

Optyczno-elektryczne hybrydowe synapsy memrystorowe o krótko- i długotrwałej plastyczności dla neuromorficznego przetwarzania informacji nowej generacji

Tempo generowania i przetwarzania danych we współczesnym świecie charakteryzuje się bezprecedensową dynamiką wzrostu, a systemy sztucznej inteligencji, autonomiczne układy sterowania i platformy chmurowe należą do głównych odbiorców mocy obliczeniowej. Mimo postępów programowych i sprzętowych – obejmujących rozwój złożonych algorytmów, miniaturyzację tranzystorów, szybsze procesory i pojemniejsze pamięci – kluczowe ograniczenie wynika z fundamentalnej organizacji klasycznej architektury komputerów. Fizyczna separacja procesora i pamięci wymusza stały transfer danych, generując opóźnienia i straty energii dominujące w bilansie energetycznym współczesnych systemów. To tzw. wąskie gardło von Neumanna, architekturna bariera, której nie mogą usunąć nawet znaczące ulepszenia technologiczne.

Rosnące ograniczenia tradycyjnego modelu obliczeń skierowały uwagę nauki i przemysłu ku alternatywnym paradygmatom. Jednym ze szczególnie obiecujących jest neuromorficzne przetwarzanie informacji, inspirowane najwydajniejszym i najbardziej energooszczędnym systemem obliczeniowym – ludzkim mózgiem. W biologicznych sieciach neuronalnych pamięć i przetwarzanie zachodzą w tych samych strukturach poprzez modulację siły połączeń synaptycznych. Zmiany te mogą mieć charakter krótkotrwały (STP), istotny dla dynamicznego filtrowania bodźców, adaptacji i detekcji korelacji czasowych, lub długotrwały (LTP), odpowiedzialny za trwałe kodowanie informacji i stabilizację ścieżek sygnałowych. Połączenie STP i LTP stanowi podstawę neuromorficznych algorytmów odwzorowujących zdarzeniowy charakter sygnałów neuronalnych oraz sprzętowych architektur integrujących pamięć i obliczenia w jednym, funkcjonalnym elemencie.

Stworzenie elementu działającego na zasadach zbliżonych do biologicznej synapsy okazało się jednak znaczącym wyzwaniem. Dopiero niespełna dwie dekady temu zaprezentowano namiastkę synapsy – memrystor, czyli element, którego rezystancja zależy od historii przyłożonego sygnału, a dokładniej napięcia elektrycznego. Nazwa pochodzi od połączenia słów *memory* i *resistor*. Pojedynczy memrystor może zatem nie tylko przechowywać informację, lecz również wykonywać jej podstawowe przetwarzanie, choć w najprostszej formie ogranicza się do binarnego przełączenia pomiędzy stanem wysokiej i niskiej rezystancji, odpowiadającego klasycznym wartościom logicznym 0 i 1. Co istotne, stan ten jest nieulotny, a więc pozostaje niezmienny po ustaniu sygnału sterującego. Taka elementarna realizacja odpowiada jednak wyłącznie najprostszemu, binarnemu schematowi wagi synaptycznej i odzwierciedla jedynie niewielki, najbardziej podstawowy fragment złożonej funkcjonalności biologicznej synapsy. Dopiero najnowsze, najbardziej zaawansowane i wciąż nieliczne demonstracje badawcze zaczęły łączyć STP i LTP w obrębie pojedynczego elementu, często jednocześnie oferując wielopoziomowe stany rezystancji oraz dodatkowe nieliniowe właściwości niezbędne do realizacji bardziej złożonych funkcji synaptycznych.

W obecnym projekcie chcemy pójść o krok dalej i – wykorzystując przede wszystkim efekty transportu jonowego zaprojektować hybrydowe, wielopoziomowe memrystory elektro-optyczne, które jako jedne z pierwszych będą w stanie wykonywać rzeczywiste operacje obliczeniowe dzięki równoczesnej realizacji STP i LTP w pojedynczym urządzeniu oraz możliwości modulacji zarówno w warstwie elektrycznej, jak i optycznej. Połączenie tych dwóch kanałów sterowania pozwoli w pełni wykorzystać zalety podejścia elektrycznego – precyzyjnego, energooszczędnego i zgodnego z technologią wytwarzania CMOS – oraz podejścia optycznego, oferującego ultraszybki transport informacji, wysoką przepustowość i bezkontaktową kontrolę stanów synaptycznych.

Aby osiągnąć te funkcjonalności, zbadamy fizykę formowania filamentów, dynamikę jonów oraz zjawiska sprzężenia elektro-optycznego, łącząc pomiary elektryczne z analizą fazy, polaryzacji i energii impulsów świetlnych. Szczególną uwagę poświęcimy zależnościom między stanami STP i LTP oraz sposobom ich wzajemnego wzmacniania, modulowania i stabilizacji. Kluczowym elementem będzie nanostrukturyzacja warstw i elektrod, ukierunkowana na zwiększenie stabilności działania oraz wzmocnienie obserwowanych efektów poprzez kontrolę transportu oraz lokalnych pól elektrycznych i optycznych. W końcowym etapie opracujemy funkcjonalny układ demonstracyjny integrujący elektronikę i optykę, zdolny do realizacji złożonych operacji neuromorficznych.