

УДК 621.385.69

Коломоєць К.Д. ¹, Погосов В.В. ², Коротун А.В. ^{2,3}

¹ студ. гр. БК-314м НУ «Запорізька політехніка»

² проф. НУ «Запорізька політехніка»

³ с.н.с. ІМФ ім. Г.В. Курдюмова НАН України

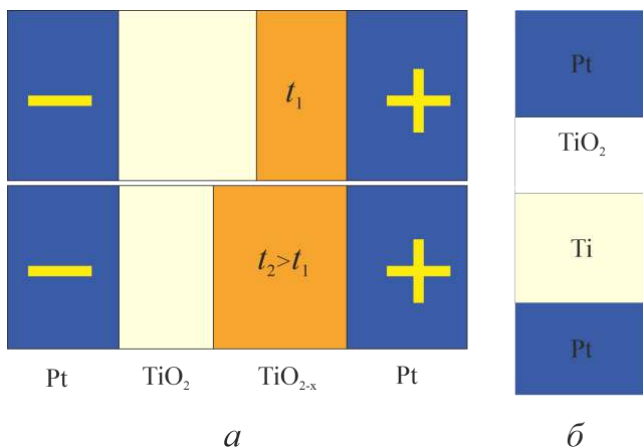
ВПЛИВ ОКСИДУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕМРИСТОРІВ

Принципова відмінність мемристора від більшості типів сучасної напівпровідникової пам'яті та його головна перевага перед ними полягають в тому, що він не зберігає свої властивості за рахунок збереження заряду [1]. Це означає, що йому не страшні витoki заряду, з якими доводиться боротися при переході на мікросхеми нанометрових масштабів, і що він повністю енергонезалежний. Простіше кажучи, дані можуть зберігатися в мемристорі до тих пір, поки існують матеріали, з яких він виготовлений. Для порівняння: флеш-пам'ять починає втрачати записану інформацію вже після року зберігання без доступу до електричного струму. Таким чином, на відміну від інших пасивних компонентів мемристор володіє пам'яттю, що відкриває широкі перспективи його використання в електроніці. Мемристори відкривають перспективи створення комірок пам'яті на основі електричного гістерезису [2,3].

Роль оксидів у мемристорних структурах полягає у їх здатності до зміни своєї кристалічної структури та провідності під дією електричного поля. Наприклад, багато мемристорів засновані на оксидах перехідних металів, таких як оксид титану (TiO_2) або титанат стронцію (SrTiO_3), які змінюють свій опір при прикладанні напруги. Такий процес зміни опору в мемристорі називають перемиканням станів. Він зумовлений зміною кристалічної

структури оксиду, що призводить до зміни провідності, а отже і зміни опору пристрою.

Згідно гіпотези про наявність киснево-вакансійних ниток між двома ідентичними масивними металевими електродами (Pt), електрон із лівого електрода переходить ефективно на правий (на якому позитивний потенціал) лише за допомогою складної польової емісії у «порожні» («наповнені» вакуумом) киснево-вакансійні нитки, а потім рухаючись цим каналом переходить у інший електрод. Канал цей, принаймні, неоднорідний: у лівого електрода його переріз менший, ніж поблизу правого електрода, внаслідок того, що концентрація вакансій кисню праворуч більша, ніж ліворуч. Це демонструє (рис. 1), на якому в різні моменти часу t умовно показано зростання межі області, збагаченої вакансіями.



a – структура під прямою напругою U у часі; *b* – метод отримання сандвіча.

Рисунок 1 – До пояснення гіпотези про наявність киснево-вакансійних каналів.

Куди піде кисень при переміщенні межі, якщо загальна формула складу TiO₂ залишається незмінною? Це питання у літературі, наскільки нам відомо, не обговорювалося.

Якщо розбити об'єм плівки на комірки за кількістю молекул TiO₂ подібно до вузлів у кристалічній ґратці (рис. 2), то при переміщенні межі, на перший погляд, має відбуватися часткове виснаження кисню у плівці. Як це може бути?

