

機関番号：10101

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560313

研究課題名 (和文) 電荷密度波ソリトンデバイスの基礎研究

研究課題名 (英文) Fundamental study for charge-density-wave soliton devices

研究代表者

稲垣 克彦 (INAGAKI KATSUHIKO)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：60301933

研究成果の概要 (和文)：電荷密度波の巨視的量子状態を利用したデバイスについての基礎研究を行った。バルク結晶における非局所伝導の実験と微小結晶試料における電極作成技術についての実験を行った。その結果、擬一次元伝導体 α -TaS₃ における電荷密度波状態に、これまで知られているものとは異なる非局所的伝導が存在することが実験的に明らかになった。この現象は、トポロジカル欠陥の運動として理解することができる。

研究成果の概要 (英文)：Fundamental study for charge-density-wave devices which exploit macroscopic quantum states was conducted. Experiments were performed on non-local transport phenomena of bulk samples and fabrication technique of nanocrystal electrodes. A new type of non-local transport phenomenon was found in the charge-density-wave state of quasi-one-dimensional conductor α -TaS₃. This is explained in terms of motion of topological defects.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：固体物理学・低次元電子物性

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：電荷密度波、ソリトン、電子デバイス

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスは、微細化・集積化によって性能向上を図ることが物理的制約のために極めて困難になってきている。そのために、新しい動作原理にもとづく能動素子の研究が現在盛んに行われてきている。そのなかでも特に重要なのは量子力学的なふるまい、すなわち電子の波動性を積極的に用いた能動デバイスである。マクロ量子現象である用いたデバイスとして超伝導を用いる場合と比較すると、室温において既に電荷密度波を示

す物質が存在することが将来的なメリットになる。たとえば NbS₃ という物質の転移温度は 340K 程度であることが知られている。本研究を行うことにより、究極的には室温動作可能な量子デバイスを実現するための知見を得ることができると考えている。

2. 研究の目的

本研究においては電荷密度波と呼ばれる巨視的量子状態を利用したデバイスについて基礎的な実験を行い、実現の可能性を論じる。

3. 研究の方法

MX₃単結晶は、化学気相輸送法によって育成する。石英管に原材料を規定量入れ、真空に封じ切り、これを温度勾配のついた電気炉中で数時間～数日加熱する。できた結晶は、電子線回折、電気抵抗率の温度依存性によって評価する。

ナノ結晶は、単結晶を有機溶媒中で超音波破碎することによって得ることができる。この試料に対して電子ビームリソグラフィを用いて電の上に正確にマスクをアライメントして、測定用電極を蒸着し、これによって微小領域における電子物性が測定できることを目標にする。

測定用電極をとりつけた微小単結晶を用意し、これを冷却して電子物性の測定を行う。スライディング領域およびソリトン伝導領域における電流-電圧特性の温度依存性を詳細に測定する。

4. 研究成果

電荷密度波転移を起こす o-TaS₃ 結晶について、バルク結晶試料（大きさ 5mm×0.01mm×0.01mm）における非局所伝導についての実験と微小結晶試料（大きさ 100 μm×1 μm×1 μm）における電極作成技術についての実験を行った。

バルク結晶試料については、電荷密度波転移温度より低温において、位相すべり電圧として知られる非局所電場の観測に成功した。さらに位相すべり電圧とは異なる非局所伝導が存在することを実験的に明らかにした。

電荷密度波の非局所的な伝導はこれまで報告されているが、電極における位相すべりによって位相相関が壊されるために、電流注入電極よりも離れたところでは非局所性は現れないのが通常である。また、スライディングを伴わない低電場における伝導は熱励起によって生じた準粒子の寄与によるのでこの領域においては非局所伝導が期待されない。ところが、本研究において、非局所伝導を検出する電極配置において電流電圧特性の温度依存性を測定したところ、電荷密度波転移温度（220K）よりも低温では非局所電圧が検出された（図1）。さらに、これまで知られている位相すべり電圧と比較すると、位相すべりが生じていない低電場領域においてもこの非局所電圧が存在することがあきらかになった。この現象を説明するために、トポロジカル欠陥の運動を考える。電荷密度波の波長が母格子の整数倍に近いとき、波長が母格子に整合して一定間隔でトポロジカ

