

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740222

研究課題名(和文) 電界誘起量子相の材料・物性展開

研究課題名(英文) Material Search and Investigation of Electronic Properties in Electric-Field-Induced Quantum Phases

研究代表者

笠原 裕一 (Kasahara, Yuichi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10511941

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：従来の化学合成ではなく、電界効果によって実現する物質相、いわゆる電界誘起量子相について、物質探索を行うとともに新しい探索手法を開発した。また、電界誘起量子相の常伝導・超伝導物性や電子状態を解明した。さらに、電界によるスピン制御のための新しいデバイス構造を開発し、スピン流由来起電力の電界によるスイッチングを実現した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have investigated material phases induced by electric field effect, so-called electric-field-induced quantum phases. We have searched new phases and constructed new methods for material search. We found that normal and superconducting properties as well as electronic states in the field-induced phases are markedly different from bulk materials. Moreover, we have developed a new device for spin manipulation. Switching of spin-current-induced voltage by electric field was demonstrated.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：高温超伝導 電界誘起超伝導

1. 研究開始当初の背景

元素置換などの化学的キャリアドーピングは高温超伝導体の発見などに大きく寄与したが、本質的な物性の阻害要因となる欠陥などの導入を避けることは不可能であった。一方で、電界効果トランジスタなどにおいて実現する異種固体界面への静電的電荷蓄積は、物理的キャリアドーピングであり、欠陥を導入しない理想的なキャリアドーピング法と言える。しかしながら、従来の全固体デバイスでは低いキャリア濃度領域(約 10^{13} cm^{-2})しか到達できなかったために、興味深い相転移を創出するには至らなかった。そのようななか、最近、固体と電解液で構成された電界効果トランジスタ、電気二重層トランジスタにおいて界面への高濃度キャリア蓄積(約 10^{15} cm^{-2})が可能となり、電界誘起の絶縁体-超伝導転移が実現した[上野ら、Nature Materials (2009)]。その後、応募者を含む国内外のいくつかのグループによって電界誘起超伝導が発見されただけでなく(全5種、2011年10月現在)電界による強磁性やモット転移などの誘起も実現し、従来の化学的手法に代わる新しい材料探索法が切り開かれた。

そのようななか、我々は、層状窒化物 ZrNCl を用いた電気二重層トランジスタにおける電界誘起超伝導の発見に大きく貢献[Nature Physics (2010)]しながらも、独自に「電気二重層キャパシタのその場磁化測定」を開発することで、コンタクトレスな測定による電界誘起超伝導の発見手法を確立した[Journal of the Physical Society of Japan (2011)]。従来の電気二重層トランジスタにおける障害を越えることができ、より広範な物質へと展開する準備が整ったと言える。

一方、デバイス構造に由来した構造非対称性をもつ界面において強電界のもとに誘起されたキャリアはいわば「反転対称性の破れた二次元電子」であるが、その特徴的な電子状態のもとでの超伝導特性は明らかになっていなかった。バルク超伝導体において反転対称性の破れた超伝導の研究は、超伝導研究の一分野を形成しているにもかかわらず、これまで反転対称性の破れに着眼点を置いた研究は電界誘起超伝導においてはなされていなかった。したがって、このような電子状態の詳細を解明することで、電界誘起量子相の学理を構築する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、電界誘起量子相の材料および物性の飛躍的な展開と電界誘起超伝導の基礎物理の理解を目的とする。具体的な研究課題は以下のようにまとめられる。

(1) 「電気二重層キャパシタのその場磁化測定」による電界誘起量子相の探索

(2) 電界誘起量子相検出のための新手法の開発

(3) 電気二重層トランジスタによる電界誘起量子相の系統的データ収集および反転対称性の破れの影響(電界依存性、パリティ変化)の解明

3. 研究の方法

(1) 「電気二重層キャパシタのその場磁化測定」による電界誘起量子相の探索

独自に開発した「電気二重層キャパシタのその場磁化測定」により、電界によって誘起される超伝導、強磁性、反強磁性、モット転移の探索を行う。扱う材料群は酸化物、層状バンド絶縁体、分子性化合物である。

(2) 電界誘起量子相検出の新手法開発

圧着コイルおよびマイクロ波測定による高感度な交流磁化または電気伝導度の非接触検出法を開発する。

(3) 電気二重層トランジスタによる電界誘起量子相の温度・磁場依存性などの系統的データ収集および反転対称性の破れの影響(電界依存性、パリティ変化)の解明

電界誘起量子相が発見されても、伝導度・磁化などと電場・温度・磁場との関係を知るためにはトランジスタ構造を作製する必要がある。試料形態を単結晶または薄膜とし、電気二重層トランジスタを作製することで、系統的なデータ収集を行い、とくに電場(またはキャリア濃度)との諸物性の関係を明らかとする。上記に付随して、反転対称性の破れに対する影響を渦糸状態、上部臨界磁場などの超伝導特性を通して解明する。