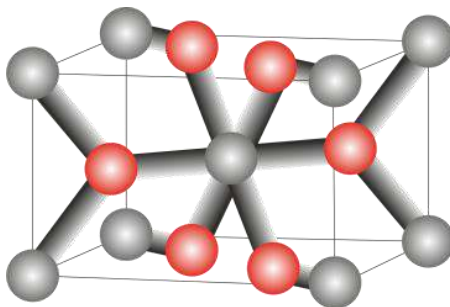


Рисунок 2 – Діоксид титану у рутильній формі (сірим кольором позначені атоми титану, червоним – кисню)

Швидше за все, кількість кисню в плівці не змінюється, а він просто переходить з комірки (вузла) TiO_2 у міжвузловинний простір. Виникає точковий дефект – міжвузловинний атом кисню O , який дифундує у плівці, не зв'язуючись з атомами титану. Порожнє місце, що залишилося в комірці – також точковий дефект – киснева вакансія, нитки яких і утворюють канали провідності польової емісії.

Автоелектронна емісія (польова емісія, тунельна емісія) – це випромінювання електронів твердими і рідкими тілами-провідниками під дією зовнішнього електричного поля без попереднього збудження цих електронів, тобто без додаткових витрат енергії, що характерне для інших видів електронної емісії.

Тому електрони, потрапляючи на правий електрод, мають надлишкову кінетичну енергію, яка приблизно дорівнює eU (e – елементарний позитивний заряд), порівняно з власними електронами електрода. Це призводить до того, що правий електрод розігрівається, розігріваючи у свою чергу і саму оксидну плівку. Її нагрівання може стимулювати утворення вакансійних ниток та дифузію кисню. Але навіть такі уявлення ідеальної структури (рис. 1) при детальному розгляді призводять до того, що вакансійні нитки не є прямими, а, принаймні, ламаними. Внаслідок цього розсіювання електрона та нагрівання відбуватиметься вже в самій оксидній плівці.

Таку картину можна ще уточнити, спрощено представляючи спосіб виготовлення сандвіча мемристора (рис. 3). На товсту пластину Pt напилюється у вакуумі нанометрова плівка Ti , потім у камеру запускається атомарний кисень, який окислює Ti неоднорідно по глибині, так що правий електрод Pt контактує з чистим Ti , який при переміщенні межі x до вільної поверхні насичується киснем. Потім у камері створюється знову вакуум, а вже на окислений край плівки Ti напилюється інша товста плівка Pt .

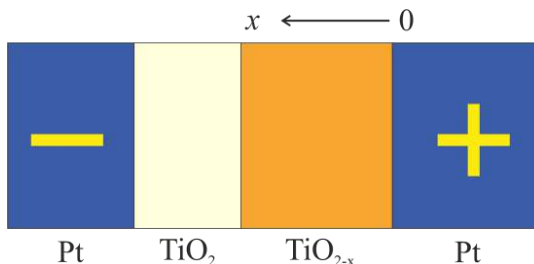


Рисунок 3 – Схема відліку x від 0 до 3 нм.

Яка довжина вакансійних ниток? Зробимо оцінку.

Діаметр лінійної молекули TiO_2 приблизно 6 борівських радіусів (1 нм = 18,3 борівських радіусів), тому на 10 нм між електродами міститься приблизно 30 комірок (молекул) TiO_2 і довжина киснево-вакансійної нитки приблизно дорівнює 30-40 діаметрів атомів кисню.

Кожен із оксидів, що використовуються у мемристорах, має унікальні характеристики, які роблять його придатним для конкретних застосувань (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристики оксидів для виготовлення мемристорів

Оксид	Характеристики
TiO_2	Висока швидкість та циклічність, ідеальний для енергоефективних систем зберігання даних
HfO_2	Висока стабільність та надійність, підходить для серверних систем та хмарних сховищ
SiO_2	Висока швидкість та стійкість, використовується у споживчій електроніці
ZnO	Стабільність при високих частотах, ефективна у мобільних пристроях
Nb_2O_5	Висока щільність перемикачів та стійкість, застосовується у високопродуктивних системах II

Вибір оксиду для мемристора залежить від конкретних вимог та умов експлуатації пристрою, що дозволяє оптимізувати його продуктивність, енергоефективність та довговічність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Chua L.O. Memristor – the missing circuit element // IEEE Transaction son circuit theory. – 1971. – Vol. 18. – No 5. – P. 507-519.

2. Rudenko M., Belogolovsky M.A., Korotash I.V., Polotsky D.Yu., Krakovny A.A., Zhitlukhina E. S. Memristor effects in solid-state heterostructures // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2016. – V. 38. – № 8 – P. 995-1008.

3. Emmerich T., Teng Y., Ronceray N., Lopriore E., Di Ventra M. Nanofluidic logic with mechano-ionic memristive switches // Nature Electronics. – 2024. V. 7. – P. 271–278.