

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА НАНОЕЛЕКТРОНІКИ ТА МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХНІ

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

зі спеціальності 163 – «Біомедична інженерія»

на тему:

«Вплив концентрації максенів $Ti_3C_2T_x$ в полімері на фізико-хімічні та електричні властивості»

Остольський Владислав Вікторович

Завідувач кафедру

_____ проф. О.Д. Погребняк

«__» _____ 2021 р.

Науковий керівник

_____ проф. О.Д. Погребняк

«__» _____ 2021 р.

РЕФЕРАТ

Мета роботи – дослідити електричні та фізико-хімічні властивості максенів $Ti_3C_2T_x$ в полімері.

Дана робота націлена на дослідження нанокompозиту з максену на фізико-хімічні та електричні властивості. В результаті роботи було отримано частотні залежності для індуктивності, ємності та кута зсуву фази для різних температур.

В магістерській роботі було проведено дослідження з заданої теми. При виконанні завдання було розглянуті теми наноматеріалів, максенів, способу отримання матеріалу. Проаналізовані отримані дані. Знайдено, що досліджуваний матеріал через свою морфологію та структуру має мінімум два різних типи тунелювання частинок.

Робота викладена на 30 сторінках, зокрема містить 13 рисунків та список літератури із 36 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: НАНОМАТЕРІАЛИ, МАКСЕНИ, ЧАСТОТНА ЗАЛЕЖНІСТЬ, ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	5
1.1. Загальні відомості.	5
1.2. Максени.	6
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕРІАЛИ	11
2.1. Методика роботи.	11
2.2. Отримання матеріалу	11
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	14
ВИСНОВКИ	25
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	26

ВСТУП

Максени – це особливий тип 2D-матеріалу, який складається з тонких відшарованих листів карбїду або нїтриду перехїдного металу. Максени добре підходять для використання як захист, тому що вони можуть стабільно вироблятися у вигляді розпилюваного покриття, чорнила або фарби, тому їх можна наносити на текстиль, не додаючи великої ваги і не займаючи більше місця.

Наочним прикладом високої технологїчної ефективності може бути застосування максенів в гнучких антенах в діапазонї 2,4 ГГц (діапазони Wi-Fi і Bluetooth) для носимої електронїки. Вони вимагають високої гнучкості, щоб витримувати багаторазові вигини під час експлуатації. Розчин максенів на основі Ti_3C_2 в цьому випадку не тільки механїчно стабільний, але і випромїнює радіосигнали в 50 разів краще, нїж аналоги графена, і в 300 разів краще, нїж антени з випромїнює структурою з Ag. Однак виготовлення "наноантени з максенів" в кілька разів простїше, і в якості бонусу матерїал диспергується у водї, що дуже важливо для контакту з навколишнім середовищем.

Метою даної роботи є дослідження фізико-хімічних та електричних властивостей максенів для подальшого їх використання у нанотехнологїях.

РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальні відомості.

На сьогоднішній день відомо багато наноматеріалів, властивості яких відрізняються від звичайних матеріалів.

Наноматеріали – це матеріали та речовини, практично будь-якого походження, структурні розміри яких знаходяться в нанодіпазоні. Такі матеріали мають доволі незвичну для звичайних матеріалів атомно-кристалічну решітку та відмінними унікальними властивостями також мають назву ультрадисперсних матеріалів, ультрадисперсних систем, або наноструктурованих матеріалів. Ці матеріали призначені в основному для виробництва та виготовлення виробів, що будуть корисні людині.

Склад нанокристалічних матеріалів включає нанокластери. До нанокластерів відносяться кластери, розмір яких досягає 10 нм. Розмір цих кластерів на пряму впливає на специфічні властивості матеріалу. Чим менший розмір цього кластера, тим яскравіше виражені його властивості. Зменшення розмірів нанокристалів впливає на збільшення їх міцності. Це пов'язано з тим, що малі розміри нанокристалів мають знижену щільність дефектів структури вже існуючих дефектів, а також впливають на ймовірність утворення нових. При збільшенні міцності нанокристалів можна спостерігати підвищення їх пластичності, що відрізняється від звичайних кристалів.

Керамічні наноструктури мають дуже широке поширення на сьогодні. Завдяки тому, що ці матеріали мають високотемпературну міцність, легкість та хімічну стійкість, їх використовують в ортопедії, аерокерамічній техніці та стоматології, а також тоді, коли необхідні властивості водонепроникності та захисту від корозії.

Покриття з керамічних наноструктур підвищує деякі властивості матеріалів, а саме термостійкість, твердість та зменшення коефіцієнту тертя. Ці зміни призводять до підвищення строку експлуатації. Нанокерамічні

матеріали, які виробляють на основі бор карбїду, використовують для виготовлення бронезахисних кулестійких матеріалів.

Один з класів наноматеріалів – це нанокомпозити. Наявність в нанокомпозитних матеріалах невеликої кількості наночастинок, що відрізняє їх від звичайних композитів, сильно впливає на властивості цих нанокомпозитів. Наприклад, полімерна нанокомпозитна плівка, що має товщину 45 нм, а також має кристали цирконій діоксиду, має високу пружність та міцність. Завдяки цьому, ця плівка здатна утримати будь-яку рідину, яка у 70000 разів важча за саму плівку. Таку плівку застосовують у якості мембран і датчиків.

Основну роль у сучасній техніці відіграють плівки і покриття. Нанокристали, нанокомпозити та нанокераміка складають частину матеріалу наноструктурних плівок. Матеріал, на який було нанесено таке покриття, отримує унікальні властивості. При потраплянні води на такий матеріал, наприклад, скло, буде збирати воду в краплі. Однак, вода буде утворювати рівний шар на склі, якщо його покрити наночастинками кварцу або полімерними шарами. Вже вироблена спеціальна фарба для будинків, що «відштовхує» вологу та бруд, а також покриття для тканин, що має ті самі властивості.

1.2. Максени.

Одні із типів наноматеріалів – це максени.

Максени – це двовимірні карбїди і нітриди перехідних металів. Нова родина наноматеріалів була відкрита близько десяти років тому. Їх товщина становить лише кілька атомів, завдяки чому їх можна використовувати як ефективні каталізатори і сенсори різного призначення.

Максени можуть бути використані як жертвний матеріал для отримання оксидів перехідних металів. Так при нагріванні в кисневому середовищі Ti_3C_2 утворюється діоксид титану TiO_2 . При повільному нагріванні

утворюється структура типу рутил, а при швидкому – структура анатаз, що обумовлюється різною швидкістю дифузії титану вздовж поверхневого шару та з внутрішніх шарів титану. При використанні гідротермального методу можна проводити процедуру за порівняно невеликих температур.

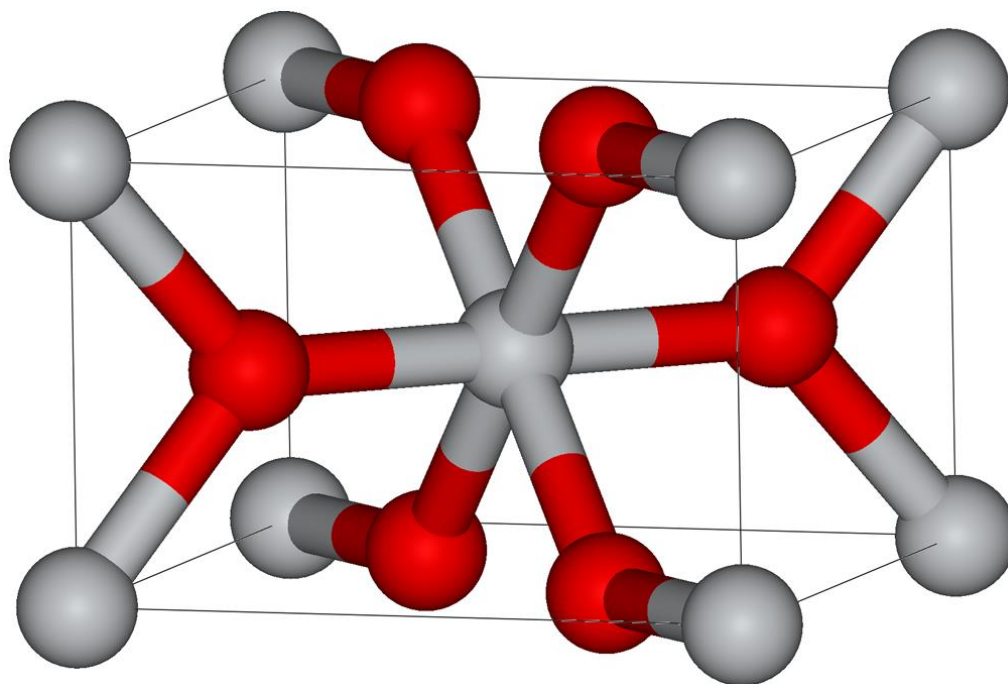


Рис. 1.1. Структура типу рутил.

