

[研究助成 (A)]

超低消費電力リアルタイム学習を可能にする 二次元半導体光電子メモリの開発



研究代表者

関西大学

准教授

山本 真人

2241031

[研究の目的]

近年の人工ニューラルネットワークに基づく深層学習の発展は、人間の認知機能を凌駕する情報処理を可能にした。一方で、深層学習は学習プロセスにおいてビッグデータの利用が必要不可欠であり、その電力コストと時間的コストの高さが課題となっていた。深層学習におけるエネルギーコストの高さは、ニューラルネットワークの中間層を構築するにあたり膨大な量の積和演算を繰り返す必要があることに由来する(図1a)。したがって、リアルタイムかつ低エネルギーコストでの学習を実現するためには、膨大な量の積和演算を必要としない機械学習手

法が必要となる。

近年、時系列データを用いて学習が可能なりザバーコンピューティングが注目を集めている。リザバーコンピューティングは、深層学習における中間層の代わりに短期記憶性と非線形性を有するリザバー層を置き、入力データを高次データに変換する。その結果、リザバーコンピューティングにおける学習はリザバー層と出力層の間のみで行えば良く、学習におけるコストを大幅に低減させることが出来る(図1b)。

リザバー層は、短期記憶性と非線形応答を示すデバイスによって物理実装が可能である。また、リザバーデバイスがセンサーの機能を有すれば、それ自体が入力層の役割も果たすこともでき、人間のように感知から学習までをリアルタイムかつ低消費電力で行えるAIエッジデバイスへの応用が期待できる。

本研究では、超低消費電力リザバーデバイスと超高感度光センサーとしての機能を併せ持つデバイスを創出することで、視覚情報からリアルタイム学習が可能なインセンサーリザバーコンピューティングの実現を目的とした。

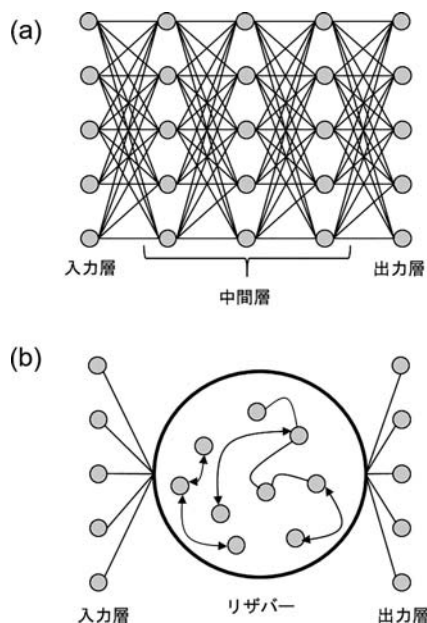


図1 (a) 深層学習と (b) リザバーコンピューティングの概念図

[研究の内容, 成果]

本研究では、原子レベルの薄さに由来して非常に表面敏感な性質を持つ二次元半導体の一種である黒リンを用いることでインセンサーリザバーデバイスの作製を試みた。黒リンは図2に示すように、リン原子から成る屈曲したシート

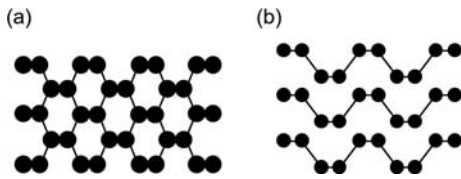


図2 黒リンの結晶構造の (a) 上面図と (b) 側面図

状の結晶がファンデルワールス力によって積み重なった、層状物質である。

黒リンは層数によってバンドギャップの大きさが 0.3 eV から 2.0 eV まで変化する直接遷移型の半導体である。また、黒リンは代表的な二次元半導体である遷移金属ダイカルコゲナイドを凌駕する高い移動度を示すことから、様々な波長の光に対して高感度かつ高速で応答するセンサーへの応用が期待されている。一方、リザーバーとしての機能は多値電荷トラップメモリ構造において実現可能である。電荷トラップメモリはトラップ層に電荷を蓄積させることで書き込みを行う不揮発性メモリであるが、トラップ準位が多岐に渡る場合は読み出し電流が非線形的かつ多値的に変化する。そこで本研究では、黒リン表面に自然酸化膜 (PO_x) を形成し電荷トラップ層として利用することで多値電荷トラップメモリの作製を試みた。

