子イオン検出器については、TDGL シミュレーションによる理論研究は行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、TDGL 方程式等を基にした数値シミュレーションにより、超伝導ストリップを用いた単一光子および分子イオン検出器の検出機構を解明し、検出器の動作を再現することにより、超伝導ストリップ検出器を高性能化する理論的設計指針を得ることを主な目的とした。また、数値シミュレーションにより、新規の超伝導デバイスを提案することも目指して研究を開始した。

3. 研究の方法

本研究では、TDGL 方程式、熱拡散方程式、および回路方程式を連立して数値的に解き、超伝導ストリップ検出器の動作を再現する。基本的な方程式の取り扱いについては、単一光子検出器のシミュレーションについて報告している文献 [A. N. Zotova and D. Y. Vodolazov, Phys. Rev. B **85**, 024509 (2012).] を参照した。シミュレーションの対象としては、単一光子検出器と、連携研究者らが実験を行っていた MgB₂ 超伝導ストリップを用いた生体分子イオン検出器とした。

(1) 超伝導ストリップにおける局所的な超伝導状態を記述する基本方程式として、幅 1 μ m 以下の幅の超伝導ストリップにおける超伝導・常伝導転移をうまく記述する簡便な方程式である時間依存 Ginzburg-Landau (TDGL)方程式を採用した。

(2) また、渦糸(量子化磁束)の運動や局所的常伝導転移に伴う発熱による温度上昇および冷却特性も極めて重要な役割を演じるので、局所的温度分布を記述する熱拡散方程式も連立した。

(3) さらに、超伝導ストリップが局所的に常伝導転移してまた超伝導状態に復帰する動作を再現するため、局所的な超伝導ストリップ部分の他に、直列インダクタンスと並列抵抗を考慮した集中定数の回路方程式も連立した。ここで、直列インダクタンスは局所的に常伝導転移する部分以外の長い超伝導ストリップ部分のインダクタンスに相当し、また並列抵抗は測定回路として超伝導ストリップに並列に接続される抵抗に相当する。

4. 研究成果

本研究で行った数値シミュレーションによる主な成果は次の(1)-(5)のとおりである。

(1) 単一光子の検出機構の確認

先ず、先行研究に倣って、単一光子検出器の数値シミュレーションを行った。臨界電流以下のバイアス電流を運ぶ超伝導ストリップに通信波長帯の単一光子(エネルギー ~ 1 eV)が吸収されると、その発熱で局所的に高温となる領域が発生する。その後すぐに渦糸(量子化磁束)と反渦糸(反磁束)の対が生成し、バイアス電流により駆動された渦糸はストリップのエッジへ流れて外へ排出される。光子吸収による初期の発熱が無くなった後も、渦糸は次々と発生して流れていき、その渦糸運動に伴う散逸および発熱によりストリップの温度が上昇し、帯状の局所的な常伝導領域ができる。こうして超伝導ストリップの両端に電圧パルスが発生する。

このように、単一光子検出器において光子吸収から渦糸の発生と運動を経て局所的常伝導転移に至る過程は、すでに先行研究における TDGL 方程式を基にした数値シミュレーションの結果にほぼ一致し、本研究の数値シミュレーション方法が妥当であることを確認した。

(2) 分子イオンの検出機構

次に、単一光子検出器とほぼ同じ基本構造をもつ分子イオン検出器についても、同様の数値シミュレーションを行った。ただし、加速された分子イオンのもつ運動エネルギーは ~ 20 keV 程度であり、単一光子のエネルギーより 4 桁程度大きいことに注意を要する。この場合、分子イオンの膨大なエネルギーにより、超伝導ストリップは渦糸の発生を経る間もなくすぐに局所的に常伝導転移することがわかった。つまり、分子イオンの検出ではいわゆるホットスポットモデルが妥当であり、単一光子の検出においては渦糸運動が重要な役割を演じているのとは対比的であ

る。

また、分子イオンの衝突による発熱が無くなると、冷却によりすぐに温度が低下し、局所的に常伝導転移していた領域も超伝導状態に復帰することが分かった。この結果は、単一光子の場合に、光子吸収による初期の発熱が収まった後でも渦糸運動に伴う発熱により温度上昇を続けるのとは対象的である。

(3) 分子イオン検出器の動作機構

TDGL 方程式に基づくシミュレーションは、超伝導ストリップの一部の領域を計算対象としており、その領域において発生する電圧パルスの振舞は、検出器として測定される電圧パルスの振舞とは異なる。その様子を再現するため、集中定数の回路方程式と組み合わせたシミュレーションの結果を解析した。その結果、分子イオンの衝突により局所的に常伝導転移した部分では $\sim 10\text{ps}$ 程度の時間スケールで局所的な電圧パルスが発生するが、検出器における超伝導ストリップの大部分は超伝導状態のまま電気回路的にインダクタンスとして動作するため、検出器としての出力電圧は $\sim \text{ns}$ 程度の時間スケールで変化する。

先行研究において、局所的に常伝導転移する領域の振舞を時間変化する抵抗でモデル化し、超伝導ストリップ全体をインダクタンスで表現して並列抵抗を考慮する回路モデルが提案されている。この単純な回路モデルにより、超伝導ストリップの一部が常伝導転移した後に超伝導状態へ復帰する様子が再現され、検出器の出力電圧パルスの時定数 $\sim \text{ns}$ は、超伝導ストリップ全体のインダクタンスと並列抵抗で決まることが知られている。我々のシミュレーションでも、検出器の出力電圧パルスの振舞を再現するには、この回路モデルでも定性的には妥当であることを確認した。ただし、回路モデルでは局所的な常伝導転移部分の抵抗値等のパラメータが未知であるが、我々のシミュレーションではその抵抗発生の機構と振舞を明らかにした。

連携研究者(全)は、NTT 物性研と共同で、 MgB_2 超伝導ストリップを用いた分子イオン検出器の開発を行っていた。その出力電圧波形の実験データと本研究における数値シミュレーション結果とを比較したところ、Fig. 1 のように、両者は定量的に一致することを確認した。連携研究者は Nb 超伝導ストリップを用いた分子イオン検出器の開発も行っていたが、 MgB_2 は Nb に比べて超伝導転移温度が高いため、超伝導検出器を動作するための冷凍機を小型化することができる。さらに、 MgB_2 は冷却特性に優れて熱的に極めて安定であるため、検出効率が高い。これらの優れた特長をもつ MgB_2 による分子イオン検出器開発の成果について、本研究による数値シミュレーション研究の成果と併せて、Applied Physics Letters 誌に論文発表を行うとともに

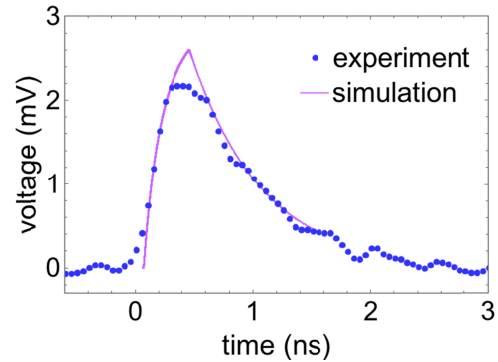


Fig. 1: Voltage pulse in a biomolecular ion detector using superconducting MgB_2 strips: experimental data (dots) and simulation results (lines).

プレス発表も行った。

(4) 新規超伝導検出器・デバイスの提案

上記(1)で述べたとおり、従来の超伝導ストリップ単一光子検出器においては、バイアス電流を臨界電流の90%以上に設定し、光子吸収により渦糸が発生した後、渦糸運動に伴う発熱により局所的な常伝導転移に至り、そのときの電圧パルスをR-L回路において計数するR-L回路の時定数は $\sim 10\text{ns}$ 程度なので、計数率はその逆数の $\sim 0.1\text{GHz}$ 程度である。また、この検出器の時間ジッタは増幅器で決まる $\sim 10\text{ps}$ 程度である。

これに対し、光子吸収直後の渦糸発生を直接検出する新型の単一光子検出器の可能性についても理論的検討を行った。この新型検出器では、渦糸すなわち磁束量子の振舞が重要な役割を演じており、超伝導現象の基本的性質の一つである磁束の量子化(巨視的量子効果)を有効に利用するので、高い検出効率を期待できる。

新型の超伝導単一光子検出器では、光子吸収により渦糸は発生するが常伝導状態に転移しないよう、バイアス電流は臨界電流の60%程度に設定する。こうして発生する渦糸を、単一磁束量子(SFQ)回路により検出する。渦糸の発生と運動の時定数は、数値シミュレーションにより、 $1\sim 10\text{ps}$ 程度であることがわかった。また、SFQも同程度の時定数で動作することが知られているので、この新型検出器の検出時定数は $\sim 10\text{ps}$ 程度で、計数率は $\sim 100\text{GHz}$ 程度であると期待される。この新型検出器の時間ジッタは、SFQ回路で決まる $\sim 2\text{ps}$ 程度であると期待される。このように、光子吸収による渦糸をSFQ回路により直接検出する新型の単一光子検出器は、従来の超伝導ストリップ単一光子検出器に比べて、極めて高い計数率、高い検出効率、低い暗計数率、および短い時間ジッタを兼ね備える優れた特長をもつことが期待される。この新型検出器について理論的に提案し、特許出願を行った。