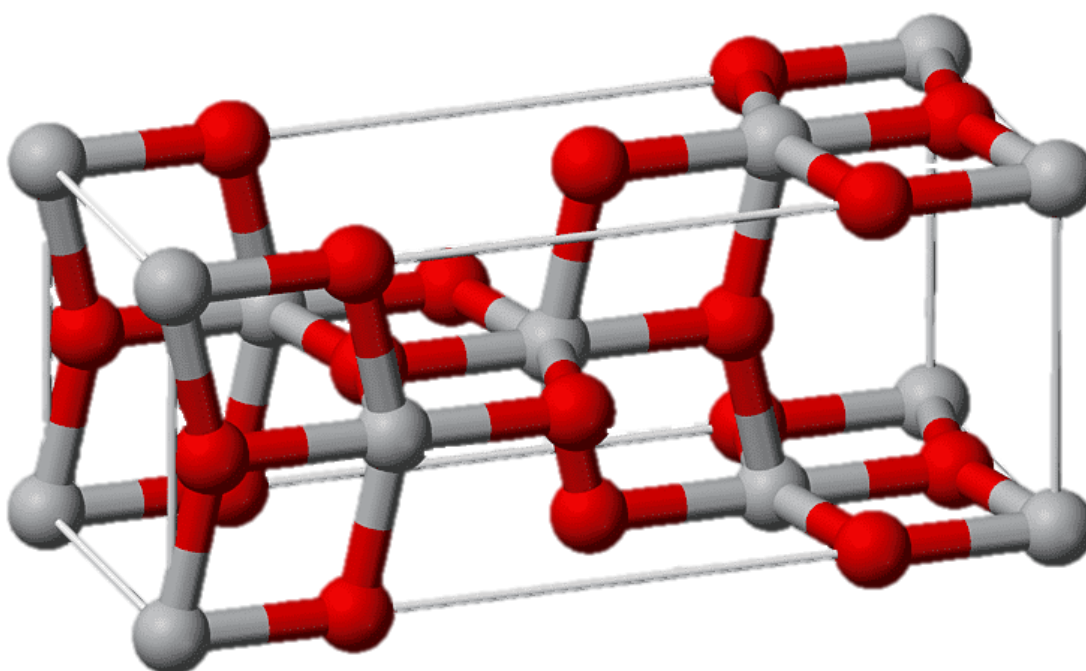


Рис. 1.2. Структура типу анатаз.

Зі структури та способу отримання максенів напрошується концепція супермаксенів – атомарних сендвічів, у яких максени різної природи є будівельними блоками для впорядкування в багатошарові структури. Однак отримання таких структур поки що утруднено тим, що для поділу шарів максенів використовуються досить грубі методики. Такі структури представляють винятковий інтерес для створення рентгенівських кристалів під м'яке рентгенівське випромінювання, де потрібен більший період, ніж дозволяють звичайні кристали.

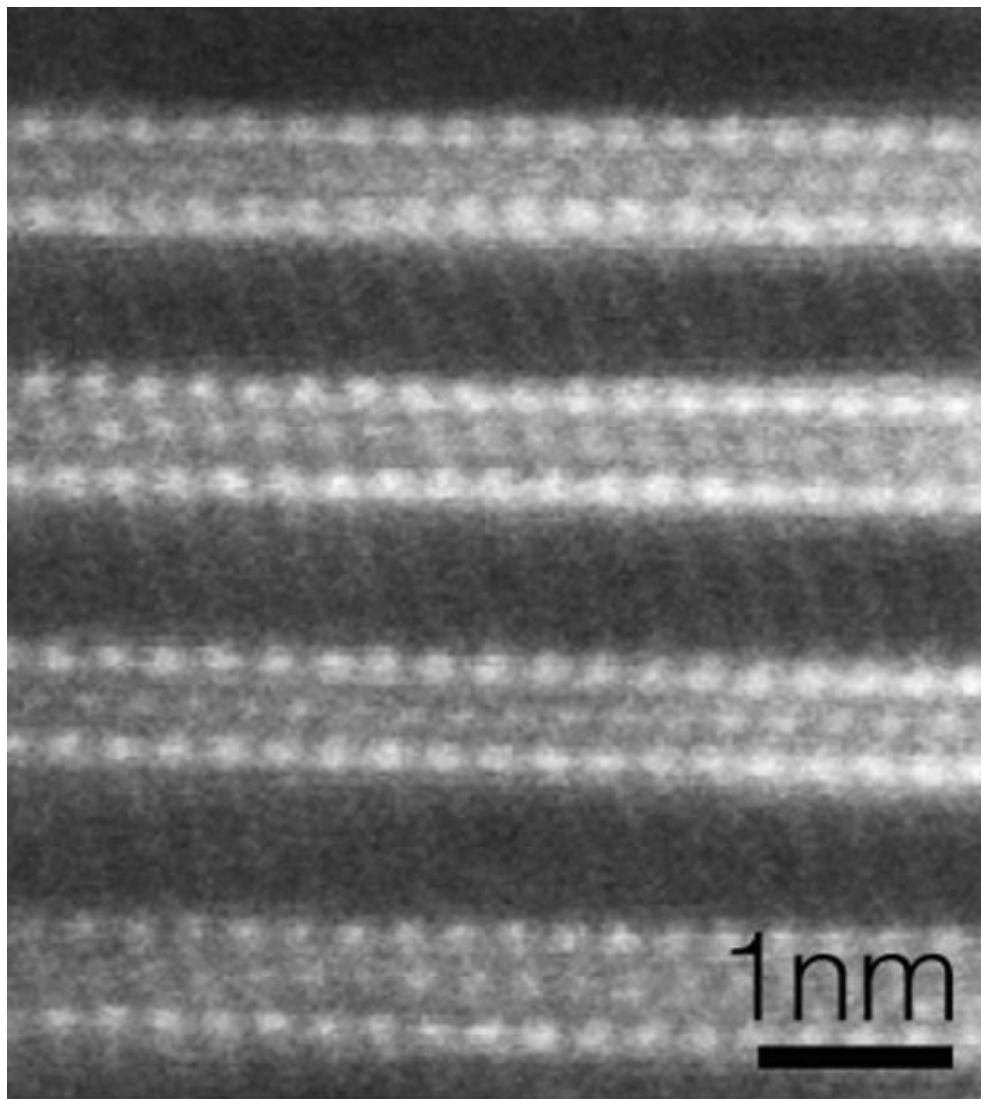


Рис. 1.3. Зображення електронної мікроскопії високої роздільної здатності шаруватої структури подвійного максена $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$

За багатьма властивостями максени вже перевершили графен. Наприклад, у багатошарових плівок провідність приблизно на порядок величини вище, ніж у відновленого оксиду графену. Це плазмові металеві матеріали, тобто стабільні двовимірні метали. До максенів таких матеріалів майже не існувало, тому що більшість двовимірних матеріалів або напівпровідники або напівметали.

Ключові особливості, що визначають продуктивність максенів, полягають у його високій електропровідності та двовимірній структурі. Коли електромагнітні хвилі вступають у контакт з максеном, деякі з них відразу ж відбиваються від його поверхні, тоді як інші проходять через поверхню, але втрачають енергію серед атомарно тонких шарів матеріалу. Нижні енергетичні електромагнітні хвилі, зрештою, відображаються назад і вперед від внутрішніх шарів, поки вони повністю не поглинаються в структурі.

Ще однією особливістю, що віщує користь максенів в області захисту пристроїв, що носяться вже на цьому етапі, є те, що його ефективність екранування залишається такою ж міцною, навіть коли він поєднується з полімером, для утворення композитного покриття. А по вазі максен навіть перевершує чисту мідь.

Концепція гнучкої електроніки була представлена кілька десятиліть тому, і з тих пір провідні полімери, органічні напівпровідники і аморфний кремній знайшли безліч застосувань в різних областях. Незважаючи на прогрес у цій галузі, виникають нові проблеми у зв'язку з розширенням застосування імплантованих систем з високою гнучкістю і біосумісністю. Серцеві пластирі, електроди, стимулятори мозку і м'язів, а також нейронні провідники вимагають застосування провідної біосумісної полімерної мембрани з задовільними електронними властивостями. Провідні полімери та мембрани з провідними матеріалами, включаючи графен та вуглецеві нанотрубки, широко використовуються при розробці біомедичних пристроїв.

Як правило, для отримання максенів використовується простий метод: селективне травлення МАХ-фази зверху вниз в плавиковій кислоті для видалення елемента (Al, Si або Ga). Кінцевою стадією розробки максенів є інтеркаляція і/або розшарування, при яких максен може поліпшити вихідні характеристики і досягти ще більш універсальних властивостей.

Максени в фотовольтаїці досі застосовувалися для шарів і електродів перенесення дірок/електронів. Як елементи сонячних батарей, вони демонструють набагато кращу продуктивність в перетворенні енергії, зменшений стан пастки і кращу передачу заряду.