ル欠陥が導入される現象「ディスコメンシュレーション」が生じる。この系において、広い温度範囲にわたってディスコメンシュレーションが起きることが以前の我々の研究によって明らかになっているので、本研究で発見した非局所伝導はこの際に生じるトポロジカル欠陥の運動の結果と考えるのがもっともらしい（図2）。一方で、は o-TaS₃ の低温における電気伝導はソリトンが支配しているとこれまで提案されている。ソリトン伝導を前提とすると、生成されたソリトンの寿命が長く、電極を通り越してから伝導電子に変換されるような新しいメカニズムが必要となる。

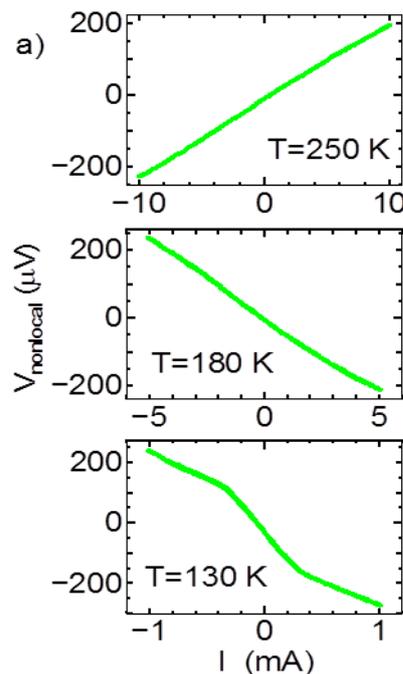


図1 o-TaS₃における非局所電圧

本研究によって発見された、o-TaS₃の電荷密度波（CDW）における新規な非局所伝導について、その詳細を研究した。具体的には、電荷密度波転移温度よりも十分低い温度において、位相すべり電圧の磁場依存性の測定を試みた。位相すべり電圧は直流4端子法で通常の配置と電流・電圧端子を入れ替えたときの電圧差として測定することができる。この測定をT=4.2KにおいてB=4Tまでの範囲で行った。その結果、位相すべり電圧には磁場の影響が現れないことがわかった。さらに、磁気抵抗効果の電流依存性を測定したところ、磁場の影響を受けるのは低電場領域にて伝導を担うキャリアであり、集団運動（スライディング）ではないことがわかった。これは位相すべり電圧に磁場の影響がないという実験結果とつじつまが合っている。

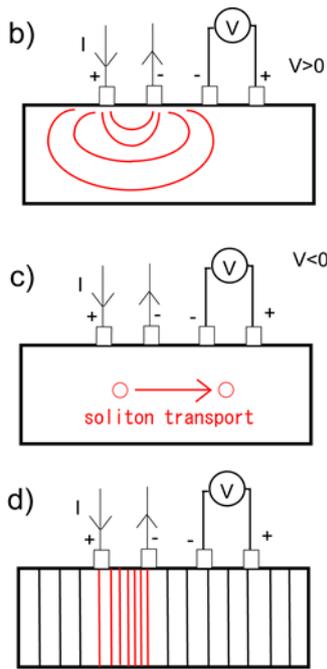


図 2 非局所伝導の模式図

この実験結果を含め、本研究における一連の結果から $o\text{-TaS}_3$ の CDW における非局所伝導について次のようなモデルが提案できる。パイエルス転移温度 ($T_p=220\text{K}$) において非整合 CDW が生じる。温度を下げていくと非整合 CDW と整合 CDW の共存状態が生じる。これは空間的に分離して共存しているので試料中に相境界ができる。相境界にはトポロジカル欠陥が生じ、これが電荷 $\pm 2e$ を持つ (図 3)。トポロジカル欠陥は空間的に動くことができるので、CDW が全体として静止している状況 (位相すべりが起きていない状況) においても電気伝導を担うキャリアとして働く。このキャリアが、トポロジカル欠陥の間の相互作用を反映して非局所伝導に寄与する。すなわち、電流端子間の電位勾配が、それから離れたところにおける電圧端子においても電位勾配として検出される。

