

Тельманова Елена Дмитриевна

кандидат педагогических наук, доцент

Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

Telmanova Elena Dmitrievna, Ural State Mining University, Yekaterinburg

Охапкин Владимир Андреевич

кандидат физико-математических наук, доцент

Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

Okhapkin Vladimir Andreevich, Ural State Mining University, Yekaterinburg

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В НЕЙРОМОРФНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ FERROELECTRIC MATERIALS IN NEUROMORPHIC COMPUTING SYSTEMS

Аннотация: В статье поднимаются проблемы создания туннельных переходов в нейроморфных вычислительных системах. Рассматриваются возможности применения сегнетоэлектрических материалов в мемристивных устройствах. Приведена сравнительная оценка использования различных сегнетоэлектрических гетероструктур в туннельном переходе нейроморфного вычислительного устройства.

Abstract: The article raises the problems of creating tunnel junctions in neuromorphic computing systems. The possibilities of using ferroelectric materials in memristive devices are considered. A comparative assessment of the use of various ferroelectric heterostructures in the tunnel junction of a neuromorphic computing device is presented.

Ключевые слова: нейроморфная вычислительная система, сегнетоэлектрик, туннельный переход, гетероструктура.

Keywords: neuromorphic computing system, ferroelectric, tunnel junction, heterostructure.

Сегнетоэлектрические материалы, в настоящее время, приобретают все большее признание за их значимость в вычислении нейронных состояний. Объясняется это тем, что современные вычислительные платформы на традиционной архитектуре Джона фон Неймана не подходят для реализации алгоритмов нейронной сети, требующих значительно более высокую аппаратную вычислительную мощность, позволяющую одновременно выполнять большое количество «сравнительных» вычислений. Кроме того, стандартные процессоры с их последовательной схемой работы не могут сравниться с человеческим интеллектом, способным справиться с задачей распознавания и сравнения на много лучше любого современного компьютера. Поэтому, именно нейроморфные вычислительные системы позволяют преодолеть технологический барьер в разработке нейронных сетей, обладающих высокой производительностью, скоростью передачи данных и малым расходом энергии. Важнейшим фактором является то, что, в отличие от архитектуры фон Неймана, в архитектуре нейроморфных процессоров память и вычислительные ядра объединены. Поэтому извлекать данные из регистров (памяти) не требуется, а вся информация хранится в искусственных нейронах. При этом постоянных переключений между блоками обработки и блоками памяти не происходит. Нейроморфный процессор при выполнении сравнительных вычислений потребляет энергии на несколько порядков меньше по сравнению с классическим процессором. Кроме того, процессор работает в режиме реального времени с малой задержкой.

Самым перспективным сегнетоэлектрическим материалом, в настоящее время является титанат бария. *Barium titanate (BTO)* был первым известным сегнетоэлектрическим материалом, лишенным водородных связей в своей структуре. Поэтому он способен проявлять несколько сегнетоэлектрических свойств. С момента открытия сегнетоэлектрического перехода в перовските в 1940-х годах проводились углубленные исследования свойств и структуры данного сегнетоэлектрика, результатом которых стало применение материала в изготовлении ячеек памяти в электронной технике.



В настоящее время, титанат бария среди прочих материалов, рассматривается для использования в нейроморфных вычислительных устройствах [1]. Его использование обеспечивает следующие характеристики данных систем:

- высокая скорость работы;
- минимальное энергопотребление;
- высокая плотность хранения;
- возможность трехмерного размещения данных.

На данный момент, продолжаются научные исследования по созданию сегнетоэлектрических туннельных переходов, в которых ультратонкий слой сегнетоэлектрика располагают между двумя металлическими электродами. При изменении поляризации в сегнетоэлектрике происходит значительное изменение туннельного сопротивления, что приводит к неразрушающему считыванию информации [2]. Исследовательская группа под руководством профессора *J. Wang* разработала создания, выполненный на основе титаната бария, для вычисления нейронного состояния [3]. Он имеет следующую конфигурацию. Нижний электрод – выполняется из легированного титаната стронция (*Nb:STO*), верхний электрод – имеет платиновое напыление (*Pt*), между электродами расположен сегнетоэлектрический слой из титаната бария (*BTO*), между электродами и сегнетоэлектрическим слоем встроен диэлектрический слой (*LSMO, CFO*) (рисунок 1) [3].

