

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ МоОЗ-ПРИСТРОЯ З ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

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

²Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

Анотація. Розроблено технологію виготовлення МоОЗ-пристрою з від'ємним диференційним 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 кілька топологій різної конфігурації на основі діода Шоткі, 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 300μm x 300μm. 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 молибдену і третій шар — це верхній електрод пристрою також з Ti/Au.

Ключові слова: МоОЗ-пристрій, від'ємний диференційний опір, мікроелектронна технологія, топологія.

Abstract. The technology for manufacturing a MoO₃ device with a negative differential resistance based on a 2D material, which is nanometer layers with a thickness of one atomic layer or unit cell, has been developed. Under normal conditions, such materials are chemically stable and mechanically strong, yet flexible. Several topologies of different configurations have been developed based on the Schottky diode, both individual devices on one chip and arrays of four elements on a chip. This work presents two types of topology: 10μm x 10μm and 300μm x 300μm. For this, the open access program K-Layout was used. The topology consists of three layers: the 1st layer is the bottom electrode of the Ti/Au device, the second layer is the semiconducting material of amorphous molybdenum trioxide, and the third layer is the top electrode of the device, also made of Ti/Au.

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

Вступ

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]. 2D матеріали з'єднані між собою ковалентними зв'язками лише за допомогою слабких Ван-дер-Ваальсових взаємодій і мають пасивну поверхню [6]. Завдяки особливим властивостям 2D матеріалів відкриваються абсолютно нові можливості для розробки сучасних пристроїв [4, 5, 6]. Спочатку основна увага світових досліджень була зосереджена на графені, який є двовимірною модифікацією графіту і є найвідомішим представником 2D матеріалів.

В останні роки було досліджено велику кількість інших 2D матеріалів, деякі з яких мають дуже різні властивості. Існують 2D-модифікації з ізоляційними, провідними та напівпровідниковими властивостями, що є основою для повноцінної 2D-електроніки [7]. Сполуки молибдену також належать до цих матеріалів. Для нашої роботи було обрано триоксид молибдену, оскільки цей матеріал має цікаві оптичні властивості. Оксид молибдену являє собою хімічну сполуку з хімічною формулою МоО₃ з температурою плавлення 795 ° С, щільністю 4,69 г/см³ і тиском пари 10-4 Торр при ~ 900 ° С. Ці фізичні властивості дуже добре підходять під наш технологічний процес.

Процес виготовлення

Було розроблено кілька топологій різної конфігурації на основі діода Шоткі, як окремі пристрої на одному чіпі, так і матриці по чотири елементи на чіпі. У даній роботі представлено два види топології

10µmх10µm (див. Рис.1.) і 300µm х300µm. 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 триокису молібдену. Третій шар — це верхній електрод пристрою також з Ti/Au.

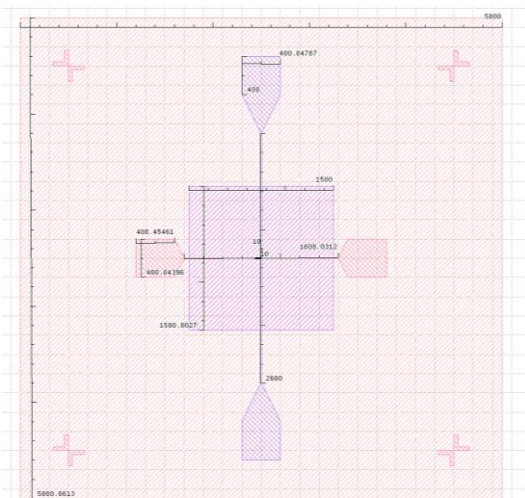


Рис.1. Приклад топології MoO3 пристрою з від'ємним диференціальним опором розміром 10µm х10µm

Нижній електрод із золота має довжину 1600 µm і ширину 10 µm, верхній електрод із золота має довжину 2600 µm і ширину 10 µm, шар триокису молібдену між ними має форму квадрату, розміром 1500 µm х 1500 µm. Контактні площадки мають розмір 400 µm х 400 µm, що в нашому випадку залежить від приладу для пайки виводів пристрою.

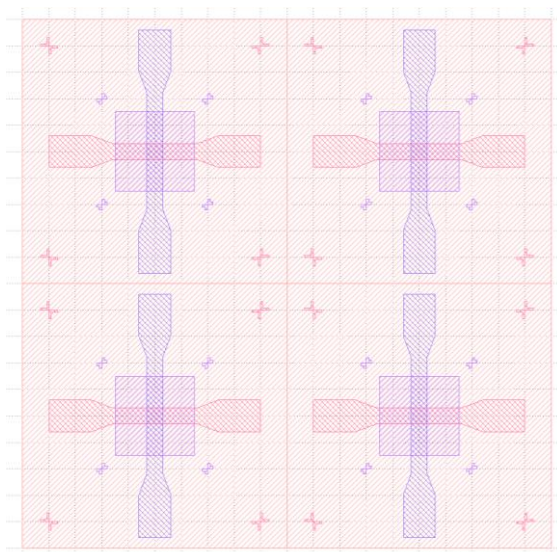


Рис. 2. Приклад топології матриці для MoO3 пристрою розміром 300 µm х300 µm

Для виготовлення MoO3-пристрою використовувався субстрат кремнію діаметром 6", товщиною в 700 µm, р-типу, з питомим опором до 50 Ом*см з орієнтацією кристалографічних осей (100) і термічно вирощеним шаром двоокису кремнію товщиною в 650 нм фірми Nova Electronic materials Inc. Субстрат розрізали на пластини-підкладки 10 мм х 10 мм для підпасування під технологічну лінійку за допомогою лазерної системи ProtoLaser U4 компанії LPKF. 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 променя літографічної установки.

