

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-14-0560**

Štruktúry odporového prepínania pre rozpoznávanie vzorov

Zodpovedný riešiteľ **Ing. Karol Frohlich, DrSc.**Príjemca **Elektrotechnický ústav SAV**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Elektrotechnický ústav SAV
Žilinská univerzita, Fakulta riadenia a informatiky

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

University of California, California, USA
RWTH Aachen, Germany
NCT University, Taiwan
Universitat Autònoma de Barcelona, Spain
University of Helsinki, Finland

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

-

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

1. E. Miranda, B. Hudec, J. Suné, and K. Fröhlich: Model for the Current-Voltage Characteristics of Resistive Switches Based on Recursive Hysteretic Operators, IEEE Electron Device Letters 36 (2015) 944.
2. O. Šuch, S. Barreda: Bayes covariant multi-class classification, Pattern Recognition Lett. 84 (2016) 99.
3. L. Nielen, S. Ohm, O. Šuch, M. Klimo, R. Waser and E. Linn: Memristive sorting networks enabled by electrochemical cells, Int. Journ. of Unconventional Computing 12 (2016) 303.
4. M. Klimo, P. Tarábek, O. Šuch, J. Smieško, O. Škvarek: Implementation of a deep ReLU neuron network with a memristive circuit, Int. Journ. of Unconventional Computing 12 (2016) 319.
5. K. Kukli, M. Kemell, M. Vehkamäki, M. J. Heikkilä, K. Mizohata, K. Kalam, M. Ritala, M. Leskelä, I. Kundrata and K. Fröhlich: Atomic layer deposition and properties of mixed Ta₂O₅ and ZrO₂ films, AIP Advances 7 (2017) 025001.
6. K. Fröhlich, I. Kundrata, M. Blaho, M. Precner, M. Ťapajna, M. Klimo, O. Šuch, and O. Škvarek: Hafnium oxide and tantalum oxide based resistive switching structures for realization of minimum and maximum functions, J. Appl. Phys. 124 (2018) 152109.
7. A. Mošková, M. Moško: States-conserving density of states for Altshuler-Aronov effect: Heuristic derivation, Solid St. Commun. 284-286 (2018) 56-61.
8. O. Such, M. Klimo, N. T. Kemp, O. Skvarek: Passive memristor synaptic circuits with

multiple timing dependent plasticity mechanisms, AEU - International Journal of Electronics and Communications 96 (2018) 252.

Uplatnenie výsledkov projektu

Získané výsledky predstavujú dôležitý krok pri realizácii funkcie pre Zadehovu fuzzy logiku s využitím štruktúr odporového prepínania (memristorov).

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Výsledky riešenia projektu ukázali, že obvody odporového prepínania sú schopné implementovať základné funkcie Zadehovej fuzzy logiky: Min/Max. Štruktúry odporového prepínania na báze HfOx boli schopné realizovať funkcie Min/Max s presnosťou 0,7 (70%), zatiaľ čo štruktúry na báze TaOx boli schopné realizovať funkcie Min/Max s presnosťou 0,97 (97%). Ukázalo sa, že zatiaľ čo V-I charakteristiky obvodov pre realizáciu Min/Max funkcií sú pomerne rozhádzané v dôsledku stochastického charakteru prepínania, časové priebehy sú mimo oblasť prepínania dobre reprodukovateľné. Zistili sme, že 100 ns pulzy sú dostatočné na rekonfiguráciu obvodov a funkcie Min/Max môžu byť implementované obvody odporového prepínania aj pre použitie v pulznom režime s frekvenciou MHz. Oproti pôvodnému zámeru rozpoznávania rečových signálov memristívnou implementáciou Zadehovej fuzzy logiky sme našli aj možnosť memristívnej implementácie aktivačnej funkcie v ReLU neurónovej sieti a navrhli sme aj memristívnu implementáciu váhových koeficientov tohto systému rozpoznávania. Z pohľadu aplikácie sme modelovali navrhnuté memristorové obvody aj pre rozpoznávanie obrazu (na systéme rukou písaných číslíc MNIST). Počítačové modelovanie preukázalo možnosť dosiahnutia rovnakej presnosti ako u softvérovej implementácie, počet memristorov pre implementáciu však rádovo prekračuje možnosti tohto projektu.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

Results obtained within the project have shown, that resistive switching based circuits can implement basic functions of the Zadeh fuzzy logic: Min/Max. HfOx-based resistive switching structures were able to realize functions Min/Max with accuracy of 0.7 (70%), while TaOx-based structures were able to realize functions Min/Max with accuracy of 0,97 (97%). It was shown that while current-voltage characteristics of the circuits for Min/Max realization display dispersion due to stochastic character of the switching, time evolution of the Min/Max output voltages are very reproducible except of the switching region. We have found out, that 100 ns pulses are sufficient for reconfiguration of the circuits. Min/Max functions can be therefore implemented by resistive switching circuits also for application in pulsed regime with frequency of MHz.

In contrast to original intention of speech signals recognition using memristive implementation of Zadeh fuzzy logic we have found out possibility of active function implementation in ReLU neuron networks. We have proposed memristive implementation weight coefficients of this recognition system. From the point of view of application we have modeled proposed memristor circuits also for image recognition (on system of hand written MNIST number). Computer modeling showed possibility to achieve the same accuracy as for software implementation, however number of memristors exceeds possibilities of this project.