まず、多層黒リンをバルク単結晶から Si/SiO₂ (90 nm) 基板上に機械剥離した。その後、フォトリソグラフィーと抵抗加熱蒸着によって黒リン上に Ni (20 nm)/Au (50 nm) 電極を形成し、Si をゲート、SiO₂ をゲート誘電体とするバックゲート型の電界効果トランジスタを作製した (図 3a)。その後、フォトリソグラフィーによって黒リンチャンネル上にウィンドウを形成し、室温でオゾン (O_3) に曝露することで黒リン表面を酸化した (図 3b)。

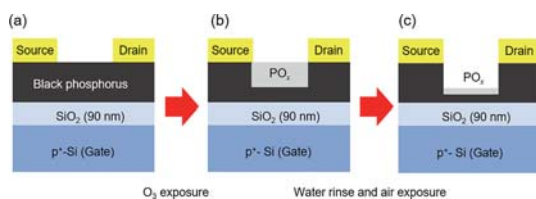


図3 黒リン電荷トラップメモリの作製プロセス

そして、黒リンを純水でリンスし表面酸化膜を除去することで、局部的に薄膜化した (図 3c)。その後、黒リンを大気に曝露することで電荷トラップ層となる表面酸化膜を形成した。黒リン FET の特性は室温、暗所、真空中 ($\sim 10^{-2}$ Pa) 中で測定した。また、黒リンへの照射はハロゲンランプを用いて行った。

図 4 は、オゾン酸化と純水リンスによる処理を行った前後の光学顕微鏡像である。処理前後で黒リンのコントラストが変化しており、黒リンがエッチングされていることが分かった。また、図 5 はエッチング前後での黒リン FET の伝達特性を示している。エッチング前は高いホール電流を示し、その値は -20 V から 20 V のゲート掃引においておよそ 20% しか変化しなかった。一方、エッチング後は電流値が大幅に減少し、ゲート掃引に対してドレイン電流が 2 桁以上変化した。これらの実験結果は、エッチングによる薄膜化で黒リンのバンドギャップが増大したことを示唆している。

エッチング直後の黒リン FET はゲート掃引に対してヒステリシスを示し、そのヒステリシス幅は 1.5 V であった。黒リン FET の伝達特性におけるヒステリシスは、黒リン表面に形成

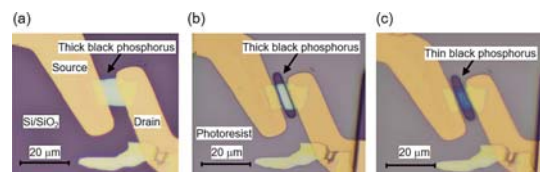


図4 黒リンのエッチング前後の光学顕微鏡像

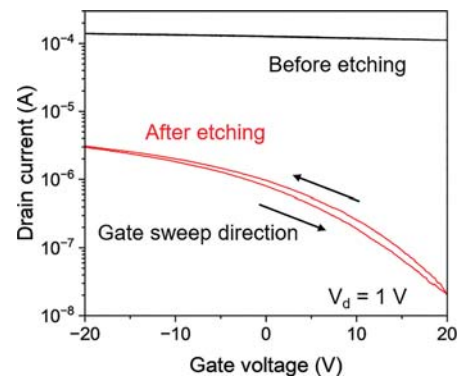


図5 黒リン FET のエッチング前後の伝達特性

された酸化膜が電子トラップとして機能していることによると考えられ、黒リン FET がリザーバードバイス応用に必要な電荷トラップメモリとして機能することが分かった。しかし、実際に黒リン電荷トラップメモリをリザーバードバイスとして応用するためには、より密度の高い電子トラップ層を形成し多値動作させる必要がある。そこで次は、黒リン FET を大気に曝露させることで更なる酸化膜形成を試みた。

図 6 に、エッチングした黒リン FET の大気曝露時間ごとの伝達特性を示す。10 分間の大気曝露によってドレイン電流値が減少し、オン・オフ比が 10^4 まで増大した。また、ヒステリシス幅も 8.1 V まで増加した。これらの結果は、大気曝露によって黒リン表面の酸化が進行したことを示唆している。その後、大気曝露時間を 40 分まで増やしても電流値とヒステリシス幅に大きな変化は見られなかった。これは、表面酸化膜が保護膜として機能し、黒リンの更なる酸化の進行が抑制されたためと考えられる。

