

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25871196

研究課題名（和文）固体ゲート絶縁体を利用した電界効果による強相関酸化物の電子相制御

研究課題名（英文）Field effect control of electronic phase of strongly correlated electron oxide by using solid gate insulator

研究代表者

浅沼 周太郎 (Asanuma, Shutaro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・研究員

研究者番号：30409635

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：現在、半導体を利用した電子デバイスの小型化が進んでいる。しかし、これらの小型化にも限界が近付いている。そのため、その限界を超えるためにこれまでになかった特性を持った材料を利用したデバイスの開発が進められている。その一つが金属絶縁体相転移と呼ばれる現象を応用したモットトランジスタである。本研究では、NdNiO₃とSmCoO₃と言う二種類の酸化物を利用してモットトランジスタの試作を行い、その性能を比較する研究を行った。

研究成果の概要（英文）：Recently, miniaturization of electronic devices using semiconductors is advancing. However, miniaturization of these devices is approaching their limits. Therefore, the development of the new device using the materials with an unprecedented characteristic is being studied to exceed those limits. One of them is a Mott transistor applying a phenomenon called metal insulator phase transition. In this research, we fabricated Mott transistors which are made of two kinds of oxides, NdNiO₃ and SmCoO₃, and compared their performance.

研究分野：酸化物エレクトロニクス

キーワード：強相関エレクトロニクス 電子・電気材料 電子デバイス・機器 表面・界面物性 強相関電子系

1. 研究開始当初の背景

(1) 情報産業の発達を支えるために半導体素子の微細化が進められているが、微細化に伴うリーク電流の増大やドーパント揺らぎなどの問題から半導体の微細化は限界に近付きつつあると考えられている。このような微細化限界の問題を解決するために、新しい構造や材料を利用した素子、いわゆる beyond CMOS に関する研究が盛んに行われている。その一つの候補として、強相関酸化物の金属絶縁体相転移 (Mott 転移) に伴う抵抗の変化を利用した Mott transistor が検討されている。Mott transistor は、抵抗変化に加え、磁氣的、光学的な特性も大きく変調できる可能性があることから、電子デバイスに新たな機能を付加できると期待されている。また、大量の電子が関与する電子相転移である Mott 転移を利用することから、素子を 10 nm 以下に加工しても微細化による諸問題が顕在化しないと考えられている。

(2) 申請者は、これまでに、イオン液体をゲート絶縁体に用いて物質に電荷注入を行う EDLT (Electric Double Layer transistor) 法を応用することで、(Nd,Sm)NiO₃ は Mn 系等の強相関酸化物と比較して少ない電荷注入で Mott 転移を制御出来ることを見出している。しかし、EDLT 法は液体を利用しているため、チャンネルをナノメートルサイズに加工すると表面張力等の影響でイオン液体とチャンネルの間に空隙が生じてしまい、電荷注入を行うことが出来ないという問題があった。そのため、10nm レベルまで微細加工した (Nd,Sm)NiO₃ をチャンネルに用いた Mott transistor が動作するかを実証する実験は行えなかった。

2. 研究の目的

最終的な目的は、チャンネルに幅 10nm 程度に微細化した (Nd,Sm)NiO₃ 等を用い、ゲートに固体絶縁体を用いた Mott transistor を作製し、動作実証実験を行うことである。ただ、10nm 程度に微細化した Mott transistor において微細化に伴う問題が顕在化していないかを明らかにするためには、微細化の影響が出ないサイズの Mott transistor の動作と比較する必要がある。そのため、上記の最終目的の前段階として、チャンネルにマイクロメートルサイズの (Nd,Sm)NiO₃ を、ゲートに固体絶縁体を用いた Mott transistor を作製し、その特性を明らかにする研究を行った。

3. 研究の方法

本研究は二つの段階から成る。一段階目は、マイクロメートルサイズの固体ゲート Mott transistor の加工プロセスの最適化を行い、電荷注入により EDLT 法を用いた場合と同程度 Mott 転移温度を変化させることを実現することである。加工プロセスの最適化には、固体ゲート材料、固体ゲートの膜厚、ゲート