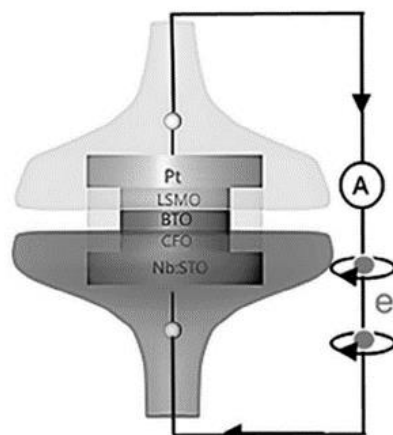


Рис.1. Сегнетоэлектрический туннельный перехода

Полученный переход, при непрерывном изменении сопротивления в широком диапазоне, показывает устойчивую пластичность при различном синаптическом весе. В ходе экспериментального исследования, данная технология была использована для распознавания рукописных чисел. Применение алгоритма обратного распространения ошибки обеспечило точность распознавания свыше 97%.

Тем не менее, сегнетоэлектрические туннельные переходы имеют недостаток – значительная разница в коэффициенте пропускания между двумя сегнетоэлектрическими состояниями левой и правой поляризации. При наличии электрического поля, возникает туннельный ток, величина которого зависит от направления поляризации сегнетоэлектрического барьера. Если величина электрического поля больше, чем сегнетоэлектрическое коэрцитивное поле в сверхтонком туннельном барьере, то переход достигает полной поляризации, и наоборот. Эту особенность сегнетоэлектрического материала можно использовать в качестве состояний «включено» и «выключено» в двоичной памяти. Поэтому в современных исследованиях очень актуальны разработки методов достижения более высоких коэффициентов *TER*, количественно оценивающих изменение электросопротивления в двух состояниях поляризации [4]. Одно из решений данной проблемы применение 2D-сегнетоэлектриков, среди которых α - In_2Se_3 (бинарное неорганическое соединение селена и индия) является наиболее перспективным. Последние исследования показали, что α - In_2Se_3 обладает устойчивой сегнетоэлектрической поляризацией как в



плоскости, так и вне нее, при толщине равной одному монослою, что идеально подходит для проектирования двумерных гетероструктур Ван-дер-Ваальса, состоящих из сегнетоэлектрика α -In₂Se₃ и полупроводникового кристаллического материала гексагональной структуры IV-VI (рисунок 2) [5].

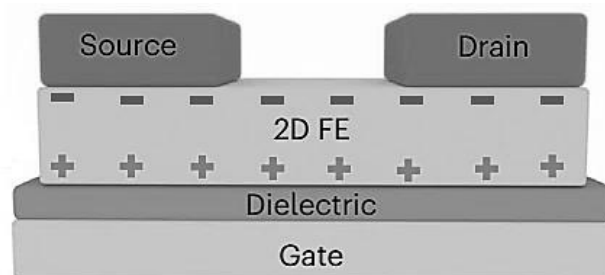


Рис. 2. Двумерная гетероструктура Ван-дер-Ваальса

Данные гетероструктуры могут работать в двух противоположных режимах: туннельный и металлический (выключено и включено соответственно), при этом отношение сопротивлений (TER) в режиме *OFF/ON* достигает значений, превышающих 1×10^4 .

Одним из кристаллических материалов гексагональной структуры, который может быть успешно использован в гетероструктуре Ван-дер-Ваальса является LaBr₂. Его основное достоинство – волны зарядной плотности в монослое из LaBr₂ не подавляют ферромагнетизм, а способствуют ему [5].

Другой, представляющей интерес, сегнетоэлектрической гетероструктурой является C₂N/ α -In₂Se₃, в которой монослой C₂N отличается равномерным распределением атомов азота. Все атомы внутри этого слоя, почти полностью, расположены в одной плоскости (рисунок 3) [6]. Графитовая структура C₂N с сопряженными три-*s*-триазиновыми звеньями, связанными третичными аминами, обеспечивает высокую химическую стабильность и настраиваемые электронные свойства. Тем не менее, слоистый нитрид углерода рассматривается, главным образом, в качестве многообещающего фотокатализатора для различных применений в области преобразования энергии, благодаря своей высокой способности поглощения видимого света.

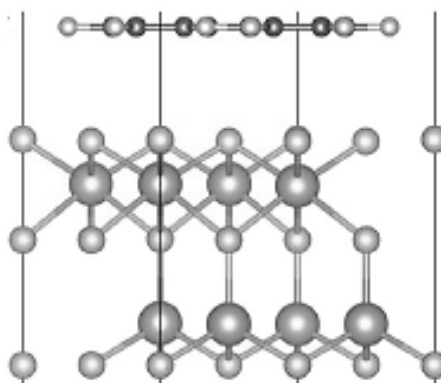


Рис. 3. Гетероструктура C₂N/ α -In₂Se₃: вид сбоку

Несмотря на огромный успех использования сегнетоэлектрических материалов в экспериментальных мемристивных устройствах, на данный момент, исследователи сталкиваются с проблемами получения хрупких сегнетоэлектрических пленок общеизвестными методами литографии или нанесения материала с помощью полимера. Несмотря на то, что метод нанесения и выравнивания вещества с помощью полимера является сегодня доминирующим методом создания гетероструктур, пределы точности имеют микрометровые пределы, а пузырьки на границе раздела, поверхностные загрязнения и деформации не только нарушают функции устройства, но и вызывают нежелательные отклонения.

В целом, постоянное развитие гетероструктур, а также разработка стратегий их синтеза открывает совершенно новую главу в материаловедении для создания разнообразных искусственных гетероструктур, которые можно эффективно использовать при формировании энергонезависимой памяти в нейроморфных вычислительных системах на основе сегнетоэлектрических материалов.

Список литературы:

1. Deng C., Zhang Y., Yang D., Zhang H., Zhu M. Recent progress on barium titanate-based ferroelectrics for sensor applications // Advanced Sensor Research. 2024. <https://doi.org/10.1002/adsr.202300168>.
2. Garcia V. Ferroelectric tunnel junctions // Research Gate. 2020. <https://www.researchgate.net/publication/345971124>.
3. Le Z., Hong F., Jie W., Fang N., Rongqi L., Yuling W., Limei Z. Ferroelectric artificial synapses for high-performance neuromorphic computing: Status, prospects, and challenges // Applied Physics Letters. 2024. <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/124/3/030501/3000751/Ferroelectric-artificial-synapses-for-high?redirectedFrom=fulltext>
4. Xiao W., Zheng X., Hao H. et al. Greatly enhanced tunneling electroresistance in ferroelectric tunnel junctions with a double barrier design // Computational Materials/ 2023. № 9. P.144. <https://doi.org/10.1038/s41524-023-01101-9>.
5. Weiyang Y., Xiaoli Z., Wen L. et al. The reversible and nonvolatile properties of 2D LaBr₂/α-In₂Se₃ heterostructure by strain and electric field modulation. // Research Gate. 2023. <https://ssrn.com/Abstract=4429373> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4429373>.
6. Zhong Y. Ferroelectric polarization reversals in C₂N/α-In₂Se₃ van der Waals heterostructures: a conversion from the traditional type-II to S-scheme // Research Gate. 2023. https://www.researchgate.net/publication/374101358_Ferroelectric_polarization_reversals_in_C2N-In2Se3_van_der_Waals_heterostructures_a_conversion_from_the_traditional_type-II_to_S-scheme.