次に、黒リン電荷トラップメモリの多値メモリ特性を評価した。図 7a に、大気曝露後の黒リン FET の伝達特性の最大ゲート電圧 ($V_{g,max}$) 依存性を示す。印加するゲート電圧の最大値を 0 V から 20 V まで増加させると、ヒステリシス幅も増加することが分かった。この結果は、黒リン表面酸化膜中には多数のトラップ準位が存在していることを意味している。図 7b にトラップ密度の最大ゲート電圧依存性を

示す。 $V_{g,max}=20$ V のときのトラップ密度はおよそ $1.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ と見積もられ、酸化膜中に多くの電子トラップが存在することも分かった。以上の結果より、表面酸化した黒リン FET が、多値電荷トラップメモリ動作することが分かった。

次は、黒リン電荷トラップメモリの保持特性の評価を行った。図 8 は、黒リン電荷トラップメモリに ± 20 V のゲート電圧を 4 s 印加し、書き込みと消去を行った際の保持特性を示している。書き込み後の電流は 10 s 後に 90% まで減少し、さらに 1000 s 後には 67% まで減少し

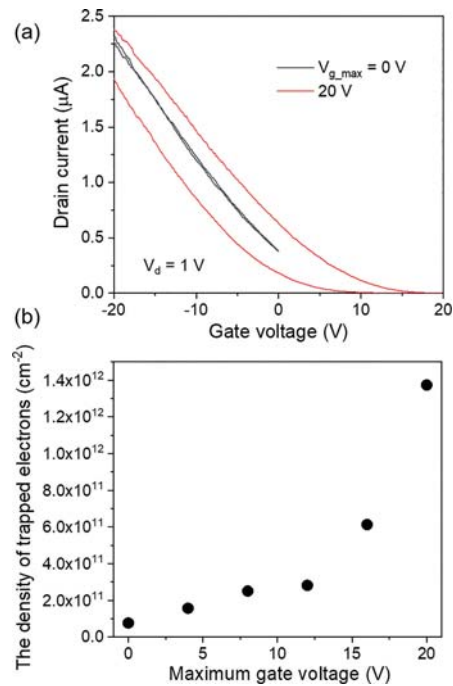


図 7 (a) 黒リン FET の伝達特性の最大ゲート電圧依存性 (b) トラップ電子密度の最大ゲート電圧依存性

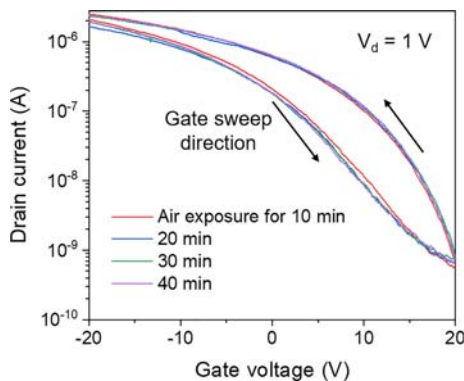


図 6 黒リン FET の伝達特性の大気曝露時間依存性

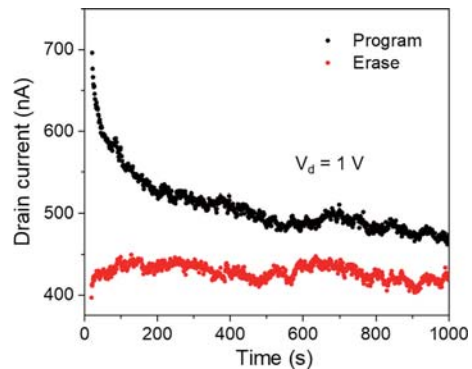


図 8 黒リン電荷トラップメモリの短期記憶特性

た。一方、消去後の電流は 1000 s で 5 % 増加した。これらの結果は、黒リン表面酸化膜中のトラップ準位は比較的浅く、トラップされた電子は室温においても簡単にデトラップされやすいことを意味している。以上の結果より、黒リン電荷トラップメモリがリザバーコンピューティングに必要な短期記憶性を有することが示された。

次は、黒リン電荷トラップメモリにゲートパルスを連続的に印加した際のドレイン電流値の変化を調べた。図 9 に示すように大きき 20 V、パルス幅 100 ms のゲートパルスを印加すると、パルス数とともに電流値が非線形かつ可塑的に増加する様子が見られた（シナプス増強）。一方で、大きき -5 V、パルス幅 100 ms のゲートパルスを印加すると電流値は可塑的に減少した（シナプス抑制）。したがって、黒リン電荷トラップメモリはリザバーコンピューティング応用において必要な非線形性も示すことが分かった。