以上の結果から、本研究で目的としている電荷密度波デバイスの実現にむけて重要な知見が得られたと考えている。

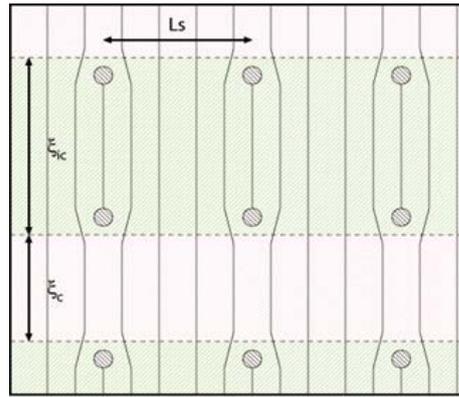


図 3 トポロジカル欠陥を含むディスコメンシレーション構造

電子ビームリソグラフィーを用いた電極幅 $1\ \mu\text{m}$ ・電極間隔 $1\ \mu\text{m}$ の金電極をシリコン基盤上に作成した。この電極の上に微小結晶試料をアライメントして固定する手法を確立した。

電子ビームによる局所加熱法を用いて金電極と試料間の界面抵抗を低減させる実験を行った。電子ビームリソグラフィーを用いてナノ結晶に電極作成を行うと、結晶表面に形成される酸化物などによる絶縁層のため、界面抵抗がきわめて大きくなる。このことを利用して、3端子構造に対して、電子ビームを照射する・しない (あるいは電子ビームの照射量を制御する) ことによってソース・ドレインに必要なオーミック接合と、ゲートとして必要な絶縁電極を作り分けることができると考えた。

そのために、電子ビームによる局所加熱法の条件と界面抵抗の関係を明らかにしようとしたが、再現性の結果は得られなかった。条件によっては試料が損傷してしまうことがあり、プロセスとして制御するということができなかった。

研究計画において予定していた能動デバイスの実験計画については科学研究費の申請期間内に実行することができなかった。これは、界面抵抗の制御について、十分な再現性が得られなかったためであり、今後の課題としたい。

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) K. Inagaki, M. Tsubota, and S. Tanda, “Nonlocal transport in the charge density waves of o-TaS3”, Physical Review B 81, 113101 (2010).

(2) K. Inagaki, M. Tsubota, K. Ichimura, S. Tanda, K. Yamamoto, N. Hanasaki, Y. Nogami, N. Ikeda, T. Ito, H. Toyokawa, “Commensurate-incommensurate transition of charge density waves in o-TaS3”, Physica B: Condensed matter, 404, 396 (2009).

[学会発表] (計 4 件)

(1) K. Inagaki, M. Tsubota, and S. Tanda, “Non-local transport phenomenon in TaS3,” International conference on science and technology of synthetic metals 2010, 2010. 7. 6, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan

(2) 稲垣克彦、坪田雅功、丹田聡「擬一次元導体 o-TaS3 における位相すべり電圧」日本物理学会 2009 年秋季大会、2009. 9. 25、熊本大学、熊本市

(3) 稲垣克彦、東山和樹、丹田聡「ナノスケール電荷密度波系の作成と電子物性 III」日本物理学会第 64 回年会、2009. 3. 7、立教大学、東京都

(4) K. Inagaki, M. Tsubota, K. Ichimura, S. Tanda, K. Yamamoto, N. Hanasaki, Y. Nogami, N. Ikeda, T. Ito, H. Toyokawa, “Commensurate-incommensurate transition of charge density waves in o-TaS3” International workshop on electronic crystals 2008, 2008. 8. 26, Institut d’ Etudes Scientifiques de Cargese, Cargese, France

[その他]

ホームページ等

<http://exp-ap.eng.hokudai.ac.jp/~inagaki/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲垣 克彦 (INAGAKI KATSUHIKO)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：60301933

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし