

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ ШВИДКОДІЮЧОГО МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ З ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ НА ОСНОВІ 2D НАНОМАТЕРІАЛУ MoO₃

¹Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter (MPSD), Hamburg, Germany

²Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

Анотація. Розроблено технологію виготовлення MoO₃-пристрою з від'ємним диференціальним опором на основі 2D матеріалу, який представляє собою нанометрові шари товщиною в один атомний шар або елементарну комірку. За звичайних умов такі матеріали є хімічно стабільними та механічно міцними, але при цьому є гнучкими. Було розроблено декілька топологій різної конфігурації для виготовлення швидкодіючого мікроелектронного пристрою з від'ємним диференціальним опором на основі 2d наноматеріалу MoO₃. Топологія складається з трьох шарів: 1й шар — це нижній електрод Ti/Au пристрою, другий шар — це напівпровідниковий матеріал аморфного триоксиду молібдену і третій шар — це верхній електрод пристрою також з Ti/Au.

Ключові слова: від'ємний диференціальний опір, MoO₃-пристрій, топологія, мікроелектронна технологія.

В останнє десятиліття двовимірні (2D) матеріали викликають великий інтерес у науці [1]. 2D матеріали - це нанометрові шари товщиною в один атомний шар або елементарну комірку. Таким чином, вони утворюють клас найтонших матеріалів, які тільки можна собі уявити. За звичайних умов вони є хімічно стабільними та механічно міцними, але при цьому гнучкими [2, 3]. Завдяки особливим властивостям 2D матеріалів відкриваються абсолютно нові можливості для розробки сучасних мікро- та наноелектронних пристроїв [4]. Існують 2D-модифікації з ізоляційними, провідними та напівпровідниковими властивостями, що є основою для повноцінної 2D-електроніки [5]. Сполуки молібдену також належать до цих матеріалів. Для нашої роботи було обрано триоксид молібдену, оскільки цей матеріал має цікаві оптичні та тензометричні властивості. Оксид молібдену являє собою хімічну сполуку з хімічною формулою MoO₃ з температурою плавлення 795 °C та щільністю 4,69 г/см³.

Було розроблено кілька топологій різної конфігурації MoO₃-пристрою з від'ємним диференціальним опором на основі 2D матеріалу, як окремі пристрої на одному чіпі, так і матриці по чотири елементи на чіпі. У даній роботі представлено два види топології 10μm x 10μm і 30μm x 30μm. Для цього використовувалась програма відкритого доступу K-Layout. Топологія складається з трьох шарів: 1й шар — це нижній електрод Ti/Au пристрою, другий шар — це напівпровідниковий матеріал аморфного триоксиду молібдену. Третій шар — це верхній електрод пристрою також з Ti/Au. Нижній електрод із золота має довжину 1400 μm і ширину 10 μm, верхній електрод із золота має довжину 2500 μm і ширину 10 μm, шар триоксиду молібдену між ними має форму квадрату, розміром 150 μm x 150 μm. Контактні площадки мають розмір 40 μm x 40 μm, що в нашому випадку залежить від приладу для пайки виводів пристрою.

Для виготовлення MoO₃-пристрою використовувався субстрат кремнію діаметром 6", товщиною в 700 μm, p-типу, з питомим опором до 50 Ом*см з орієнтацією кристалографічних осей (100) і термічно вирощеним шаром двооксиду кремнію товщиною в 650 нм фірми Nova Electronic materials Inc. На пластини для кращого процесу Lift-Off наносили подвійний фоторезистивний шар, який складається з двох фоторезистів: Lift-Off-фоторезист LOR 7B і позитивного фоторезисту ma-P 1205. Ця комбінація фоторезистів забезпечує необхідну товщину, підріз, важливий для подальшої обробки підкладок по технології Lift-Off, а також чутливість до ближнього УФ (375 нм) лазерного променю літографічної установки.

Двошаровий фоторезист експонувався в системі лазерної літографії μ PG 101 від Heidelberg Instruments GmbH. Лазерна літографічна установка μ PG 101 використовує режим прямого запису в ближньому ультрафіолетовому діапазоні, а саме з довжиною хвилі 375 нм. Доза опромінення на підкладці складала 127 мДж/см², що відповідало оптимальному контрасту. Усі зразки проявлялись в проявнику ma-D 331/S протягом 60 с, для припинення процесу використовувалась деіонізована вода. Зразки промивались в ізопропанолі та осушувались потоком сухого азоту. Для нанесення золотих провідників та контактних площадок використовувався випарник електронно-променевого типу HVB 100. При такому процесі покриття, гранульований матеріал, в нашому випадку золото високої чистоти 99,999%.

Напилення триоксиду молібдену здійснювалось при тиску $2 \cdot 10^{-5}$ мбар за допомогою напилювальної установки електронно-променевого типу HVB 100 з тигельної вставки типу FАВМАТЕ®. Для напилення триоксиду молібдену були вибрані три рампи потужності з досить довгим часом на збільшення потужності та їхньою тривалістю. Це дозволяло поступово нагріти матеріал до точки, коли може початися осадження, в нашому випадку сублимація.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pan J, Zhang Y, Yin J, Guo P, Yang Y, Ren T-L. Principles and Applications of Two-Dimensional Semiconductor Material Devices for Reconfigurable Electronics. *Nanomaterials*. 2025; 15(3):201. <https://doi.org/10.3390/nano15030201>
2. Cao W., Bu H., Vinet M. *et al.* The future transistors. *Nature* 620, 501–515 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06145-x>
3. J. Wang, I. Verzhbitskiy and G. Eda. "Electroluminescent Devices Based on 2D Semiconducting Transition Metal Dichalcogenides" *Advanced Materials* 30, e1802687 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201802687>
4. M. Ye, D. Zhang and Y. Yap. "Recent Advances in Electronic and Optoelectronic Devices Based on Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides" *Electronics* 6, 43 (2017) DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics6020043>
5. K. S. Novoselov, A. Mishchenko, A. Carvalho and A. H. Castro Neto. "2D materials and van der Waals heterostructures" *Science* 353, aac9439 (2016) DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aac9439>

Elena König - Ph.D., Technical assistant (physics), SSU Ultrafast Electronics, Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter (MPSD), Hamburg, Germany

Осадчук Олександр Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіoeлектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Осадчук Ярослав Олександрович – д.т.н., доцент кафедри інформаційних радіoeлектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF MANUFACTURING A HIGH-PERFORMANCE MICROELECTRONIC DEVICE WITH NEGATIVE DIFFERENTIAL RESISTANCE BASED ON 2D NANOMATERIAL MoO₃

Abstract. A technology has been developed for manufacturing a MoO₃ device with negative differential resistance based on a 2D material, which is nanometer layers with a thickness of one atomic layer or unit cell. Under normal conditions, such materials are chemically stable and mechanically strong, but at the same time they are flexible. Several topologies of different configurations have been developed for manufacturing a high-performance microelectronic device with negative differential resistance based on 2d nanomaterial MoO₃. The topology consists of three layers: the 1st layer is the bottom electrode of the Ti/Au device, the second layer is the semiconductor material of amorphous molybdenum trioxide, and the third layer is the top electrode of the device also of Ti/Au.

Keywords: negative differential resistance, MoO₃ device, topology, microelectronic technology.

Elena König - Ph.D., Technical assistant (physics), SSU Ultrafast Electronics, Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter (MPSD), Hamburg, Germany

Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Osadchuk Iaroslav Oleksandrovych - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com