電極金属材料、ゲート及びチャンネルの形状の最適化が含まれる。二段階目は、一段階目の結果を踏まえ、固体ゲート Mott transistor のナノメートルサイズへの微細化を実現することである。電子ビーム描画装置を用いて 10 nm レベルで制御した微細加工を行うためには、フォトリソ材料及びフォトリソの膜厚の最適化、電子ビームによる描画条件の最適化が必要である。またマイクロメートルサイズで Mott transistor が動作した形状がそのままナノメートルサイズに適用可能とは限らないため、形状の微調整も必要となる。これらの最適化を通じ、10nm ナノメートルサイズで Mott transistor が動作することを実証する。

4. 研究成果

(1)

本研究で開発に取り組んでいる固体ゲート Mott transistor は、チャンネルとゲートが共に酸化物であるため、ゲートに電圧を印加した際にチャンネル - ゲート間で酸素イオンが移動することが考えられる。そのため、素子を流れる電流の変化が、純粋な電荷注入によって誘起されたのか、それとも酸素イオンの移動によって引き起こされたのかを判別するのが容易ではなかった。

そこで、申請者は、HfO₂ をゲート絶縁体に用いた Mott transistor にゲート電圧を印加した際のゲート漏れ電流の変化と HfO₂ を用いた ReRAM の特性を比較することで、Mott transistor のゲートに電圧を印加した際にチャンネル - ゲート間で酸素イオンが移動していないかを確認する実験を行った。

その結果、HfO₂ 内の酸素イオンを移動させるには大よそ 6MV/cm 以上の電界を掛ける必要があることが分かった。

また、文献等より、(Nd,Sm)NiO₃ の酸素欠陥の濃度が増えると、金属相の抵抗率が上がり、絶縁相の抵抗率が下がることが分かった。

これらの結果と (Nd,Sm)NiO₃ に固体ゲートを用いて電荷注入した時の抵抗率の変化を比較した結果、ゲート電圧印加時にもチャンネル内の酸素欠陥濃度は変化していないことが分かった。

(2) 加工プロセスを変化させ作製した複数の Mott transistor にゲート電圧を印加して EDLT 法で注入したのと同程度の電荷注入を行ったが、殆ど Mott 転移温度は変化しないことが明らかになった。この結果から下記のモデルを提案した。

(Nd,Sm)NiO₃ は温度変化に伴い Mott 転移を起こす際に、高温側の斜方晶から低温側の単斜晶に構造相転移することが知られている。EDLT 法の場合は、チャンネルを覆うゲート絶縁体が液体のため電荷注入に伴い結晶を歪ませ Mott 転移を起こすことが出来た。しかし、固体ゲート絶縁体を用いた場合は、チャンネルが固体ゲートで覆われているため、電

荷注入しても固体ゲートによって歪みが抑制され構造相転移を起こすことが出来ず、結果として Mott 転移が誘起されなかったと考えられる。

現在、このモデルを検証するために、構造相転移を伴わずに Mott 転移を起こすと考えられている SmCoO_3 をゲートに用いた Mott transistor の試作を試みている。

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1件)

浅沼周太郎、島久、山崎将嗣、羽山和美、秦信宏、秋永広幸、Impact of inserted Ta ultrathin layer and postdeposition annealing on the forming voltage of Ir/Ti-Ta/HfO₂/TiN/Ti/SiO₂/Si resistive switching devices、JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS、査読有り、54-4、pp.04DD10-1 - 04DD10-3、2015/04

[学会発表](計9件)

浅沼周太郎、Xiang Ping-Hua、山田浩之、佐藤弘、井上公、赤穂博司、澤彰仁、上野和紀、岩佐義宏、川崎雅司、電気二重層ゲートによる強相関酸化物の電子相制御、筆頭・登壇、国内、2012年 秋季 第73回応用物理学会学術講演会、愛媛大学、松山大学、2012/09/11

浅沼周太郎、Xiang Ping-Hua、山田浩之、佐藤弘、井上公、赤穂博司、澤彰仁、上野和紀、川崎雅司、岩佐義宏、(Nd,Sm)NiO₃ 電気二重層トランジスタの動作特性、筆頭・登壇、国内、2012年 秋季 第73回応用物理学会学術講演会、愛媛大学、松山大学、2012/09/12

