

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06006

研究課題名(和文) 原子薄膜を用いた電氣的極性可変トランジスタの開発

研究課題名(英文) Polarity-controllable transistors on atomically-thin film semiconductors

研究代表者

中払 周 (Nakaharai, Shu)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主幹研究員

研究者番号：90717240

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：集積回路の消費電力低減が期待される極性可変トランジスタの実現のためには、真性半導体材料に電子と正孔の両方が注入される必要がある。この目的で最適な遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体材料として、相二テルル化モリブデンに着目し、この物質におけるフェルミ準位ピンニングが弱いこと、即ちコンタクトの金属種を変えることで電子と正孔の両方の注入が可能になることを明らかにした。これにより、極性可変トランジスタにおいてこれまで問題であったn型とp型の駆動電流値のアンバランスの問題が解消される。

研究成果の概要(英文)：Polarity-controllable transistors are expected to reduce the power consumption in LSIs, and for the realization of such devices, both electrons and holes must be injected into the intrinsic semiconductor channels from metal contact electrodes. For this purpose, we focused on alpha-phase molybdenum ditelluride (MoTe₂), a transition metal dichalcogenide semiconductor. It was found that in MoTe₂ the Fermi level pinning effect is much weaker than other semiconducting materials, and therefore, the type of injected carriers from Schottky junction can be changed by changing the metal of contacts. As a result, the unbalance of drive currents in n- and p-type modes of polarity-controllable transistors will be overcome.

研究分野：半導体工学

キーワード：トランジスタ 2次元物質 極性制御 ショットキー接合 低消費電力

1. 研究開始当初の背景

(1) トランジスタのスケーリングの限界を超える技術が様々な提案されてきたが、多くは従来の動作原理の延長である。これらの現状の技術の延長では、原理的に情報処理における世界的な消費エネルギー量の爆発的増大には対応し得ない。従って、これまでにない動作原理に基づいた、新概念の情報処理技術による総消費電力削減の努力を続けることが求められる。

(2) グラフェンに始まる新しい2次元物質の出現は、その究極の薄膜構造に起因した利点の応用により、新しいトランジスタ技術の研究開発を促した。それにより、従来のSi-on-Insulator構造やFin-FET構造に基づくチャンネル層の薄膜化による完全空乏型チャンネルの更に究極のチャンネル層の形として、チャンネル層全体が伝導電荷を伝達し得るオン状態を形成するVolume-inversion型に類似するチャンネルが実現し得る。これは、従来の3次元結晶を薄膜化させたチャンネルで致命的な障害となっていた、界面ラフネスやチャンネル膜厚のゆらぎに起因する性能劣化の問題を、根本的に解決する可能性がある。しかしながら、遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体薄膜はその応用の検討が始まったばかりであり、トランジスタ応用のためには様々な問題を克服する必要がある。例えば、金属との接合に形成されるショットキー接合の問題や、キャリアドーピングの問題など、多くの課題が山積しているのが現状である。

2. 研究の目的

(1) 従来技術の延長ではない新しいトランジスタの動作原理として、従来からその可能性が指摘されてきた極性可変トランジスタの実現に向けた、基本的な技術の構築を行う。この極性可変トランジスタとは、一つの素子において、そのトランジスタ極性を電気的な信号で変換しつつ、トランジスタ動作を可能にするというものである。このようなトランジスタを実装し、新しい回路アーキテクチャを工夫することで、従来の極性固定トランジスタによる回路と比べてトランジスタ数の削減や、演算の簡素化によって、約4割もの消費電力が低減できることが理論的に指摘されてきていた。このような大きな可能性を秘める極性可変トランジスタの実現のためには、対称性のよいアンバイポーラトランジスタが必要である。即ち、ゲート電界の極性によって、電子の伝導と、正孔の伝導が同等な駆動電流を示す必要がある。従来、このようなアンバイポーラ特性を示す適切な半導体材料がなく、電子側と正孔側でのオン電流のアンバランスが一桁以上も残ってしまうことが、極性可変トランジスタの実現を妨げていた。本研究では、このような極性可変トランジスタに最適なアンバイポーラトランジスタを探索し、そのアンバイポーラ特性を

最大限に最適化する筋道をつけることが目的である。

(2) 遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体材料の薄膜トランジスタを用いて、アンバイポーラ特性を最大化するための研究を行う。これらの薄膜半導体材料においては、金属とのショットキー接合におけるショットキーバリアを介した伝導電荷の注入、およびチャンネル層のドーピングの問題が想定されるが、本研究においてこれらの問題の解決を試みる。