Наочним прикладом високої технологічної ефективності може бути застосування максенів в гнучких антенах в діапазоні 2,4 ГГц (діапазони Wi-Fi і Bluetooth) для носимої електроніки. Вони вимагають високої гнучкості, щоб витримувати багаторазові вигини під час експлуатації. Розчин максенів на основі Ti_3C_2 в цьому випадку не тільки механічно стабільний, але і випромінює радіосигнали в 50 разів краще, ніж аналоги графена, і в 300 разів краще, ніж антени з випромінює структурою з Ag. Однак виготовлення "наноантени з максенів" в кілька разів простіше, і в якості бонусу матеріал диспергується у воді, що дуже важливо для контакту з навколишнім середовищем.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

2.1. Методика роботи.

Матеріал, який використовувався для дослідження, був отриманий методом травлення. Методом травлення треба було звільнити матеріал від Al. Щоб повністю звільнити матеріал від Al, потрібно було створити кислий розчин в якому алюміній створить захисний шар, який в свою чергу буде видалений за допомогою плавикової кислоти. Після видалення Al, потрібно було позбавити розчин від надлишку кислоти. Для цього був використаний метод повторюваного центрифугування. Після кожної ітерації потрібно було видалити осад, щоб кислотність середі дорівнювала приблизно 6. Після цього потрібно було розділити максен на пластівці Ti_3C_2 для подальшого дослідження.

Отримані максени піддають дослідженню XRD та SEM. Тестові зразки створювались методом крапельної сушки.

2.2. Отримання матеріалу

Максен $Ti_3C_2T_x$, який використовувався в дослідженні, отримали травленням шаруватого потрійного карбиду Ti_3AlC_2 сумішшю соляної кислоти (HCl) і фториду літію (LiF). Розчин для травлення готували наступним чином. Дванадцяти мольний розчин соляної кислоти об'ємом 200 мл додавали до 50 мл деіонізованої води з отриманням дев'яти мольного розчину соляної кислоти об'ємом 250 мл та почали перемішувати. При перемішуванні додавали фторид літію масою 16 г. Отриману суміш розміщували в пластиковий контейнер об'ємом 500 мл. Порошок потрійного карбиду Ti_3AlC_2 масою 10 г та розміром частинок менше 40 мкм поступово додавали в суміш. Підготовлену суміш протягом 24 год постійно перемішували та витримували температуру 25 °C. В результаті утворився шар алюмінію, який був видалений плавиковою кислотою, яку в свою чергу приготували з соляної кислоти та

літій фториду. Як результат, були отримані пластівці Ti_3C_2 зі слабкими зв'язками Ван-дер-Ваальса.

Після травлення отриману суспензію максенів промивали в деіонізованій воді при використанні методу повторюваного центрифугування для видалення надлишку кислоти. Кожен цикл центрифугування тривався 10 хвилин та проходив при 3500 об/хв. Після кожного циклу кислотний осад декантували та додавали свіжу порцію деіонізованої води, повторним диспергуванням і ще одним циклом центрифугування. Промивання повторювалось до тих пір поки значення рН не досягло 6. Отриману суспензію, що містить максени, піддавали процесу розшарування, щоб відокремити пластівці максену Ti_3C_2 в колоїдний розчин на водній основі.

Розшаруванню сприяла інтеркаляція іона Li^+ між пластівцями Ti_3C_2 після поділу в колоїдний розчин. Розчин для розшарування за допомогою інтеркаляції готували наступним чином. Літій хлорид масою 2 г додавали до деіонізованої води об'ємом 40 мл в пластиковому контейнері об'ємом 50 мл. У приготований розчин додавали два грами протравленої суспензії максенів. Процес проводили при температурі 35 °C протягом 24 год при постійному перемішуванні. Після інтеркалювання в розчині $LiCl$ суспензію максенів промивали за допомогою повторюваних циклів центрифугування (по 10 хвилин кожен цикл при 3500 об/хв), декантування супернатанта і повторного диспергування у свіжій доданій деіонізованій воді до тих пір, поки супернатант не стане прозорим до чорного кольору, сигналізуючи про поділ пластівців максенів в колоїдний розчин. На цьому етапі супернатант максенів після центрифугування збирають і зберігають. Промивання проводять до тих пір, поки супернатант після центрифугування знову не стане прозорим. Зібраний супернатант, що містить максени, центрифугують при 6000 об/хв протягом 1 год для отримання концентрованого осаду максенів.

Отриманий максен досліджують дифракцією рентгенівських променів (XRD) і методом скануючої електронної мікроскопії (SEM). Для

рентгенівського дослідження суспензію максенів поміщали на квадратні скляні зразки зі стороною 24 мм у вигляді тонкої непрозорої плівки і давали висохнути у вакуумі. Для дослідження SEM краплі розведеного колоїдного розчину максенів у воді поміщали на шматочки кремнієвої пластини і давали висохнути у вакуумі.

Для створення тестових зразків використовували метод крапельної сушки. Розчин максенів наносили на кристали натрій хлориду за допомогою вуглецевої плівки, яка далі розчинялася у воді, а потім уловлювалася мікроскопічною сіткою з міді. Розрахунок діаграм дифракції електронів обраної області (SAED) був виконаний з використанням стандарту Al.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Обидва кінці тестуємого нанокompозиту були покриті тонким шаром срібної плівки. Товщина плівки дорівнювала приблизно 10 мкм. Це було зроблено для усунення перехідного опору, який в свою чергу формувався між зразком і контактами. Приклад показаний на рисунку 3.1.

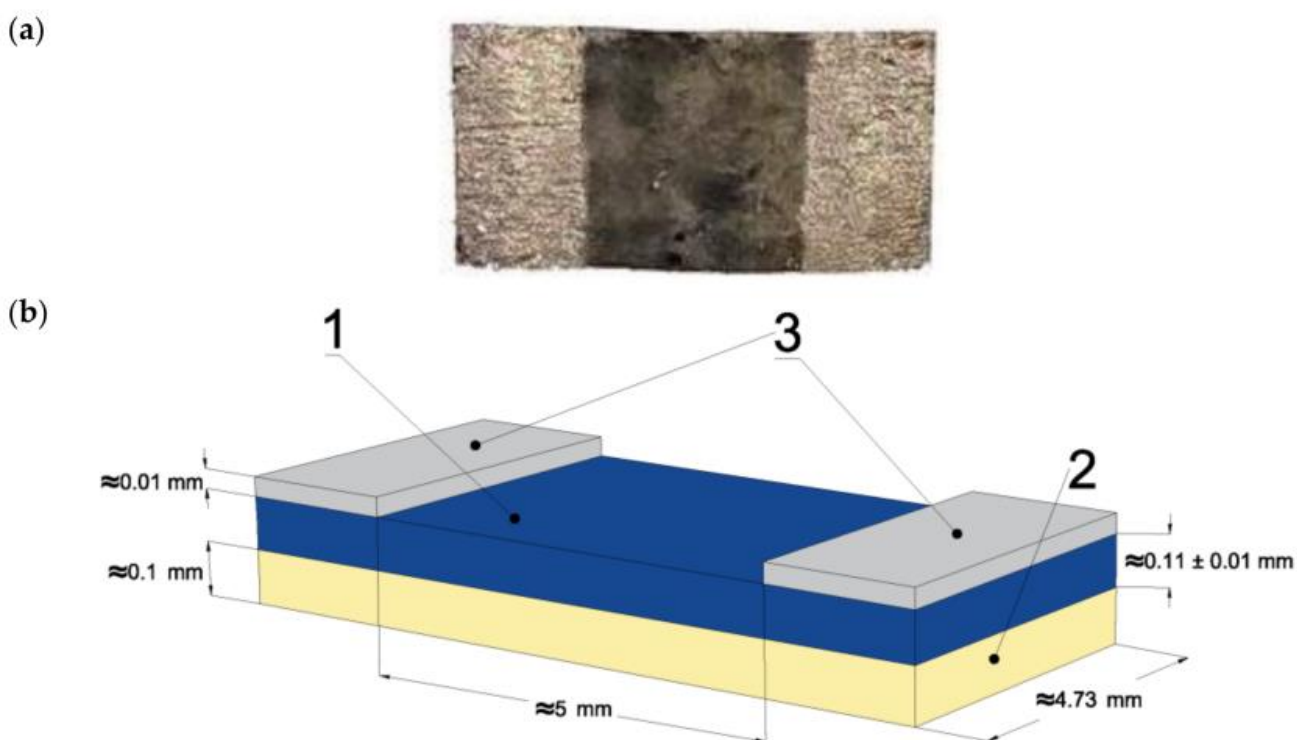


Рис. 3.1. Фотографія (а) і вид (б) зразка нанокompозиту: 1 – шар нанокompозит, 2 – діелектрична підкладка, 3 – контакти з срібної пасті.

Як показано на рисунку 3.1, при подачі змінного струму на кінці нанокompозиту, цей струм протікає між двома контактами. Це означає, що обидві складові струму, як реальна так і уявна, яка в свою чергу складається з ємнісного і індуктивного струмів, протікають між однаковими контактами. При цьому, в нанокompозитному шарі всі ці струми протікають між однаковими контактами. Діапазон температур, які підходять для вимірювання було обрано від 20 К до 305 К. Частотний діапазон було обрано від 50 Гц до 1

МГц. При виконанні вимірювань були зняті наступні параметри: індуктивність, ємність та кут зсуву фази.

На рисунку 3.2 надані результати XRD і SEM аналізу максену. Рисунок 4 (а) являє собою рентгенограму, яка показує, що отриманий в результаті матеріал – це чистий максен Ti_3C_2 . На рисунку 4 (b,c) представлений SEM аналіз з різним збільшенням (b – 1 мкм, c – 500 нм). Згідно SEM максен має розмір 25 до 500 нм.

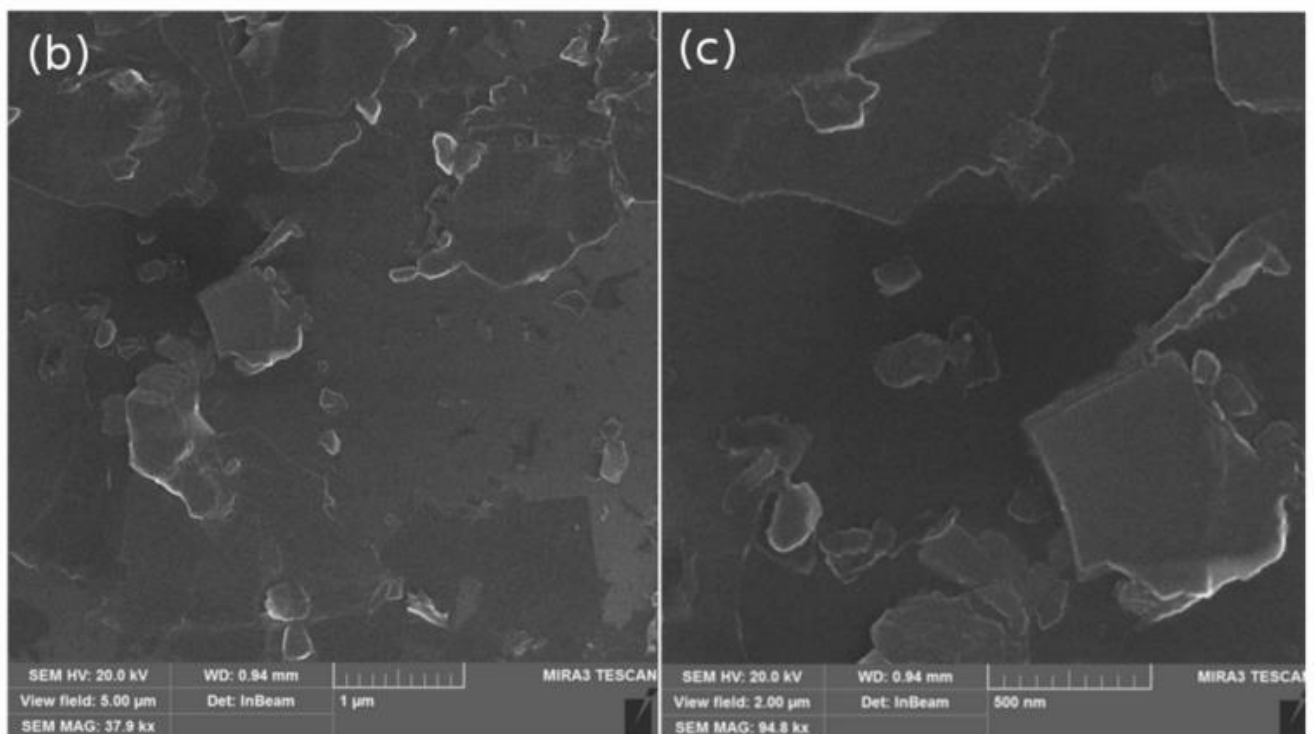
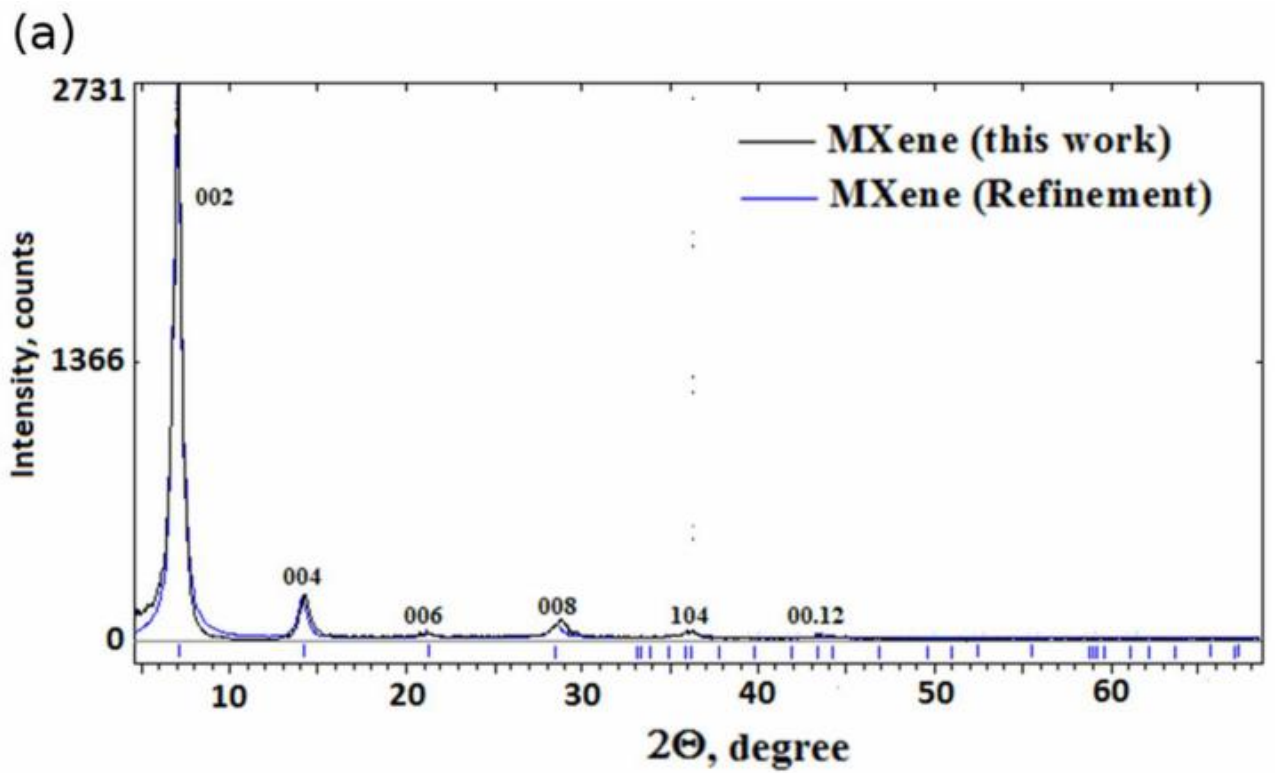


Рис. 3.2. XRD (a) і SEM (b, c – різні збільшення) аналізи.

Рисунок 3.3 (а, б) добре зображені зразки максену $Ti_3C_2T_x$. Схоже, що зразки демонструють гарне відлущування.

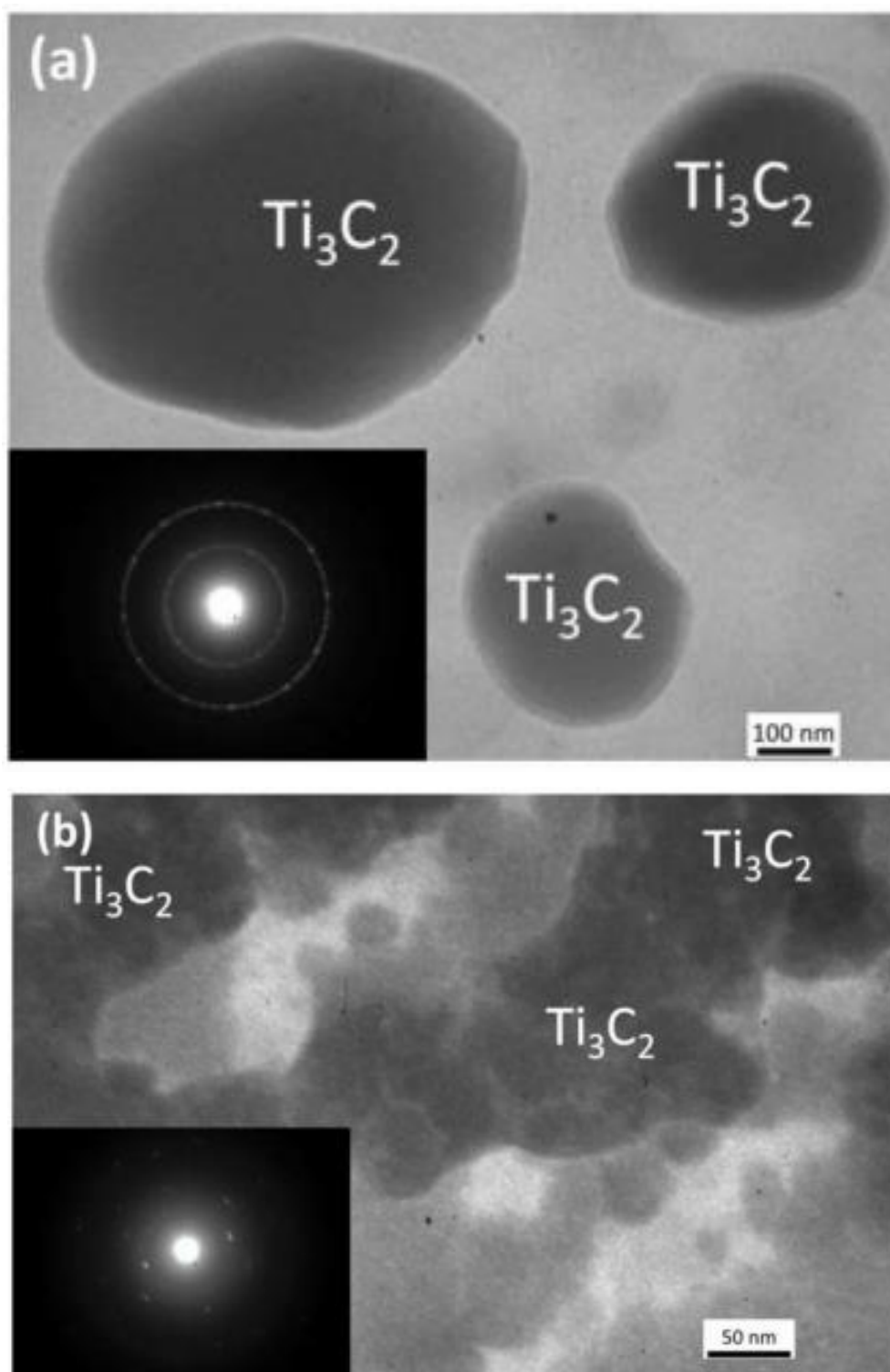


Рис. 3.3. ТЕМ-зображення структури максенів Ti_3C_2 і їх електронні дифрактограми: краплі з високою концентрацією (а), пластівці з низькою концентрацією (б)

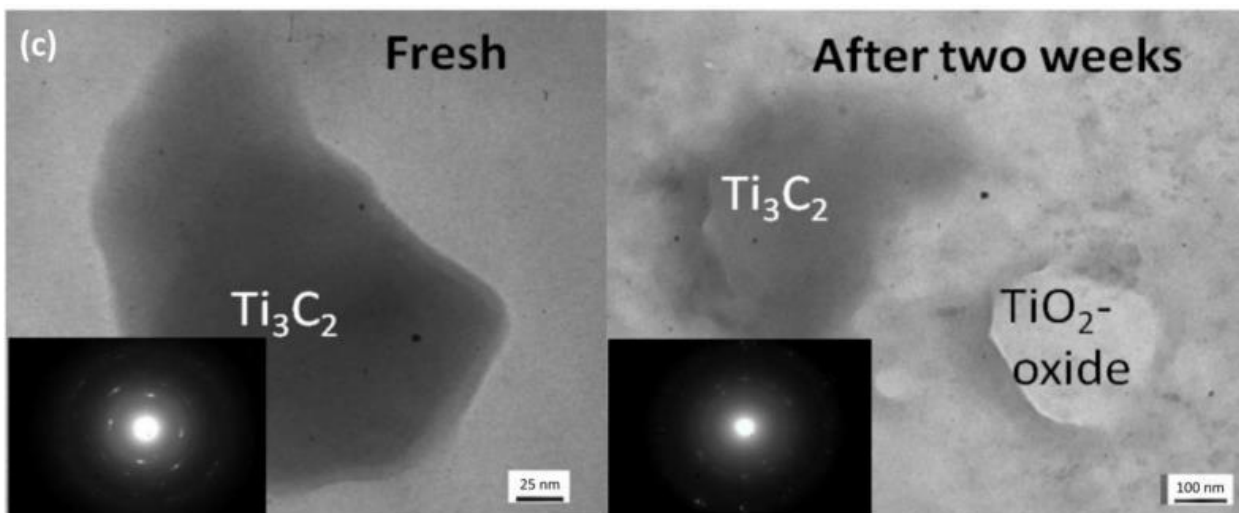


Рис. 3.4. ТЕМ-зображення структури максенів Ti_3C_2 і їх електронні дифрактограми: тест на окислення.

Через те, що в деяких місцях товщина максенів близька до атомних відстаней, вони майже прозорі для електронного променя. Висококристалічна гексагональна структура максенів Ti_3C_2 була виявлена за допомогою SAED аналізу. Хороша електропровідність забезпечується завдяки розподілу титану в кристалічній решітці. Монокристалічність або полікристалічність структура максенів залежить від товщини та концентрації максенів. Для перевірки реакції на окислення зразки залишили на відкритому місці на два тижні. Як результат, кристалічність зразків зменшилась, що показано на рисунку 3.4. Деякі частинки окислились формуюючи діоксид титану. Однак окислення відбувалося лише локально. Окрім цього, структура максену змінилась після впливу електронного променя. Окислення зразків було локальним та зворотнім після термічного відпалу, що підтверджувалося заміною білих областей чорними.

На рисунку 3.5 показане сканування EDS. З рисунку видно, що розподіл волокон є випадковим. Середній діаметр волокон складає $1,41 \pm 0,33$ мкм. Більшу частину простору займають нанолісти максену. Даний фактор добре підходить для переносу електронів. На графіку можна побачити, що найбільш інтенсивний сигнал (майже 74%) поступає від лінії C-Ka. Зв'язування максену

з функціональними групами підтверджується сигналами O, F і Cl. Як ми бачимо, на діаграмі відсутній Al. Це означає, що під час відлущування він повністю видалився.

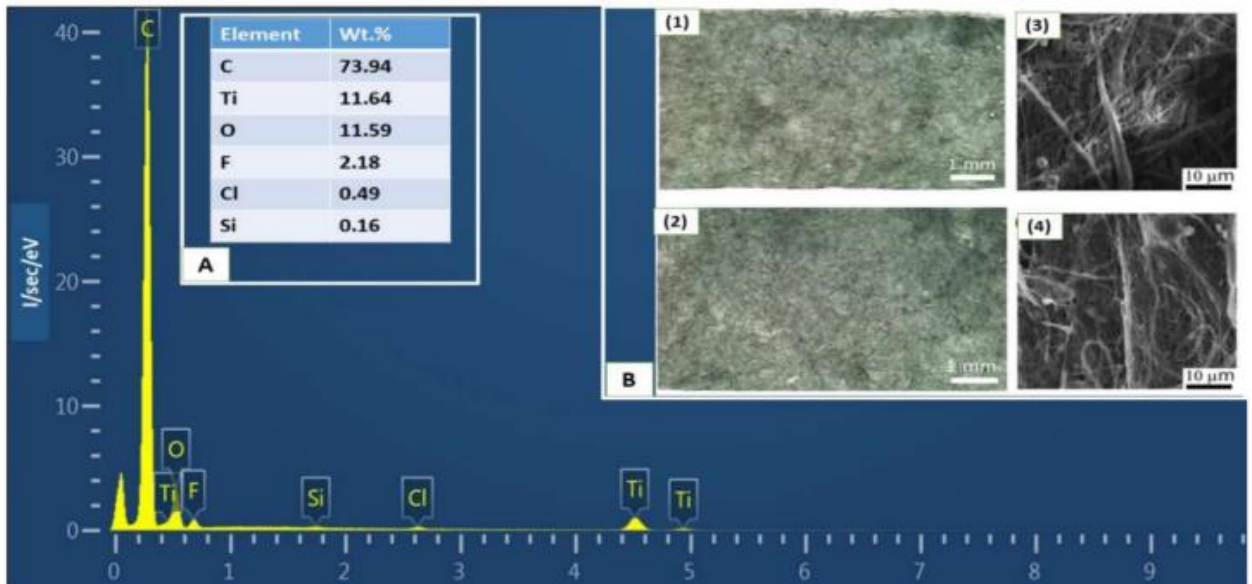


Рис. 3.5. Спектр EDS максену з розподілом елементів. Вставка (A) – масові частки елементів. Вставка (B) – оптичні (1) і (2), а також зображення SEM (3) і (4) композитних каркасів максену..

Рисунок 3.6 відображає частотну залежність ємностей, які були виміряні в паралельній схемі. На рисунку показані шість сигналів в діапазоні температур 20 К–305 К.

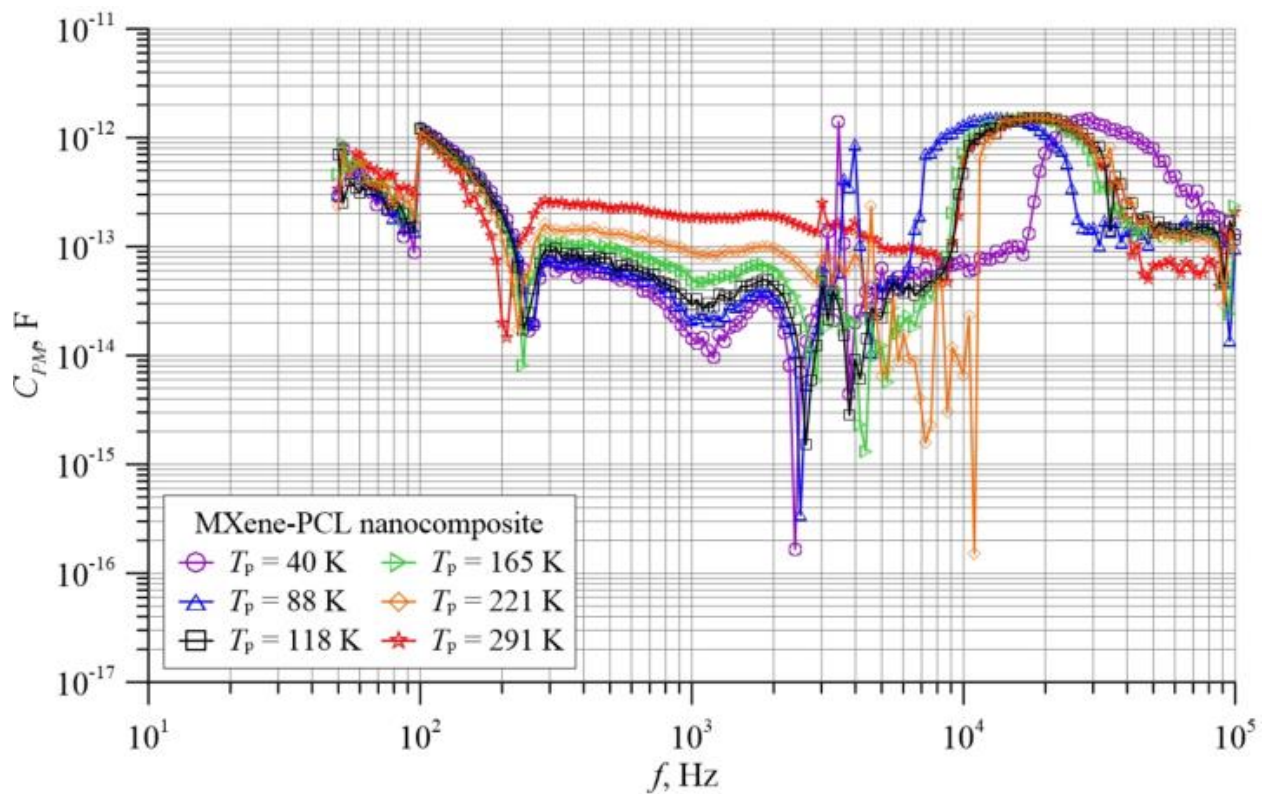


Рис. 3.6. Частотна залежність ємності максену.

З рисунку видно, що при збільшенні частоти значення ємності повільно зменшуються. Ці значення знаходяться в діапазоні від $1,7 \cdot 10^{-12}$ Ф до приблизно $4 \cdot 10^{-13}$ Ф. Отримані значення ємності низькі через те, яку форму має зразок та він має під'єднані до нього контакти, що було показано на рисунку 3.1. Проаналізувавши рисунок можна зробити висновок, що площа поперечного перерізу зразка дорівнює площі поперечного перерізу нанокompatитного шару.

Товщина діелектрика дорівнює відстані між контактами. Через це ємність стає дуже низькою. На рисунку показано, що отриманий максен має серію мінімумів на ряду з повільним зменшенням ємності при збільшенні частоти. При частотах вище 2200 Гц спостерігаються різкі мінімуми. Через те, що вони знаходяться дуже близько, то визначити значення частоти достатньо важко. Однак, ці мінімуми практично зникають при температурі 291 К. Дуже чіткий максимум спостерігається в діапазоні частот приблизно від 10^4 Гц до 10^5 Гц. Положення максимуму, в залежності від температури, відбувається на

частотах приблизно від $1,3 \cdot 10^4$ Гц до $3 \cdot 10^5$ Гц. Великі коливання амплітуд, які відбуваються при частотах вище 10^5 Гц, повністю заважають вимірам ємності. Скоріш за все, ці коливання були пов'язані з унікальною структурою максену. Але пояснення цих коливань виходить за рамки даної роботи. Через це було обране обмеження частот в 10^5 Гц.

З рисунка 3.6 видно, що при частоті в 100 Гц температура не впливає на глибину мінімуму. Цей опис підходить і для частоти в 200 Гц. При збільшенні температури мінімальне значення ємності переходить до значень більш низьких частот. При частоті в 1100 Гц підвищення температури не змінює частоту, але знижує значення ємності. Однак при 291 К мінімум майже зникає. Якщо дивитись на наступний мінімум, що знаходиться на частоті близько 2200 Гц, то можна побачити, що при підвищенні температури мінімум зміщується до більш високих частот. Також видно, що різниця між мінімумами достатньо велика, що означає, що при підвищенні температури ємність буде дуже швидко збільшуватись.

При дослідженні мінімумів, розташованих у діапазоні $10^4 - 10^5$ Гц, глибина мінімумів, також швидко зменшується з підвищенням температури і повністю зникає при температурі 291 К. З цього можна зробити висновок, що в максені існує два типи тунелювання. Це підтверджується різними способами зміни мінімумів при зміні температури. До першої групи можна віднести мінімуми при частотах 100 та 200 Гц. До другої – 1100 Гц і 2200 Гц, а також в області частот $10^4 - 10^5$. Однак мінімуми першої групи не залежать від змін температури. Про другу групу можна сказати, що при збільшенні температури мінімуми будуть швидко зменшуватися. Однак для температури в 291 К мінімуми зникають. Різні структури наночастинок, що взаємодіють між собою, можуть бути причиною різних типів тунелювання.

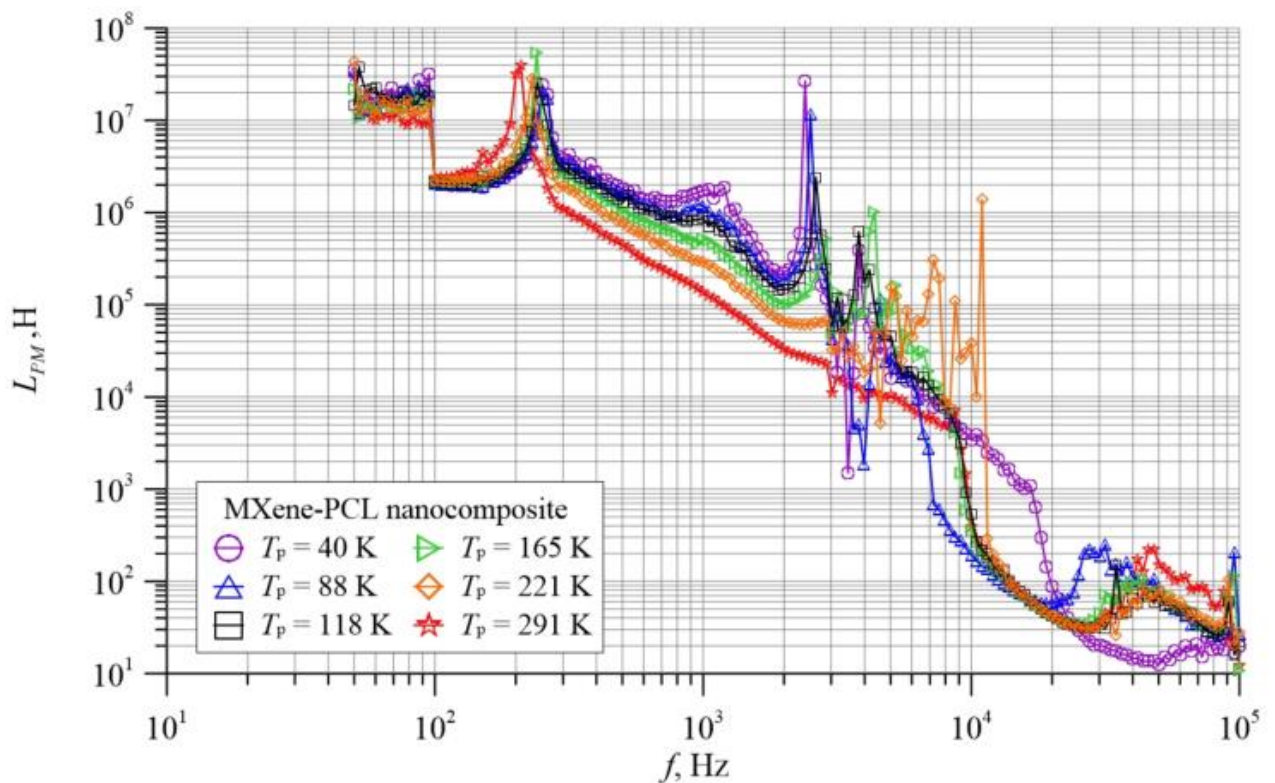


Рисунок 3.7. Частотна залежність індуктивності максену.