最後に、黒リン電荷トラップメモリの光応答特性を調べた。図 10 に示すように、黒リン電荷トラップメモリにハロゲンランプ光を照射すると、ドレイン電流が時間とともに増大した。この光電流は、光照射によって黒リン中に生成された電子が表面酸化膜中でトラップされ、ゲートとして作用する光ゲート効果によるものと考えられる。100 s のハロゲン光照射による電流増加率は 3 倍以上であり、黒リン電荷トラップメモリが良好な光センサーとして機能す

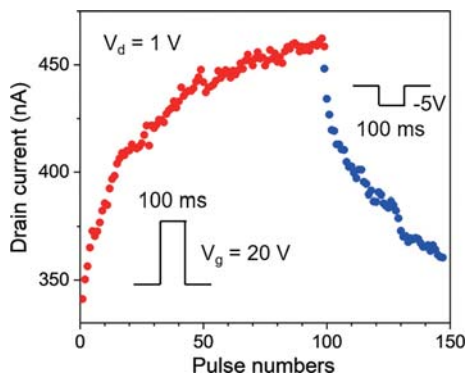


図 9 ゲートパルス印加によるドレイン電流の非線形変化

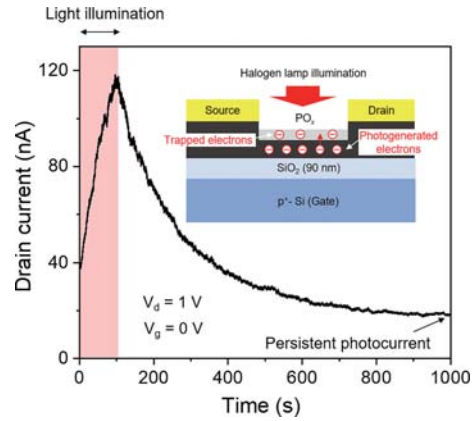


図 10 黒リン電荷トラップメモリの光応答特性

ることが示された。

ハロゲン光照射後、光電流は緩慢に減少し 1000 s 後も持続することが分かった。これは光照射によって生成され電子が酸化膜中にトラップされていることを示している。つまり、黒リン電荷トラップメモリが光照射に対しても短期記憶性を有する、不揮発性光メモリとして機能することが分かった。

次に、黒リン不揮発性メモリ光メモリの非線形性の評価を行った。図 11 は、黒リン FET に 100 s のハロゲン光照射を断続的に 4 回行った際のドレイン電流の変化を示している。ゲートパルスを印加した際と同様に、黒リン FET に光を照射した後の持続電流は、照射回数とともに非線形的に変化することが分かった。

以上より、本研究ではインセンサーリザバーコンピューティングへの応用を視野に入れ、バ

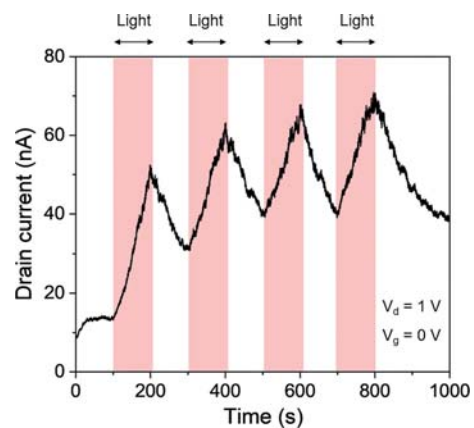


図 11 光照射によるドレイン電流の非線形変化

ンドギャップと表面状態をエンジニアリングした二次元半導体黒リンを用いて電荷トラップメモリを作製した。実際に作製した黒リン電荷トラップメモリは、インセンサーリザーブコンピューティング応用に必要不可欠な、短期記憶性、非線形性、高光感度性を有することが分かった。今後は、本研究で得られた実験データを元にリアルタイム学習における効率性をシミュレーションし、そのAIエッジデバイスとしての実用性を評価する。

[成果の発表, 論文など]

1. 長田庄平, 小田太一, 稲田貢, 佐藤伸吾, 山本真人, 局所オゾン酸化による層数の異なる黒リン面内ホモ接合の形成, 第72回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学, 2025年3月.
2. 山本健嗣, 小田太一, 稲田貢, 山本真人, オゾン処理によって薄膜化した黒リンの電荷トラップ特性, 第72回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学, 2025年3月.