また、その他のデバイスとして、円孔を設けた超伝導ストリップに直流バイアス電流を流す場合の渦糸運動に関しても、TDGL方程式に基づく数値シミュレーションを行った。直流バイアス電流のもとで、円孔に捕捉される量子化磁束がコヒーレントに振動し、円孔の周囲の環状電流による磁気モーメントが自励発振する現象を見出し、新規テラヘルツ帯電磁波発振器としての可能性を理論的に検討した。

(5) 今後の展開：新型単一光子検出器の実証
上記(4)で述べたとおり、光子吸収により発生する渦糸を SFQ 回路により検出する新型の超伝導ストリップ単一光子検出器は、従来の超伝導ストリップ単一光子検出器に比べて格段に優れた性能を持つことが期待される。今後は、さらに本格的な数値シミュレーションと素子作製および実験により、この新型検出器の実証実験を行う予定である。

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 1 件)

N. Zen, H. Shibata, Y. Mawatari, M. Koike, and M. Ohkubo, “Biomolecular ion detection using high-temperature superconducting MgB₂ strips,” Appl. Phys. Lett. **106**, 222601 (2015), 査読有, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4913844>

[学会発表](計 10 件)

中野侑, 馬渡康徳, 西尾太一郎, 「穴のあいた超伝導ナノストリップにおける量子化磁束の運動」, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 20 日, 東京工業大学大岡山キャンパス

馬渡康徳, 「時間依存 Ginzburg-Landau 理論」, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 量子化磁束動力学シミュレーション研究グループ研究会, 2015 年 9 月 13 日, 名古屋国際会議場

Y. Mawatari and S. Kashiwaya, “Self-exited motion of vortices in superconducting nanostrips with holes,” 12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2015), Sept. 9, 2015, Lyon convention center

N. Zen, Y. Mawatari, H. Shibata, and M. Ohkubo, “Biomolecule ion detection with MgB₂ superconducting strip detectors,” 12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2015), Sept. 9, 2015, Lyon convention center

馬渡康徳, 全伸幸, 柴田浩行, 柏谷聡, 小池正記, 大久保雅隆 「MgB₂ ストリップを用いた分子イオン検出器の TDGL シミュレーション」, 第 90 回 2014 年度秋季低温工学・超伝導学会, 2014 年 11 月 5 日, コラッセふ

くしま

馬渡康徳, 全伸幸, 柴田浩行, 柏谷聡, 小池正記, 大久保雅隆 「MgB₂ 超伝導ストリップを用いた分子イオン検出器のシミュレーション」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 20 日, 北海道大学札幌キャンパス

Y. Mawatari, H. Asai, and S. Kashiwaya, “Numerical simulation on superconducting strip photon detectors based on the time-dependent Ginzburg-Landau equations and two-temperature model,” 2014 Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Aug. 13, 2014, Charlotte convention center

馬渡康徳, 「超伝導ストリップの電磁現象」, 低温工学・超伝導学会東北・北海道支部研究会/第 2 回材料研究会, 2014 年 8 月 4 日, 秋田大学手形キャンパス

Y. Mawatari, H. Asai, and S. Kashiwaya, “Analytical investigation on magnetic-field and current distributions in superconducting strips for modelling of power devices and single photon detectors,” invited, 4th International Workshop on Numerical Modelling of High Temperature Superconductors, May 13, 2014, Hotel Tatra, Bratislava

Y. Mawatari, H. Asai, and S. Kashiwaya, “Time-dependent Ginzburg-Landau simulation on the detection mechanism of superconducting strip photon/ion detectors,” 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Sept. 17, 2013, Magazzini del Cotone, Genova

[産業財産権]

出願状況(計 2 件)

名称：光子検出装置及び光子検出方法
発明者：全伸幸, 馬渡康徳, 藤井剛, 吉川信行

権利者：産業技術総合研究所

種類：特許

番号：特願 2015-123764

出願年月日：2015 年 6 月 19 日

国内外の別：国内

名称：電磁波発振器

発明者：馬渡康徳, 柏谷聡

権利者：産業技術総合研究所

種類：特許

番号：特願 2015-001772

出願年月日：2015 年 1 月 7 日

国内外の別：国内

[その他]

産総研ホームページ, プレスリリース

「二ホウ化マグネシウム超伝導体で生体高分子を検出 省エネ・小型の冷凍機で作動できる超伝導分子検出器」

http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2015/pr20150601/pr20150601.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

馬渡 康德 (MAWATARI, Yasunori)
産業技術総合研究所・電子光技術研究部
門・上級主任研究員
研究者番号：70358068

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

全 伸幸 (ZEN, Nobuyuki)
産業技術総合研究所・ナノエレクトロニク
ス研究部門・主任研究員
研究者番号：20455439

(4) 連携研究者

柏谷 聡 (KASHIWAYA, Satoshi)
産業技術総合研究所・電子光技術研究部
門・首席研究員
研究者番号：40356770