На рисунку 3.7 показана частотна залежність індуктивності максену. На діаграмі можна побачити 6 сигналів аналогічно до рисунку 3.6. На рисунку видно, що залежність має ряд максимумів. При зіставленні з рисунком 3.6 можна відмітити, що положення максимумів співпадає з положенням мінімумів. З цього можна зробити висновок, що на частотах піків трапляється паралельний резонанс.

При підключенні опору починається спад максимального значення індуктивності. При частоті в 2200 Гц максимум найбільш близький до резонансної частоти. Амплітуда цього максимуму становить декілька порядків. Достатньо чіткі мінімуми можна спостерігати на частотах приблизно від $1,3 \cdot 10^4$ Гц до $3 \cdot 10^4$. При порівнянні рисунку 3.6 та рисунку 3.7, можна зробити висновок, що мінімуми індуктивностей збігаються з максимумами ємностей. Діапазон $10^3 - 10^4$ Гц має основну кількість різких чітко виражених максимумів.

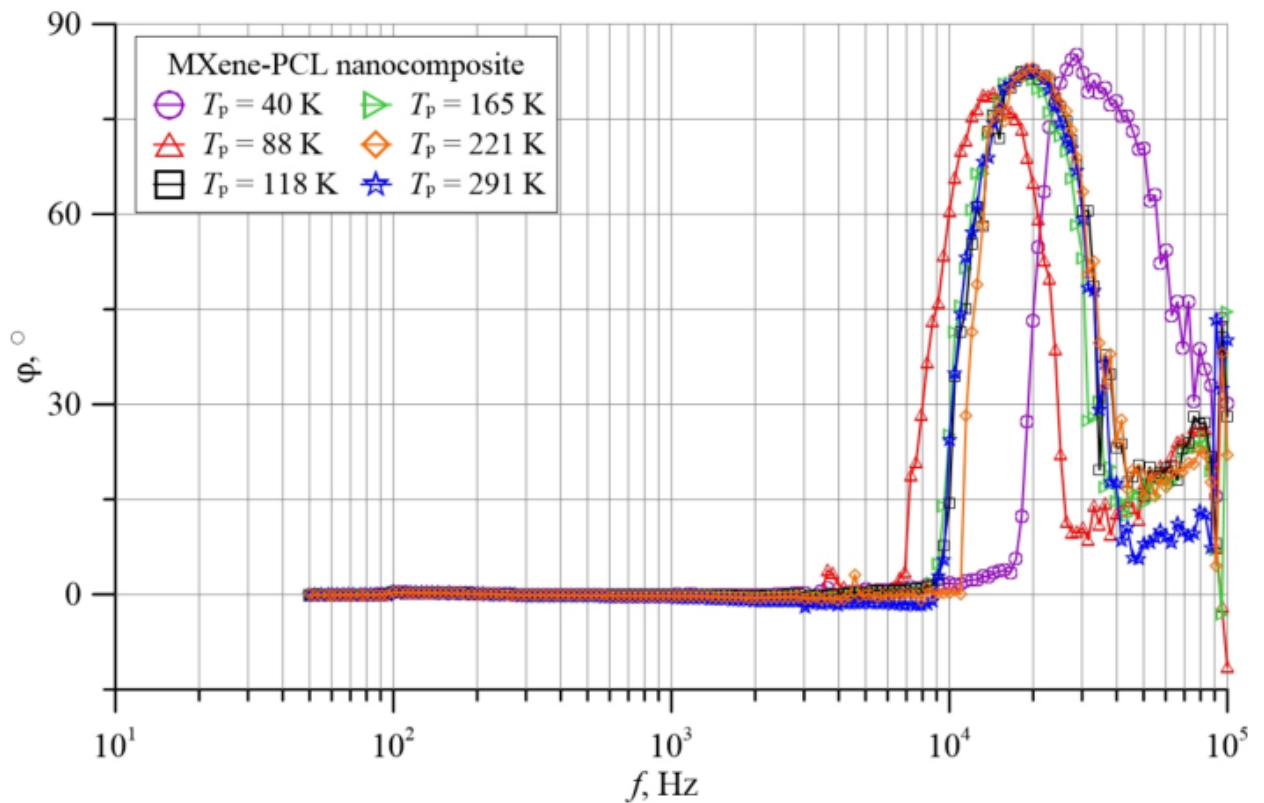


Рисунок 3.8. Частотна залежність кута зсуву фази ϕ максену.

Рисунок 3.8 представляє собою графік частотної залежності кута зсуву фази. На рисунку видно, що показники зсуву фази в діапазоні до 10^3 Гц майже близькі до 0° . При зростанні частоти можна побачити, як показники кута зсуву падають нижче нуля. Це продовжується до приблизно 10^4 Гц, а після цього показники кута зсуву різко починають зростати. Той факт, що показники кута зсуву фази були негативними показує, що в області частот від 10^3 Гц до 10^4 Гц ємнісна складова більша в порівнянні з індуктивною складовою.

Діапазон частот $10^4 - 10^5$ Гц має достатньо великі максимуми, які приблизно дорівнюють від 80° до 85° , які в свою чергу залежать від температури. При збільшенні частоти починаючи з 10^4 Гц трапляється різкий стрибок кута зсуву фази до максимальних значень. При подальшому збільшенні частоти показники кута зсуву фази починають спадати, але залишаються позитивними. В свою чергу, це дає нам зрозуміти, що індуктивна складова сильно перевищує ємнісну. Але близько до значень 10^5 Гц

індуктивна складова починає знову ставати меншою за ємнісну, а кут зсуву фази знову стає негативним. Подібна поведінка спостерігається в усіх нанокompозитах, які мають частинки провідної фази в діелектричних матрицях.

ВИСНОВКИ

Робота присвячена достатньо важливій темі, а саме дослідження максенів на електричні та фізико-хімічні властивості. Робота має перспективу в подальшому поглибленні в тему оскільки не повністю розкриває сутність проблеми.

Лускаті наночастинки максену отримали монокристалічну структуру Ti_3C_2 без інтерметалічних фаз. Попередні аналізи показують їх відносно високу швидкість окислення, тому їх осадження на проводилося в інертній атмосфері. Хімічний аналіз EDS мембран з покриттям підтвердив відсутність Al і виявив рівномірний розподіл максенів, пов'язаних з кінцевими групами.

Дослідження ємності, індуктивності і кута зсуву фази максену проводилися за допомогою вимірювача імпедансу в діапазоні частот вимірювань від 50 Гц до 1 МГц при температурах від 20 К до 305 К.

Вимірювання індуктивності нанокompозиту показали, що на його частотній залежності є чіткі різкі максимуми, положення яких точно збігається з положенням мінімумів для частотної залежності ємності. Це вказує на наявність паралельних резонансів у нанокompозиті.

Було знайдено, що в діапазоні частот до 10^4 Гц кут зсуву фази майже рівний нулю та іноді приймає негативні значення. Однак при подальших збільшеннях частоти кут зсуву досягає приблизно 85° .

Через те, що в нанокompозиті присутні паралельні резонанси, то це показує наявність щонайменше двох різних типів тунелювання. Скоріш за все причиною цього є відмінність у морфології та структурі наночастинок між якими виникає тунелювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Shukla, V. The tunable electric and magnetic properties of 2D MXenes and their potential applications. *Mater. Adv.* **2020**, *1*, 3104–3121.
2. Ling, Z.; Ren, C.E.; Zhao, M.-Q.; Yang, J.; Giammarco, J.M.; Qiu, J.; Barsoum, M.W.; Gogotsi, Y. Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high capacitance. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2014**, *111*, 16676–16681.
3. Ming, F.; Liang, H.; Huang, G.; Bayhan, Z.; Alshareef, H.N. MXenes for Rechargeable Batteries Beyond the Lithium-Ion. *Adv. Mater.* **2021**, *33*, 2004039.
4. Agresti, A.; Pazniak, A.; Pescetelli, S.; Di Vito, A.; Rossi, D.; Pecchia, A.; Auf der Maur, M.; Liedl, A.; Larciprete, R.; Kuznetsov, D.V.; et al. Titanium-carbide MXenes for work function and interface engineering in perovskite solar cells. *Nat. Mater.* **2019**, *18*, 1228–1234.
5. Zhang, Z.; Li, Y.; Liang, C.; Yu, G.; Zhao, J.; Luo, S.; Huang, Y.; Su, C.; Xing, G. In Situ Growth of MAPbBr₃ Nanocrystals on Few-Layer MXene Nanosheets with Efficient Energy Transfer. *Small* **2020**, *16*, 1905896.
6. Wang, J.; Cai, Z.; Lin, D.; Chen, K.; Zhao, L.; Xie, F.; Su, R.; Xie, W.; Liu, P.; Zhu, R. Plasma Oxidized Ti₃C₂T_x MXene as Electron Transport Layer for Efficient Perovskite Solar Cells. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13*, 32495–32502.
7. Yang, L.; Dall’Agnese, Y.; Hantanasirisakul, K.; Shuck, C.E.; Maleski, K.; Alhabeab, M.; Chen, G.; Senehira, Y.; Jena, A.K.; Shen, L.; et al. SnO₂-Ti₃C₂ MXene electron transport layers for perovskite solar cells. *J. Mater. Chem. A* **2019**, *7*, 5635–5642.
8. Levitt, A.S.; Alhabeab, M.; Hatter, C.B.; Sarycheva, A.; Dion, G.; Gogotsi, Y. Electrospun MXene/carbon nanofibers as supercapacitor electrodes. *J. Mater. Chem. A* **2019**, *7*, 269–277.
9. Gupta, S.; Navaraj, W.T.; Lorenzelli, L.; Dahiya, R. Ultra-thin chips for high-performance flexible electronics. *Npj. Flex. Electron.* **2018**, *2*, 8.
10. Martiradonna, L. A solid base. *Nat. Mater.* **2015**, *14*, 962.

