

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22740248

研究課題名(和文) 固体における新しい型の準粒子発現の数理およびその量子デザインへの応用

研究課題名(英文) Novel quasiparticles in solids and quantum design of them

研究代表者

守田 佳史 (Yoshifumi, Morita)

群馬大学・理工学研究院・准教授

研究者番号：10292898

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：低次元超伝導は近年の微細加工技術の発展のなかで新しい光があたりつつある。とりわけ超伝導ナノワイヤは基礎科学から応用の観点まで広い範囲のなかで新しい興味をひいている。ここで低次元超伝導とは1-2次元におけるおおきな量子/熱ゆらぎのなかでの量子物性という一般的な興味から基礎科学から、量子コンピュータなどの最新の応用まで、ひろい裾野をもつ。グラフェンをベースにそのような方向性で成果をえた。

研究成果の概要(英文)：Low-dimensional superconductivity attracts renewed interests in the fashion of modern nanofabrication techniques. In particular, superconducting nanowires (scNW) have attracted much attention recently on both scientific and applied point of view. We made some progress in such directions, based on graphene.

研究分野：理論物理

科研費の分科・細目：物理学・数理物理物性基礎

キーワード：超伝導 カarbonマテリアル

1. 研究開始当初の背景

高度に洗練された**カーボンマテリアルなど半導体の微細加工周辺技術**を、**超伝導体の基礎研究**と組みあわすことによって、**分野横断型の先端的領域**を形成することを旨とする。

研究代表者がおこなってきたエキゾチックな超伝導体における量子渦の電子構造およびダイナミクスの理論研究を進展させて、**カーボンベース超伝導ナノワイヤでの渦の運動の量子デザイン(シミュレーション)**を、実験グループと密接な共同研究下でおこなう。

具体的には、超伝導渦の運動つまり**超伝導量子ビットの自由歳差運動(ラビ振動)のシミュレーション**を目指す。その最終段階として超伝導ナノワイヤと(研究代表者が近年成果を発表してきた)量子ドットとの**ハイブリッド系のシミュレーション、しいては量子情報システムに関する新しい知的資産の形成へ至る。**

2. 研究の目的

近年、高度に洗練された**半導体の微細加工周辺技術**を、**超伝導体の基礎研究**と組みあわすことによって、**分野横断型の先端的領域**が形成される機運がたかまりつつある。まず、それにさきがけ、研究代表者および現在共同研究をおこなっている実験グループの研究をのべる(いずれも該当分野のトップジャーナルに掲載された内容である)。**本研究は研究代表者の背景である理論物理におけるシミュレーションなどによる量子デザインに対応するものであるが、それは、現在共同研究をおこなっている実験グループとの緊密な連絡のもとでフィードバックをかけながらおこなうものである。**

[1] **エキゾチックな超伝導体における量子渦の研究**。これに関して研究代表者は Physical Review Letters をはじめとした雑誌に、第一著者として、ここ十数年前後にわたり成果を継続的に発表してきた。この概念を昇華させて、**カーボンベース超伝導ナノワイヤの文脈でデザイン(シミュレーション)および実装する**というのが、端緒になる。つまり、シミュレーションなどを

ベースにした、研究のグランドデザインおよびその実験へのフィードバックである。共同研究のグループは、

[2] **カーボンマテリアル(カーボンナノチューブやグラフェン)**による、量子ドットなどの微細加工技術、極低温強磁場下での輸送現象および電磁波応答を中心に研究を進めてきた。本研究はこれらが合流したことを背景にもつ。

