

# Streszczenie

Rzeczywisty rozwój elektroniki pozwolił na opracowanie wydajnych, powszechnie dostępnych i wszechstronnych urządzeń komputerowych. Mimo tego, algorytmy wykorzystywane w uczeniu maszynowym i sztucznej inteligencji wymagają przetwarzania tak dużych ilości danych, że stanowi to poważne wyzwanie dla konwencjonalnych komputerów. Ich architektura, w której procesor i pamięć stanowią odrębne układy, wymaga ciągłego przesyłania danych pomiędzy pamięcią i procesorem. Proces ten jest jednym z najistotniejszych ograniczeń mocy obliczeniowej współczesnych komputerów i stanowi wyzwanie dla szybkiego rozwoju sztucznej inteligencji.

Jednym z potencjalnych rozwiązań tego problemu są nowe paradygmaty obliczeniowe, na przykład przetwarzanie danych bezpośrednio w pamięci. Jego implementacja jest możliwa w memrystorach — elementach elektronicznych, które potrafią jednocześnie przetwarzać i przechowywać dane, dzięki czemu nie ma potrzeby przesyłania ich pomiędzy dwoma rozdzielonymi układami. W memrystorach informacja przechowywana jest w postaci konduktancji, która może być zmieniana za pomocą napięcia. W niektórych typach memrystorów przewodnictwo może być kontrolowane w szerokim zakresie, pozwalając na odejście od logiki dwuwartościowej stanowiącej podstawę funkcjonowania obecnych komputerów. Dzięki temu memrystory mogą naśladować sposób, w jaki sygnały przetwarzane są przez biologiczne neurony. W układzie nerwowym komunikacja odbywa się poprzez wzmacnianie i osłabianie połączeń synaptycznych pomiędzy neuronami wywołane krótkimi impulsami elektrycznymi. Miarą siły tego połączenia jest waga synaptyczna, a zmiany jej wartości — nazywane plastycznością synaptyczną — leżą u podstaw procesów uczenia się.

W memrystorach analogią do wagi synaptycznej jest zmienna konduktancja, która może być modulowana przez napięcie o zmiennej amplitudzie i częstotliwości. Dzięki niej memrystory są zdolne do odtworzenia niektórych rodzajów plastyczności synaptycznej obserwowanych w neuronach. Wśród takich efektów neuromorficznych (lub neuromimetycznych) znajdują się m. in. metaplastyczność, pamięć krótko- i długoterminowa oraz potencjalizacja i depresja. Dzięki ich obecności memrystory mogą zostać wykorzystane jako sztuczne synapsy przetwarzające sygnał w sposób analogiczny do biologicznych synaps.

Wśród materiałów wykorzystywanych do budowy memrystorów znajdują się hybrydowe organiczno-nieorganiczne perowskity halogenkowe. Do tej grupy perowskitów należą materiały będące jednymi z najbardziej wydajnych ogniw słonecznych, ale ich właściwości optoelektronicznie czynią je także interesującymi z punktu widzenia zastosowań w

optoelektronice i jako memrystory. Ich silne oddziaływanie ze światłem stwarza możliwość kontrolowania efektów memrystywnych i neuromorficznych nie tylko napięciem, ale także za pomocą światła.

Celem prowadzonych badań było zbadanie efektów neuromimetycznych w cienkich warstwach perowskitów oraz w materiałach do nich analogicznych. Zrozumienie mechanizmów fizycznych odpowiedzialnych za przełączanie rezystywne leżące u podstaw efektów neuromorficznych oraz ich pełnej charakterystyce woltamperometrycznej stanowi pierwszy krok do wykorzystania memrystorów perowskitowych w układach memrystywnych zdolnych do wydajnej implementacji algorytmów uczenia maszynowego, w których przetwarzanie sygnału inspirowane jest działaniem biologicznych neuronów.

W niniejszej rozprawie scharakteryzowano efekty neuromorficzne w perowskitach opartych o ołów i bizmut oraz związkach kompleksowych i kryształach jonowych bizmutu. Celem pracy było wyjaśnienie mechanizmów przełączania rezystywnego w memrystorach perowskitowych oraz ich powiązanie z efektami memrystywnymi i neuromimetycznymi. W tym celu materiały scharakteryzowano za pomocą metod spektroskopowych oraz woltamperometrycznych. Pokazano, że w memrystorach opartych o perowskity  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  oraz  $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_3\text{Bi}_2\text{I}_9$  zmiana konduktancji memrystorów opiera się o modulację wysokości bariery energetycznej na złączu metalu i półprzewodnika (bariery Schottky'ego) wywołanej zapelnianiem i opróżnianiem stanów pułapkowych. Mechanizm ten pozwolił na odtworzenie efektów plastyczności synaptycznej, takich jak uczenie poprzez plastyczność synaptyczną zależną od częstotliwości (*spike-rate dependent plasticity* i *frequency facilitation*) oraz od korelacji czasowej i kolejności generowania potencjałów czynnościowych przez neuron pre- i postsynaptycznych (*spike-timing dependent plasticity*). W memrystorze opartym o kompleks bizmutu  $[\text{BiI}_3(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{SO}_{1.5}]_4$  pokazano, że charakter uczenia jest zależy od orientacji bariery Schottky'ego i może być zmieniony poprzez wykorzystanie innego metalu w roli elektrody memrystora.

Pokazano, że w memrystorze opartym o perowskit  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  efekty synaptyczne mogą być indukowane za pomocą światła. Wprowadzenie do memrystora materiału zdolnego do pułapkowania elektronów (nanocząstek azotku węgla) pozwala na modulowanie plastyczności indukowanej światłem — w memrystorze bez materiału pułapkującego światło powoduje wzmocnienie synaptyczne, a w urządzeniu z dodatkowymi stanami pułapkowymi — osłabienie odpowiedzi synaptycznej.

Zmiana konduktancji memrystorów może odbywać się także poprzez tworzenie przewodzących filamentów powstających wskutek migracji defektów struktury krystalicznej w gradiencie zewnętrznego pola elektrycznego. Taki mechanizm przełączania zbadano w memrystorze opartym o związek bizmutu ( $\text{CH}_4\text{NH}_9\text{BiI}_6$ ). Pokazano, że jest on zdolny do odtworzenia plastyczności synaptycznych opisywanych przez model biologicznego neuronu

*leaky integrate and fire*. Przeprowadzona symulacja sztucznej sieci neuronowej, w której jako parametry neuronów wykorzystano parametry memrystorów  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{BiI}_6$ , wykazała dokładność klasyfikacji pisma odręcznego na poziomie 94%.