浅沼周太郎、Xiang Ping-Hua、山田浩之、佐藤弘、井上公、赤穂博司、澤彰仁、川崎雅司、岩佐義宏、Electrostatic Control of Mott Transition in Electrolyte-Gated Correlated Electron Oxide Thin Films、筆頭・登壇、国際、招待講演、The 9th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-IX) & 23rd International Symposium on Fine Chemistry and Functional Polymers (FCFP-XXIII) Confirmed、上海、2013/10/21

浅沼周太郎、秋永広幸、The implementability of Mott transistor and its current status、筆頭・登壇、国際、招待講演、2014 ITRS ERD Emerging Logic Device Assessment workshop、Albuquerque、New Mexico、America、2014/08/28

浅沼周太郎、Xiang Ping-Hua、山田浩之、佐藤弘、井上公、赤穂博司、澤彰仁、上野和

紀、川崎雅司、岩佐義宏、Electric-field control of Mott transition in electrolyte-gated (Nd,Sm)NiO₃ thin film、筆頭・登壇、国際、2012 International Conference on Solid State Devices and Materials、Kyoto International Conference Center、Kyoto、Japan、2012/09/26

浅沼周太郎、Xiang Ping-Hua、山田浩之、佐藤弘、井上公、赤穂博司、澤彰仁、中尾裕則、山崎裕一、村上洋一、上野和紀、川崎雅司、岩佐義宏、Large and hysteretic resistance change in electrolyte-gated (Nd,Sm)NiO₃ thin film、筆頭・ポスター、国際、The 19th Workshop on Oxide Electronics (WOE19)、Apeldoorn、Netherlands、2012/10/01

浅沼周太郎、Xiang Ping-Hua、山田浩之、佐藤弘、井上公、赤穂博司、澤彰仁、上野和紀、川崎雅司、岩佐義宏、Electric-field control of Mott transition in (Nd,Sm)NiO₃ electric double layer transistor、筆頭・登壇、国際、Advanced Metallization Conference 2012、Tokyo、2012/10/25

浅沼周太郎、島久、山田浩之、井上公、赤穂博司、秋永広幸、澤彰仁、Electric-field control of metal-insulator transition in (Nd,Sm)NiO₃ films using high-k gate dielectrics、筆頭・登壇、国際、the 2013 JSAP-MRS Joint Symposia、京都、2013/09/20

浅沼周太郎、島久、山崎将嗣、羽山和美、秦信宏、秋永広幸、The impact of inserted Ta ultra-thin layer on the resistive switching voltage in Ir/Ti-Ta/HfO₂/TiN/Ti/SiO₂/Si devices、筆頭・ポスター、国際、46th International Conference on Solid State Devices and Materials、茨城県つくば市、2014/09/10

[産業財産権]

○取得状況(計2件)

名称：ペロブスカイト型の複合酸化物をチャンネル層とする電界効果トランジスタ及びこれを利用したメモリ素子

発明者：澤彰仁、浅沼周太郎、井上公、佐藤弘、赤穂博司、山田浩之、岩佐義宏
権利者：国立研究開発法人産業技術総合研究所

種類：特許

番号：特許第 5552638 号

出願年月日：平成 22 年 5 月 14 日

取得年月日：平成 26 年 6 月 6 日

国内外の別：国内

名称：ペロブスカイト型の複合酸化物をチャンネル層とする電界効果トランジスタ及びその製造方法と、これを利用したメモリ素子
発明者：山田浩之、向平華、澤彰仁、井上公、佐藤弘、浅沼周太郎、赤穂博司
権利者：国立研究開発法人産業技術総合研究所

種類：特許

番号：特許第 5633804 号

出願年月日：平成 22 年 11 月 26 日

取得年月日：平成 26 年 10 月 24 日

国内外の別：国内

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅沼 周太郎 (ASANUMA, Shutaro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・研究員

研究者番号：30409635

(4) 研究協力者

澤 彰仁 (SAWA, Akihito)

井上 公 (INOUE, Isao)

山田 浩之 (YAMADA, Hiroyuki)

佐藤 弘 (SATO, Hiroshi)

渋谷 圭介 (SIBUYA, Keisuke)

島 久 (SHIMA, Hisashi)