具体的には、エキゾチックな超伝導体をベースにしたナノワイヤ新規デザイン(および対応する実装/実験技術)である。研究代表者(守田グループ)が**シミュレーションによるグランドデザイン**をおこなう。量子デザインに関しては、カーボン量子デバイスおよび超伝導ナノワイヤデバイスなどの個別技術に関しては、量子シミュレータは既に完成しており、一部予備的な結果を数報論文発表し、14th Edition of the “Trends in NanoTechnology” International Conference (TNT2013), Seville, Spain, 9-13, September (2013)などで**国際会議招待講演**をすでにおこなっている。まとめると量子デザインおよび、デバイス実装の両輪は揃っている。これをベースに統合をおこない、**超伝導渦の運動つまり超伝導量子ビットの自由歳差運動(ラビ振動)のシミュレーション**を目指す。概念的には量子ビットと共振器というふたつの量子二準位系の間の量子もつれ状態の実現である。一方、この方法では、(カーボン)量子ドットと超伝導ナノワイヤの結合も容易であり、これは最終的には全カーボンデバイスに最終的に繋がるはずである。そのような**ハイブリッド系のシミュレーション、しいては量子情報システムに関する新しい知的資産の形成へ最終的には至ることを目指す。**

3. 研究の方法

当初は、予備的研究(我々のカーボン量子ドット形成と対応するシミュレータ)の完成を目指す。また超伝導ナノワイヤの大域的な相図(Global Phase Diagram)などのカタログづくりが最初の課題である。これが今後の研究のベースになる。それら量子シミュレータの結合および、高周波回路をとりこんだシステムのデザインのためのプログラミングおよび計算機環境をたちあげる。シミュレーションを基礎に、作製に成功してる超伝導ナノワイヤの作製条件の最適化を行う。現在すでに測定済みの基礎物性の再現性を確認後に、最初の報告になるレターの投稿準備にはいる。次段階の準備として、高周波回路との結合による、**量**

量子ビットの自由歳差運動(ラビ振動)のシミュレーションを目指す。技術的には量子ビット位置でのマイクロ波強度の増強が重要であるが、これはマイクロ波ラインのオンチップ化を目指すため、そのための電子回路シミュレータも作製する。概念的には量子ビットと共振器というふたつの量子二準位系間の量子もつれ状態の実現である。また測定系は既存の単一電子輸送測定システムにマイクロ波・ミリ波を発生する装置と高周波を極低温・強磁場環境下の測定プローブに導入し、さらにカーボンベース量子デバイスと結合するための共振器系であり、そのためのシミュレータを確立する。そして量子ドット・結合量子ドットの持つ単一電荷を利用した量子状態のコヒーレント制御も実現するため、基礎物性と高周波応答による電子輸送ダイナミクスの研究をおこなう。このような系を我々の量子シミュレータが整合的・定量的に記述できれば系統的な集積化への道が開ける。またそれとは別に、このような実験系が確立すれば、マイクロ波からテラヘルツ領域における電磁波の超高感度・超高分解能検出/量子状態のコヒーレント制御(量子ビット動作)/単電子ロジック回路などの成果も実現できるはずである。

4. 研究成果

平成22年に基礎理論を構築し、平成23年から25年にわたって、実験グループと共同で実装/実験をこころみ、**新しいグラフェン単電子トランジスタ/世界で初めての磁場誘起単一電子輸送の実験に成功した(プレプリント arXiv:1206.4797)**。また半古典理論/シミュレータによる定性的予言/解釈にも成功した。この内容は International Conference “Smart Materials, Structures and Systems”, Montecatini Terme, Italy, 10-16 June, (2012)における**国際会議招待講演**をはじめとした場所で発表をおこなっている。

他に具体的には、(超伝導絶縁体転移をおこすような)エキゾチックな超伝導体新規ナノワイヤデザイン(および対応する実装/実験技術)である。研究代表者(守田グループ)が**シミュレーションによるグランドデザイン**をおこなうのに対し、共同研究者が微細加工技術の粋を用いたナノマテリアルの作製および極限物性実験を担当する。事実、これらのグループは研究代表者のグループと共同で、ナノワイヤなどにおいて対応する共同研究を開始している。ここ数年の研究成果を背景に、全てを合流させ昇華させるタイミングである。量子デザインに関しては、カーボン量子デバイスおよび超伝導