Двошаровий резист експонувався в системі лазерної літографії µPG 101 від Heidelberg Instruments GmbH. Лазерна літографічна установка µPG 101 використовує режим прямого запису в ближньому

ультрафіолетовому діапазоні, а саме з довжиною хвилі 375 нм. Для експонування підкладок були використані наступні параметри: потужність лазера 10 мВт та його інтенсивність 40% при використанні фільтра з пропусканням 16%. При таких параметрах доза опромінення на підкладці складала 127 мДж/см^2 , 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 осушилися потоком сухим 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% в тиглях випаровується шляхом бомбардування його сфокусованим променем електронів високої енергії. Випарений матеріал поширюється в пучці пари і осідає на підкладках над тигельною вставкою з матеріалом. Для покращення адгезії золота на поверхні діоксиду кремнію підкладки, використовувався шар титану, товщиною в 10 нм. Товщина та структура шару контролювалась вибраними параметрами покриття та температурою підкладки. Завдяки точному контролю процесу нанесення покриття, наприклад, оптимальній рампі потужності електронного променя, вимиканню електронної гармати після досягнення необхідного значення товщини шару, тощо, на цій установці можна виготовлювати високоточні функціональні покриття із різних матеріалів. Для провідників та контактних площадок була вибрана товщина золота 200 нм. Це оптимальна товщина для подальших кроків процесу виготовлення MoO₃-пристрою, обумовлена товщиною подвійного шару фоторезисту, яка складає 980 нм, а також для якісної підпайки виводів на контактних площадках до плати, на якій буде розміщено MoO₃-пристрій для його подальшого дослідження.

Напилення триоксиду молібдену здійснювалось при тиску $2 \cdot 10^{-5}$ мбар за допомогою напилювальної установки електронно-променевого типу HVB 100 з тигельної вставки типу FABMATE®. Для напилення триоксиду молібдену були вибрані три рампі 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 сублімація. На початку осадження, керування потужністю переходить від наростання/затримки до ПІД-регулювання між джерелом живлення електронної гармати та контролером кристала кварцу. Це дає можливість ПІД-регулятору тримати потужність на потрібному рівні для регулювання швидкості експозиції, в нашому випадку - 0.5 ангстрем/с.

Процес lift-off для триоксиду молібдену також здійснювався за допомогою розчинника mg-REM 700 на протязі 30 хвилин. Після процесу lift-off для шару триоксиду молібдену знову наносилась подвійна система фоторезисту, описана вище і проводилась третя лазерна літографія, для створення металізації верхнього електроду із золота (див. Рис. 3).

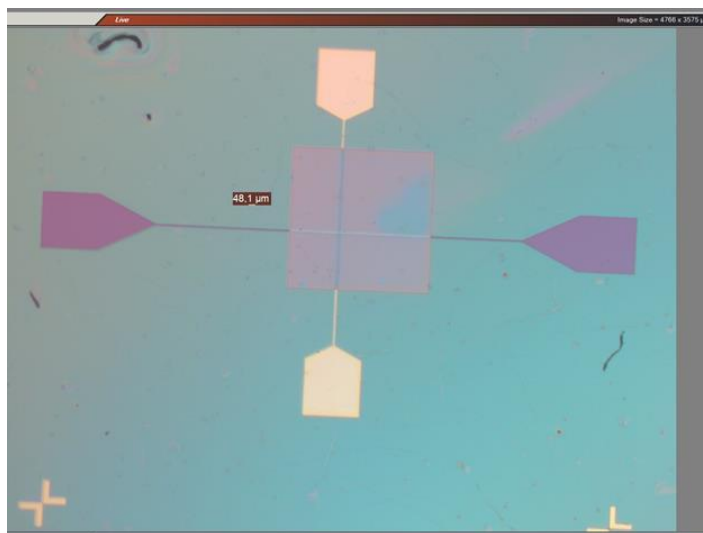


Рис. 3. Результат третьої лазерної літографії, для створення металізації верхнього електроду із золота на прикладі MoO₃-пристрою 10 мкм x10 мкм

Також було проведено вивчення складу шарів металізації та шару триоксиду молібдену за допомогою спеціального додатку з матеріалознавства до програми мікроскопа Кієнс Keyence K4.

Висновки

Розроблено технологію виготовлення МоОЗ-пристрою з від'ємним диференційним 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 кілька топологій різної конфігурації на основі діода Шоткі, як окремі пристрої на одному чіпі, так і матриці по чотири елементи на чіпі. У даній роботі представлено два види топології $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ і $300\mu\text{m}\times 300\mu\text{m}$. 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 молибдену і третій шар – це верхній електрод пристрою також з Ti/Au.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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>
2. M. Chhowalla, H. S. Shin, G. Eda, L.-J. Li, K. P. Loh and H. Zhang. "The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets" *Nature Chemistry* 5, 263 (2013)
3. 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>
4. 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>
5. 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>
6. F. Xia, H. Wang, Di Xiao, M. Dubey and A. Ramasubramaniam. "Two-dimensional material nanophotonics" *Nature Photonics* 8, 899 (2014)
7. A. K. Geim and I. V. Grigorieva. "Van der Waals heterostructures" *Nature* 499, 419 (2013)

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

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

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

Осадчук Володимир Степанович – д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.vs38@gmail.com

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

Осадчук Іарослав Олександрович - Ph.D., Associate Professor of the Department information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Осадчук Олександр Володимирович - 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

Осадчук Володимир Степанович – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.vs38@gmail.com