4. 研究成果

(1) 「電気二重層キャパシタのその場磁化測定」による電界誘起量子相の探索として、層状化合物 TiOCl 、銅酸化物 La_2CuO_4 、 $\text{Ba}_2\text{CuOCl}_2$ 、 $\text{CuBa}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_x$ の電界効果を試みたが、新しい電界誘起量子相の発見や超伝導転移温度の上昇には至らなかった。電気二重層トランジスタにおいても同様であり、デバイス構造に関わらない物質ごとの問題があると考えられるが、原因の解明には至らなかった。

(2) スループット向上のために新しい探索手法、「平面コイルによる磁場侵入長測定」を開発した。これにより、既に電界誘起超伝導が報告されている MoS_2 において、非接触検出に成功した。本手法は探索に有用だけでなく、磁場侵入長測定の精密測定から超伝導ギャップ構造の決定が可能であり、反転対称性の及ぼす影響を調べることが可能となった。

(3) 電界誘起超伝導の電気伝導度の温度・磁場依存性や磁場角度依存性により調べ、以下の知見を得た。

層状物質ZrNClやMoS₂を用いた電気二重層トランジスタを作製して電界誘起超伝導を実現し、その上部臨界磁場の角度依存性を測定することにより、超伝導状態が極めて2次元的であり(図1)、超伝導相の厚みが伝導層2層分に相当する約2ナノメートルであることを明らかにした。これは単位胞よりも短いものであり、純粋な2次元超伝導が実現していることを明らかにした。

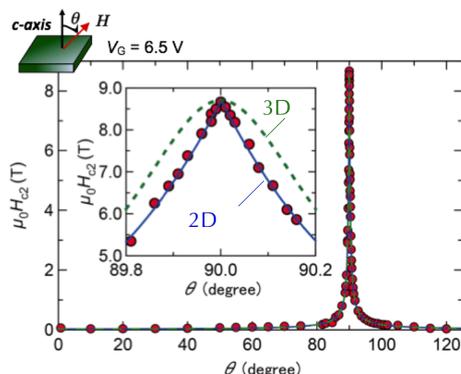


図1: ZrNCl-EDLTにおける上部臨界磁場の角度依存性。

磁場を面内方向に印加した時の上部臨界磁場は、スピン三重項超伝導体で期待されるパウリ極限を遥かに越えており、反転対称性の破れに伴うスピンパリティの混成が起きているだけでなく、スピン三重項状態が支配的になっていることを明らかにした(図2)。

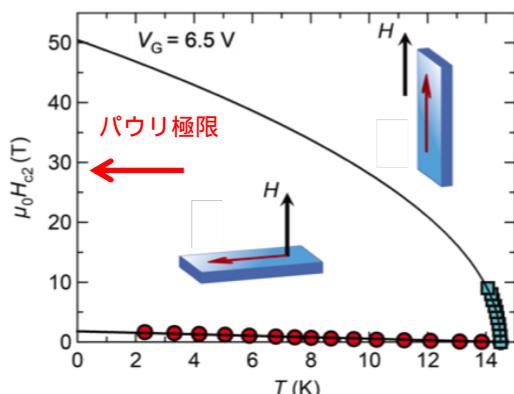


図2: ZrNCl-EDLTにおける上部臨界磁場。

磁場を面直方向に印加した時の超伝導渦糸相図を構築した。従来の乱れの強い二次元超伝導体の渦糸相図とは大きく異なり、渦糸の量子トンネル状態が支配的であることを明らかにした(図3)。

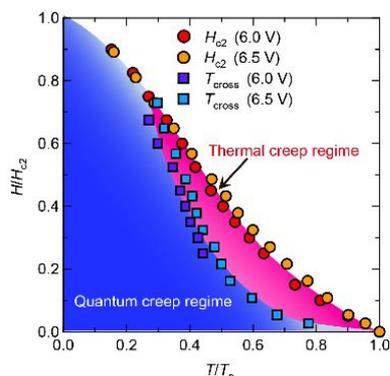


図3: ZrNCl-EDLTにおける超伝導渦井と相図。

(4) 当初予定していた物質探索が当初の期待通りに進まなかったことを受け、その対策として電界誘起量子相の基礎となる二次元電子系の理解、ならびに電界による電子機能の探索を目的とした研究を行った。

電界誘起超伝導の舞台ともなる酸化物界面電子系について、酸化物ヘテロ接合界面に形成される二次元電子の性質はほとんど明らかになっておらず、そのミクロな電子状態の解明が必要不可欠であった。しかしながら、これまでの研究は電気抵抗測定に限定されていた。

MgZnO/ZnOヘテロ接合二次元電子系においてマイクロ波応答を詳細に調べることで、電子相関効果が顕著に現れ、電子相関効果により電子有効質量が大きく増大することを明らかにした [Physical Review Letters (2012)]。