3. 研究の方法

遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体材料において、特にショットキー接合の制御に基づいたキャリア注入を工夫することにより、最適なアンバイポーラ特性を有するトランジスタ技術を実現する。そのために、以下の要素技術開発を行った。(1) 遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体材料の中からもっともアンバイポーラ特性に優れた材料を選定する。ここでは、一般的な半導体材料におけるショットキー接合に共通して現れるフェルミ準位ピンニングの問題を、如何にして回避するか、にフォーカスする。従来知られている典型的な遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体材料である二硫化モリブデンや二セレン化タングステン等においては、このフェルミ準位ピンニングの効果が非常に強いことが知られていた。しかし、仕事関数が比較的小さなチタンに対しても、他の遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体よりも比較的良好なアンバイポーラ特性を示していたアルファ相二テルル化モリブデン($\alpha\text{-MoTe}_2$)においては、ショットキー接合の特性は明らかにされてきていない。そこで、この $\alpha\text{-MoTe}_2$ におけるショットキー接合の特性およびそのフェルミ準位ピンニングの制御に着目する。(2) その $\alpha\text{-MoTe}_2$ のショットキー接合において、目的に最適な金属種の選定、更には、極性可変トランジスタへの応用において最適なコンタクト形状の探索を行う。それによって、現状で最も理想的なアンバイポーラ特性を得られるトランジスタ構造を探索する。(3) 最適なゲート絶縁膜技術等の要素技術を更に深める、等の方法を用いる。

4. 研究成果

遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体材料のうち、最もアンバイポーラ特性が良好であった $\alpha\text{-MoTe}_2$ に着目し、そのショットキー接合におけるフェルミ準位ピンニングの効果の詳細について、非常に重要な知見を得た。 $\alpha\text{-MoTe}_2$ のバルクの単結晶を粘着テープで剥離した数原子層のフレークをシリコン基板上に転写して(シリコン基板はその表面を熱酸化して285nmの酸化膜がゲート絶縁膜として使用される)、様々な金属を蒸着することによりショットキー接合を有するバックゲート型トランジスタを形成した。そのトラン

ジスタに対して、バックゲート制御によるトランジスタ動作をさせたところ、コンタクトの金属がチタン、ニッケルの場合に n 型トランジスタとして、金、パラジウムの場合にアンバイポーラトランジスタとして、白金の場合に p 型トランジスタとして動作することが明らかになった。このように、同一の遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体薄膜上で、金属種による注入電荷の極性を制御した例はなく、世界に先駆けた成果であると言える。ここで、金やパラジウムにおいて伝導電荷が電子の場合と正孔の場合においてほぼ同レベルの駆動電流が得られているが、しかし極性可変トランジスタ応用に最適とは言えない。これらの場合、電子側、正孔側のオン電流が、チタンやニッケルの n 型の接合のオン電流と白金の場合のオン電流に比べて一桁程電流値が低いという点で問題である。従って、アンバイポーラであってもそのまま極性可変トランジスタの電極に使うことは最適解とは言えない。

これらの金属コンタクトにおける電荷の注入特性の詳細を更に深く知るために、これらの材料系で一般的に用いられるフラットバンド条件の抽出によるショットキーバリア高の評価を行った。このバリア高の抽出においては、電流電圧特性の温度依存性の評価を行った。それにより熱イオン放出の理論に基づいた電荷の注入バリア高を計算するが、この注入バリア高はゲート電圧によって変化する。この場合、注入バリア高がショットキーバリア高と一致する条件がフラットバンド条件であり、注入バリア高のゲート電圧依存性の変化から抽出される条件である。各種金属コンタクトに対するショットキーバリア高を表 1 に示す。ここで、ショットキーバリア高は上記手法の適用が可能な場合はゲート電圧制御で熱活性的な注入過程に至り得る条件下のみであって、ミッドギャップ付近にフェルミ準位が位置すると推定される金、パラジウム電極の場合は適用されないことを注記する。チタンとニッケルにおいてショットキーバリア高は伝導電子帯端から、白金においては価電子帯端から測ったものである。

表 1 . 各種金属と $\alpha\text{-MoTe}_2$ との障壁高

金属種	バリア高	キャリア型
Ti	40 meV	N 型
Ni	100mev	N 型
Pd, Au	(Mid gap)	アンバイポーラ
Pt	50 meV	P 型

これらの結果から解るように、 $\alpha\text{-MoTe}_2$ においてはフェルミ準位ピンニングが非常に弱いことが特徴的である。特にチタンと白金のフェルミ準位からピンニング因子を計算すると、およそ 0.7 となった。これは、二硫化モリブデンの 0.1 やシリコンの 0.3 といった値と比べると、顕著に大きい値であり、 $\alpha\text{-MoTe}_2$ において非常に特徴的である。仕事

関数の大きさから推測されるニッケルの接合の極性は中性的となるのだが、実験結果は予想に反して強い n 型を示した。これは、ニッケルの $\alpha\text{-MoTe}_2$ との界面における反応性の強さを反映したものと推測することも可能である。即ち、チタンやニッケルにおいては、界面による反応で界面状態を形成し、その結果、二硫化モリブデンと同様に伝導帯端付近に強くピンニングされること、一方で金やパラジウム、白金といった反応性の低い金属に対しては界面状態を形成し難く見かけ上フェルミ準位ピンニングが弱く現れる、と考えることも可能である。この現象については、今後界面に化学状態等の詳細は分析・検討が必要と考えられる。