ナノワイヤデバイスなどの個別技術に関しては、量子シミュレータは既に完成しており、一部予備的な結果を数報論文発表し、14th Edition of the “Trends in NanoTechnology “ International Conference (TNT2013), Seville, Spain, 9-13, September (2013)などで**国際会議招待講演**をすでにおこなっている。まとめると量子デザインおよび、デバイス実装の両輪は揃っている。これをベースに統合をおこない、**超伝導渦の運動つまり超伝導量子ビットの自由歳差運動(ラビ振動)のシミュレーション**を目指す。概念的には量子ビットと共振器というふたつの量子二準位系間の量子もつれ状態の実現である。一方、この方法では、(カーボン)量子ドットと超伝導ナノワイヤの結合も容易であり、これは最終的には全カーボンデバイスに最終的に繋がるはずである。そのような**ハイブリッド系のシミュレーション、しいては量子情報システムに関する新しい知的資産の形成へ最終的には至ることを目指す**。我々は実験グループと共同で、下図のような**(超伝導絶縁体転移をおこすような)エキゾチックな超伝導新規体ナノワイヤデザイン(および対応する実装/実験技術)**を確立させているが、古典的な背景もあり、その類似点・相違点に注意して整理する。



まずスズ・マイクロブリッジなどの古典的超伝導ワイヤはマイクロのスケールである。これを我々は現代的アプローチによって、ナノスケールにした。ごく近年リソグラフィ技術を用いて同じ方向性を目指す研究に関してプレプリントが出始めているが、我々はその限界を今回の方法を用いて凌駕している。これはデバイス作製の自由度という観点からも重要だが、臨界点近傍の異常物性を用いた新規デバイスという新領域

作製に繋がる可能性がある。このような視点は、研究代表者が基礎物理学を背景にもつ一方、実験担当者は応用物理学を背景にもち、その間のケミストリーとっていいのではないかと考える。また、この方法では、**(カーボン)量子ドットと超伝導ナノワイヤの結合**の作製が容易であり、これはリソグラフィーでナノワイヤを作製するというアプローチでは複雑な方法をとる必要がある。これは最終的には**全カーボンデバイス**に最終的には繋がるはずである。その際、中心的課題として、超伝導渦の運動に対応して、超伝導量子ビットの自由歳差運動(ラビ振動)のシミュレーションを目指す。実験技術的には量子ビット位置でのマイクロ波強度の増強が重要であるが、これはマイクロ波ラインのオンチップ化のシミュレーションによる実装を目指す。概念的には**量子ビットと共振器というふたつの量子二準位系**の間の量子もつれ状態のシミュレーションおよび実装である。これは本研究グループが、直前の背景として、カーボンナノチューブやグラフェンなどカーボン(単電子)トランジスタのシミュレーション・実装を背景にもちつつ、研究代表者の超伝導研究が合流したということが最大限に活かされている。これは、より系統的なデバイスデザインのための高周波回路との結合を目指すためにも必要不可欠なはずである。臨界点近傍の異常物性を用いた新規デバイスという新領域作製に繋がる可能性がある。このような系を我々の量子シミュレータが整合的・定量的に記述できれば系統的な集積化への道が開ける。またそれとは別に、このような系が確立すれば、マイクロ波からテラヘルツ領域における電磁波の超高感度・超高分解能検出/量子状態のコヒーレント制御(量子ビット動作)/単電子ロジック回路などの成果も実現できるはずである。最終的には、

量子力学的コヒーレンスという基礎物理学的側面をルーツに持ちながらも、究極的には**量子情報システム・単電子エレクトロニクスに関する知的資産の形成**に至ることができると考えている。

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2件)

[1] Y. Morita:
'Breakdown of the Quantum Hall Regime in a 'Confined' Graphene', *Advances in Science and Technology*, 77, 276-279 (2013). (査読有)

[2] S. Moriyama, Y. Morita, E. Watanabe, and D. Tsuya:
'Coulomb Blockade Behaviour in Nanostructured Graphene with Direct Contacts' *Mater. Express* 3, 92-96 (2013). (査読有)

[学会発表](計1件)

[1] S. Moriyama, Y. Morita, E. Watanabe, and D. Tsuya (invited talk):
'Electron transport through field-induced quantum dots in graphene'
14th Edition of the "Trends in NanoTechnology" International Conference (TNT2013), Seville, Spain, 9-13, September (2013).

[図書](計0件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:

権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

守田佳史 (Yoshifumi Morita)
群馬大学・理工学研究院・准教授

研究者番号：10292898

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：