電界効果による純スピン流制御

電気二重層を用いることで半導体物質の電荷キャリア(電子または正孔)の密度を大幅に変調できること、および物質中のスピン輸送は電荷キャリアが担うことに着目し、強磁性体/非磁性体接合と電気二重層トランジスタを組み合わせた新しい素子を開発した。

非磁性体へスピン流を注入した際に起こるスピン流-電流変換に伴う起電力について、炭素材料を非磁性体として用いることで、ゲート制御による起電力のスイッチングを実現した。これまで実現していないスピン流の電場制御であり、炭素材料の有用性および新しいスピントロニクスデバイスへの発展を予見させるものである。

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5件)

(1) J. T. Ye, Y. J. Zhang, Y. Kasahara, and Y. Iwasa, Interface transport properties in ion-gated nano-sheets, European Physical Journal Special Topics、査読有、Vol.222、2013、1185-1201

DOI:10.1140/epjst/e2013-01914-0

(2) Y. Kasahara, Y. Oshima, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, Y. Iwasa, Correlation-Enhanced Effective Mass of Two-Dimensional Electrons in $Mg_xZn_{1-x}O/ZnO$ Heterostructures, Physical Review Letters, 査読有、Vol.109、2012、246401/1-5

DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.246401

(3) Yuichi Kasahara, Yuki Takeuchi, Yoshihiro Iwasa, Bulk superconductivity and fully gapped superconducting state in Ba-doped phenanthrene, Physical Review B, 査読有、Vol.85、2012、214520/1-5

DOI:10.1103/PhysRevB.85.214520

〔学会発表〕(計 29 件)

(1) 齋藤優, 叶劍挺, 笠原裕一, 野島勉, 岩佐義宏, ZrNCl 電界誘起超伝導の 2 次元的な磁束ダイナミクス、日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27 日、東海大学、神奈川県

(2) Y. Kasahara, Y. Takeuchi, T. Ito, Y. Iwasa, D. Arcon, M. J. Rosseinsky, K. Prassides, Spin frustration and magnetic ordering in the Mott insulating fcc- Cs_3C_{60} , American Physical Society March Meeting 2014, 2014 年 3 月 4 日、Denver, Colorado, USA

(3) Y. Saito, J. T. Ye, Y. J. Zhang, Y. Kasahara, T. Nojima, Y. Iwasa, Two dimensionality in electric field induced superconductivity, American Physical Society March Meeting 2014, 2014 年 3 月 6 日、Denver, Colorado, USA

(4) 齋藤優, 叶劍挺, 笠原裕一, 野島勉, 岩佐義宏、電界誘起超伝導の 2 次元性、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 27 日、徳島大学、徳島県

(5) 笠原裕一、 C_{60} 化合物における超伝導-モット絶縁体転移と上部臨界磁場、東京大学物性研究所 短期研究会「極限強磁場科学-場、物質、プローブのリンクから融合へ」(招待講演)、2013 年 11 月 1 日、東京大学物性研究所、千葉県

(6) Yuichi Kasahara, Specific Heat Study of A_3C_{60} Fullerenes near the Mott Transition, Workshop on Superconductivity and Magnetism associated with Geometry and Dimensionality from Organics to Inorganics (SuMO2013) (招待講演)、2013 年 5 月 16 日、東北大学、宮城県

(7) 笠原裕一, 大島勇吾, Joseph Falson, 小塚裕介, 塚崎敦, 川崎雅司, 岩佐義宏、 ZnO 二次元電子系における有効質量の増大と電子相関、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月28日、広島大学

(8) Y. Kasahara, Y. Oshima, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, Y. Iwasa, Correlation enhanced effective mass of two-dimensional electrons in $Mg_xZn_{1-x}O/ZnO$ Heterostructures, American Physical

Society March Meeting 2013、2013年03月20日、Baltimore, USA

(9) 綿重達哉, 下澤雅明, 安元智司, 中村昌幸, 池田浩章, 笠原裕一, 岩佐義宏, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司、重い電子系の電界制御、日本物理学会2012年秋季大会、2012年09月21日、横浜国立大学

(10) 笠原裕一, 竹内裕紀, Xianhui Chen, 岩佐義宏、Baドーピングフェエナレン超伝導体の電子比熱、日本物理学会2012年秋季大会、2012年09月20日、横浜国立大学

(11) Y. Kasahara, Materials science and phase control using electric double layer transistors The 6th International Workshop on Advanced Materials

Science and Nanotechnology (IWAMSN2012) (招待講演)、2012年11月01日、Ha Long City, Vietnam

(12) Yuichi Kasahara, Magnetic detection of field-induced superconductivity, EDLT-Tokyo: an International Workshop on Electric Double Layer Transistors (招待講演)、2012年09月10日、東京大学

〔その他〕

ホームページ等

http://iwasa.t.u-tokyo.ac.jp/member/kasahara/CV_Kasahara.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠原 裕一 (KASAHARA YUICHI)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：10511941