

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名: 新しい量子効果スイッチの機能素子化

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名:

研究代表代行 中山 知信(物質・材料研究機構 ナノマテリアル研究所 アソシエートディレクター)

主たる研究参加者

長谷川 剛 (物質・材料研究機構 ナノマテリアル研究所 アソシエートディレクター)

桑原 裕司 (大阪大学 大学院工学研究科 助教授)

川浦 久雄 (NEC基礎研究所 主任研究員)

保坂 純男 (群馬大学 教授)

3. 研究内容及び成果:

半導体集積回路において、スイッチは基本的な機能要素である。半導体エレクトロニクスの分野では、スイッチに共通する特徴は、固体構造を変えず電子状態を変化させることによって電気抵抗変化を制御するという点である。本研究(SORST)では、これとは異なり、原子レベルの固体構造変化を制御することによって電気抵抗を制御するタイプの原子スイッチを扱う。

本研究に先立つ科学技術振興事業団・戦略的基礎研究事業(CREST)の「人工ナノ構造の機能探索」研究において、固体電気化学反応を用いて、固体電解質電極と金属電極の間で金属原子架橋の形成と消滅を制御する新しい機構で動作する量子効果スイッチの開発に成功した。「量子電導原子スイッチ」(Quantized-Conductance Atomic Switch; QCAS)と名付けられたこのスイッチは、ナノスケールの間隙をもつ2つの電極が原子クラスターによって架橋されるとき、その電気伝導度は量子化されて離散的な値しかとり得ないという物理と、その原子クラスターの原子数を電圧制御によって可逆的に制御できるようにしたという新しい技術開発を組み合わせて実現された。QCASの特筆すべき特徴は、電気伝導度の量子飛躍を利用しているにもかかわらず、室温で、空気中において、弁別性良好なスイッチングを、0.01V程度の低電圧によって、10GHz程度の高速度(理論予測)で行える可能性がある。さらに、このスイッチは、作製法において単純であるため集積化などに適している。

つまり、QCASは、次世代のナノエレクトロニクスを牽引する重要な要素技術となるだけでなく、省エネルギー、高速化を目指す現在のエレクトロニクスにおいても十分に有用なスイッチとなる可能性が高い。そこで、QCASを用いた新しい演算素子などの機能素子を実現することを、本研究(SORST)の目標とした。

研究推進においては、物質・材料研究機構が「機能素子基本性能開発」、大阪大学が「機能素子構造安定研究」、NEC基礎研究所が「機能素子加工技術開発」、群馬大学が「機能素子物質合成研究」を担当した。以下では内容毎に研究概要をまとめる。

1) QCASの動作原理の詳細説明と構造・材料の最適化に関する研究 (物質・材料研究機構、大阪大学、群馬大学)

QCASは、固体電気化学反応を用いて、固体電解質電極と金属電極の間で金属原子架橋の形成と消滅を制御することで動作する。最適な固体電解質材料の広範な物質探索(実験を通しての探索)を行った。その結果、当初の Ag_2S に加えて硫化銅(Cu_2S)が優れた特性を持つことを確認した。動作原理の詳細説明に特に力を入れて研究を進め、開発した多探針走査トンネル顕微鏡により、電極間における原子架橋の形成・消滅の実時間観察に成功し、スイッチング現象が原子架橋の形成・消滅によっていることの直接的な証拠を得た。また、量子電導を示すスイッチの探索を精力的に行った結果、新しい原理で動作していると考えられる量子電導スイッチの開発に成功した。

2) QCASの集積化・回路化に関する研究 (NEC基礎研究所、物質・材料研究機構、群馬大学)

実用化をはかるためには、生産性の高い微細加工技術を用いて集積化を実現する必要がある。デバイス構造と材料の最適化により、固体中に金属原子架橋を形成できることを見いだした。NECのグループが中心となり、従来デバイスとの混載も容易なギャップレス構造のQCASの集積化研究を進めた結果、少なくとも30nm角/スイッチまで微細集積化可能な技術の開発に成功した。QCASは単にサイズが小さいだけでなく、特異な状態保持能力を有するので、従来にない回路設計も可能となる。QCASの特異な性質を活かした、集積回路としてプログラマブルな論理回路を目指したクロスバースイッチをマイクロファブリケーションの手法で作製し、その動作を実証した。

3) 多探針STMの開発と利用に関する研究 (物質・材料研究機構、大阪大学)