これらの研究成果によって得られた知見を極性可変トランジスタに応用するために、特にアンバイポーラ特性を最適化するためのアイデアとして、以下のようなハイブリッドコンタクトの概念を提案、実証した。 $\alpha\text{-MoTe}_2$ においては、金属種によって注入電荷の種類(電子か正孔)を選べるという利点があるが、極性可変トランジスタにおいては真性半導体のチャネルにゲート電圧の極性に従って両種の電荷が注入される必要がある。即ち、負のゲート電圧に対して正孔が、正のゲート電圧に対して電子が注入されなくてはならない。もし、例えばチタンをコンタクトに選んだ場合は、電子の注入特性は良好であるが、正孔の注入ができないということになって、アンバイポーラにはならず、極性可変トランジスタはできない。そこで、 $\alpha\text{-MoTe}_2$ に対して n 型のコンタクトであるチタン電極と、p 型のコンタクトである白金電極を「並列して」形成するというハイブリッドコンタクトを提案した。これによって、ゲート電圧の極性によって電子がチタン電極から、正孔が白金電極からそれぞれ注入可能となる。このようなハイブリッドコンタクトの素子を実際に試作して、これをチタン電極のみの素子(n 型)と白金電極のみの素子(p 型)の電流電圧特性と比較した。その結果、これらの特定の極性のトランジスタのオン電流と、ハイブリッドコンタクトの両側のオン電流は非常によい一致を示しており、想定された通りの最適化されたアンバイポーラ特性を示している。現在のところこのハイブリッドコンタクトこそが、極性可変トランジスタ応用のために最適な素子構造を与えると考えてよい。

本研究の成果によって、これまでの極性可変トランジスタにおける、n 型と p 型のオン電流レベルのアンバランスの問題は回避され、極性可変トランジスタ実現のための大きな一歩を示した。しかし、遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体材料における共通の課題として、電荷のドーピングとゲート絶縁膜の選定という問題が残る。それらのうち、電荷のドーピングについては、極性可変トランジスタは電界ドーピングを適用するが、それ

にしてもゲート絶縁膜の選定は、トランジスタ技術一般において常に重要な課題である。本研究においては、蒸着による二酸化シリコンや、原子層堆積法による酸化アルミニウムの堆積を試みた。しかし、蒸着による二酸化シリコンではチャンネルの伝導特性の劣化が進むこと、原子層堆積法による酸化アルミニウムでは電荷の移動度が改善されたもののチャンネルを強く電子ドーピングしてしまうことで p 型特性が得られなくなってしまうこと、といった問題が解決されずに残ることとなった。この課題については、遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体材料の利用に向けた研究開発に共通の課題として、広く探索の手を広げていく必要があると言える。

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)

S. Nakaharai, M. Yamamoto, K. Ueno, K. Tsukagoshi, "Carrier Polarity Control in α -MoTe₂ Schottky Junctions Based on Weak Fermi-Level Pinning", ACS Applied Materials & Interfaces 8, pp.14732-14739 (2016). (査読有) DOI: 10.1021/acsami.6b02036

[学会発表](計 6 件)

Shu NAKAHARAI, "Carrier Type Control of Transition Metal Dichalcogenide Semiconductors for Advanced CMOS Applications" 2017 International Workshop on Dielectric Thin Films (IWDTF). 2017

Shu NAKAHARAI, "Two-Dimensional Materials for Future Low-Power Consumption Electronics" ICFNN-2017. 2017

Shu NAKAHARAI "Transition Metal Dichalcogenide Semiconductors for Low-Power Nanoelectronics" 4th Malaysia 2D Materials and Carbon Nanotube Workshop. 2016

Shu NAKAHARAI, Mahito YAMAMOTO, Keiji UENO, Kazuhito TSUKAGOSHI. "Weak Fermi Level Pinning Effect in Schottky Junction of α -MoTe₂" APS March Meeting 2016. 2016

中払周, 山本 真人, 上野 啓司, リン イェン フ, 黎 松林, 塚越 一仁. 「遷移金属ダイカルコゲナイド α -MoTe₂ のショットキー接合における注入キャリアの極性」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会. 2015

中払周, 飯島智彦, 小川真一, 八木克典, 原田直樹, 林賢二郎, 近藤大雄, 高橋慎, 黎松林, 山本真人, 林彦甫, 上野啓司, 塚越一仁, 佐藤信太郎, 横山直樹, 「原子薄膜の電氣的極性可変トランジスタ」

第 182 回 表面・界面・シリコン材料研究委員会研究集会. 2015

[図書](計 1 件)

中払周 「遷移金属ダイカルコゲナイド半導体 α -MoTe₂ のトランジスタ極性制御」シーエムシー出版 カルコゲナイド系層状物質の最新研究. 第 3 編 第 2 章 pp.204-216 (2016)

[産業財産権]

なし

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

中払周 (Shu Nakaharai)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主幹研究員

研究者番号: 90717240

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()