11. Wang, Z.; Sun, L.; Ni, Y.; Liu, L.; Xu, W. Flexible Electronics and Healthcare Applications. *Front. Nanotechnol.* **2021**, *3*, 625989.
12. Shen, W.; Zhang, X.; Huang, Q.; Xu, Q.; Song, W. Preparation of solid silver nanoparticles for inkjet printed flexible electronics with high conductivity. *Nanoscale* **2014**, *6*, 1622–1628.
13. Kyrylenko, S.; Kornienko, V.; Gogotsi, O.; Oleshko, O.; Kolesnyk, M.; Mishchenko, O.; Zahorodna, V.; Buranich, V.; Pogrebnyak, A.; Zozulia, Y.; et al. Bio-functionalization of Electrospun Polymeric Nanofibers by Ti₃C₂T_x MXene. In Proceedings of the 2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), Sumy, Ukraine, 9–13 November 2020.
14. Gogotsi, Y.; Anasori, B. The Rise of MXenes. *ACS Nano* **2019**, *13*, 8491–8494.
15. Hope, M.A.; Forse, A.C.; Griffith, K.J.; Lukatskaya, M.R.; Ghidui, M.; Gogotsi, Y.; Grey, C.P. NMR reveals the surface functionalisation of Ti₃C₂ MXene. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2016**, *18*, 5099–5102.
16. Song, Q.; Ye, F.; Kong, L.; Shen, Q.; Han, L.; Feng, L.; Yu, G.; Pan, Y.; Li, H. Graphene and MXene Nanomaterials: Toward High-Performance Electromagnetic Wave Absorption in Gigahertz Band Range. *Adv. Funct. Mater.* **2020**, *30*, 2000475.
17. Lipatov, A.; Alhabeb, M.; Lukatskaya, M.R.; Boson, A.; Gogotsi, Y.; Sinitskii, A. Effect of Synthesis on Quality, Electronic Properties and Environmental Stability of Individual Monolayer Ti₃C₂ MXene Flakes. *Adv. Electron. Mater.* **2016**, *2*, 1600255.
18. Sarycheva, A.; Polemi, A.; Liu, Y.; Dandekar, K.; Anasori, B.; Gogotsi, Y. 2D titanium carbide (MXene) for wireless communication. *Sci. Adv.* **2018**, *4*, eaau0920.
19. Han, M.; Liu, Y.; Rakhmanov, R.; Israel, C.; Tajin, M.A.S.; Friedman, G.; Volman, V.; Hoorfar, A.; Dandekar, K.R.; Gogotsi, Y. Solution-Processed Ti₃C₂T_x MXene Antennas for Radio-Frequency Communication. *Adv. Mater.* **2021**, *33*, 2003225.
20. Sohail Rana, S.M.; Toyabur Rahman, M.; Salauddin, M.; Sharma, S.; Maharjan, P.; Bhatta, T.; Cho, H.; Park, C.; Yeong Park, J.Y. Electrospun PVDF-TrFE/MXene

Nanofiber Mat-Based Triboelectric Nanogenerator for Smart Home Appliances. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13*, 4955–4967.

21. Alhabeb, M.; Maleski, K.; Anasori, B.; Lelyukh, P.; Clark, L.; Sin, S.; Gogotsi, Y. Guidelines for Synthesis and Processing of 2DTitanium Carbide (Ti₃C₂T_x MXene). *Chem. Mat.* **2017**, *29*, 7633–7644.

22. Pogorielov, M.; Hapchenko, A.; Deineka, V.; Rogulska, L.; Oleshko, O.; Vodsed'álková, K.; Berezkinová, L.; Vysloužilová, L.; Klápšt'ová, A.; Erben, J. In vitro degradation and in vivo toxicity of NanoMatrix3D® polycaprolactone and poly(lactic acid) nanofibrous scaffolds. *J. Biomed. Mater. Res. Part A* **2018**, *106*, 2200–2212.

23. Syamsai, R.; Kollu, P.; Kwan Jeong, S.; Nirmala Grace, A. Synthesis and properties of 2D-titanium carbide MXene sheets towards electrochemical energy storage applications. *Ceram. Int.* **2017**, *43*, 13119–13126.

24. Alnoor, H.; Elsukova, A.; Palisaitis, J.; Persson, I.; Tseng, E.N.; Lu, J.; Hultman, L.; Persson, P.O.A. Exploring MXenes and their MAX phase precursors by electron microscopy. *Mater. Today Adv.* **2021**, *9*, 100123.

25. Awasthi, G.P.; Maharjan, B.; Shrestha, S.; Bhattarai, D.P.; Yoon, D.; Park, C.H.; Kim, C.S. Synthesis, characterizations, and biocompatibility evaluation of polycaprolactone–MXene electrospun fibers. *Colloid Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* **2020**, *586*, 124282.

26. Pogrebnyak, A.; Ivashchenko, V.; Maksakova, O.; Buranich, V.; Konarski, P.; Bondariev, V.; Zukowski, P.; Skrynskyy, P.; Sinelnichenko, A.; Shelest, I.; et al. Comparative measurements and analysis of the mechanical and electrical properties of Ti-Zr-C nanocomposite: Role of stoichiometry. *Measurement* **2021**, *176*, 109223.

27. Koltunowicz, T.N.; Zukowski, P.; Boiko, O.; Czarnacka, K.; Bondariev, V.; Saad, A.; Larkin, A.V.; Fedotov, A.K. Capacitive properties of nanocomposite (FeCoZr)_x(PZT)(100–_x) produced by sputtering with the use of argon and oxygen ions beam. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **2016**, *27*, 1171–1176.

28. Kołtunowicz, T.N.; Zukowski, P.; Bondariev, V.; Czarnacka, K.; Boiko, O.; Fedotova, J.A.; Kasiuk, J.V. Study of dielectric function of $(\text{FeCoZr})_x(\text{CaF}_2)_{(100-x)}$ nanocomposites produced with a beam of argon ions. *J. Alloys Compd.* 2015, 650, 262–267.
29. Sun, M.; Xiao, Z.; Chai, Y.; Li, Y.; Chan, P.C.H. Inductance properties of silicon-in-grown horizontal carbon nanotubes. In Proceedings of the 60th Electronic Components and Technology Conference, ECTC 2010, Las Vegas, NV, USA, 1–4 January 2010; pp. 1329–1334.
30. Kołtunowicz, T.N.; Zukowski, P.; Bondariev, V.; Fedotova, J.A.; Fedotov, A.K. The effect of annealing on induction like properties of $(\text{FeCoZr})_x(\text{CaF}_2)_{(100-x)}$ nanocomposite films produced by ion-beam sputtering in the vacuum environment. *Vacuum* 2015, 120, 44–50.
31. Kołtunowicz, T.N.; Bondariev, V.; Zukowski, P.; Fedotova, J.A.; Fedotov, A.K. AC electrical resonances in nanocomposites with partly oxidized FeCoZr grains embedded in CaF₂ ceramic matrix—effects of annealing. *J. Alloys Compd.* 2020, 819, 153361.
32. Kołtunowicz, T.N.; Zukowski, P.; Bondariev, V.; Fedotov, A.K.; Svito, I. Voltage and current resonance in nanocomposite $(\text{FeCoZr})_x(\text{CaF}_2)_{(100-x)}$ produced by ion-beam sputtering in pure argon atmosphere. *Acta Phys. Pol. A* 2015, 128, 897–900.
33. Sahraei, A.A.; Ayati, M.; Baniassadi, M.; Rodrigue, D.; Baghani, M.; Abdi, Y. AC and DC electrical behavior of MWCNT/epoxy nanocomposite near percolation threshold: Equivalent circuits and percolation limits. *J. Appl. Phys.* 2018, 123, 105109.
34. Cai, H.; Li, H.; Cho, E.Y.; Cybart, S.A. Inductance of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin-films with and without superconducting ground planes. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2020, 30, 7500205.

35. Miki, S.; Takeda, M.; Fujiwara, M.; Sasaki, M.; Otomo, A.; Wang, Z. Superconducting NbTiN Nanowire Single Photon Detectors with Low Kinetic Inductance. *Appl. Phys. Express* 2009, 2, 075002.
36. Johansson, J.; Cedergren, K.; Bauch, T.; Lombardi, F. Properties of inductance and magnetic penetration depth in (103)-oriented $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films. *Phys. Rev. B* 2009, 79, 214513.