QCASに限らずナノデバイスの創成には、動作実証を始めとして、その基本電気特性の測定が不可欠である。このために、CREST「人工ナノ構造の機能探索」研究時代からのナノデバイスへの直接的なアプローチを可能にする多探針走査トンネル顕微鏡の開発をさらに進めた。その結果、走査電子顕微鏡(SEM)と複合化した多探針STMを立ち上げ、1)で述べた原子架橋の形成と消滅の直接観察に成功した。この他、多探針STMは、QCAS開発のあらゆる場面に用いられている。ナノデバイスの開発において、多探針STMが極めて有効であることを実証できた。

4. 事後評価結果

4 - 1. 外部発表、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果

本研究は、CRESTの成果である“量子電導原子スイッチ“(Quantized-Conductance Atomic Switch; QCAS)とよぶ新しい量子効果スイッチを用いた実用的デバイスの開発を目指して行われた。3年の研究期間で、実用デバイスに近づけるために、材料探索を行い、ナノスイッチ

アレイに適したデバイス構造を検討した。実用的な材料としてCu₂Sを見出したこと、それを用いて接合型原子スイッチの作成によりクロスバースイッチ回路を実現して、プログラム可能なセルベース集積回路試作など、実用可能と思われるレベルまで持ってきたことは、高く評価できる。ただし、実用化を現実のものとするには、閾値電圧を揃えとか、信頼性の実証などの問題を解決する必要がある。そのために、Ag₂SやCu₂Sでの電流による表面への原子の析出とその逆過程のミクロな原子過程の機構解明など基礎的な面で、まだやるべきことを多く残している。また、高速のスイッチングスピードの可能性実証に関しては、GHzレベルが達成できるとしているが、その根拠となる確実な実証データが得られておらず、理論的根拠も明らかにされていないなど、進展がはかばかしくない。

目標の一つである多探針STMの研究に関しては、それを用いた原子架橋の様子の直接観察や伝導度の測定など、物理の基礎的な性質の解明にも相応の努力がなされ、一応の進歩は見られるが、装置開発の進展では、期待を十分に満たすものとは言えない。ただし、このプロジェクトで完成した多探針STM装置は、内外の類似装置の中で一流であり、今後の成果は、大いに期待できる。

研究の遂行に関して、研究チームに半導体関連企業の研究開発グループを加えた研究体制作りは、的確であった。企業グループが実用化デバイス開発に果たした寄与は、極めて大であった。ただし、途中で中心グループが所属変更で引越しするとか、研究代表者が他のプロジェクトの代表者になるとか、集中的な研究遂行に好ましくないことが、いくつかあり、研究推進がやや散漫になったところが見受けられる。

論文の発表は、少ないと言わざるを得ないが、プロジェクト目標が、実用化であり特許戦略が重視されたとも考えられる。今後の発表に期待できる。

4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

古典的な材料であるイオン伝導体において、バルクから表面へ、またその逆の原子移動の制御による原子レベルのスイッチの作成という興味深い提案は、科学的に、また、技術的に大変興味深く、しかも、実用への期待を十分に抱かせるものになっている。性能的にも他の候補とくらべて優れている点が多く、基礎研究が実用までつなげる数少ない例になると思われる。

今回、試作されたプログラム可能なセルベース集積回路は、配線組み換えのスイッチ動作として要求されるスイッチングスピードは、100KHz程度であり、本原子スイッチで十分に達成できるものである。その上、スイッチサイズが小さくチップ面積の小型化、低コスト化ができること、ON状態での抵抗が小さく高速の信号伝搬に有利であるなどの実用的利点が極めて大きい。従って、閾値電圧を半導体素子に合わせ込んで均一に揃えとか、信頼性を確保するなどの技術的な進展がさらに進めば、実用デバイスとして、市場性の高い、モバイル機器、デジタルテレビなどの電子機器に広く使われることが期待できる。

CRESTプロジェクトで発明され、本プロジェクトで実用化に向けて進展した本原子スイッチは、国

の内外で他に例を見ない日本発の新しい発想に基づく研究成果であり、今回のプログラマブルロジック以外にも、応用の方法を工夫することによって、半導体素子を補完する多様な半導体集積回路デバイスとして、将来の半導体産業へ大きく貢献することが期待できる。

4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

- 1) 青野正和研究代表者は2002年12月に科学技術振興機構の国際共同研究の代表研究者として「ナノ量子半導体アレイ」のプロジェクトを進めることになった。これに伴い、継続研究は中山知信研究代表代行のもとに遂行された。
- 2) 本プロジェクト期間中に本プロジェクトの主要グループ(理化学研究所青野グループ)が研究機器と共に物質・材料研究機構に移転した。
- 3) 受賞
青野正和 米国真空学会(American Vacuum Society : AVS)フェロー
(受賞年月:平成15年11月5日)