Андрусенко Дмитро Анатолійович. Назва дисертаційної роботи: "Особливості фототермоакустичного перетворення в композитних системах на основі поруватого кремнію"

Міністерство освіти і науки України

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

на правах рукопису

АНДРУСЕНКО ДМИТРО АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 536.2: 536.41

ОСОБЛИВОСТІ ФОТОТЕРМОАКУСТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ В

КОМПОЗИТНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ

01.04.07 – фізика твердого тіла

Дисертація

на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Науковий керівник

Бурбело Роман Михайлович,

доктор фізико-математичних наук

Київ – 2015

2

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ……………………………………..5

ВСТУП……………………………………………………………………………..7

РОЗДІЛ 1. ПОРУВАТИЙ КРЕМНІЙ ТА ФОТОТЕРМОАКУСТИЧНЕ

ПЕРЕТВОРЕННЯ У ВИВЧЕННІ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЙОГО

ОСНОВІ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ). ..................................................................... 15

1.1 Поруватий кремній як модельний об’єкт фізики наноструктурованих

матеріалів. .............................................................................................................. 15

1.1.1 Методи виготовлення та морфологія поруватого кремнію. ................. 16

1.1.2 ПК у вивченні теплофізичних властивостей наноструктур. ................ 20

1.2 Композитні системи на основі ПК. ........................................................... 23

1.2.1 Хімічні та фізико-хімічні методи модифікації ПК. .............................. 23

1.2.2 Нанокомпозити на основі ПК з інкорпорованими в пори

наповнювачами. ..................................................................................................... 25

1.2.3 Композитні системи ПК-рідина. .............................................................. 28

1.3 Фотоакустичний ефект та фотоакустичні методи у вивченні поруватого

кремнію. ................................................................................................................. 30

1.3.1 Формування інформативного відгуку в непрямих ФА методах. ......... 30

1.3.2 П’єзоелектрична реєстрація ФА відгуку. ............................................... 35

1.3.3 Застосування фотоакустичних методів для вивчення поруватих

напівпровідників. .................................................................................................. 36

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ .................................................... 39

2.1 Експериментальний стенд для дослідження фотоакустичних явищ. .... 39

2.1.1 Джерела модульованого випромінювання. ............................................ 41

2.1.2 Базовий стенд для фотоакустичних вимірювань. .................................. 43

2.1.3 Особливості реалізації експерименту з композитами ПК-рідина. ...... .44

2.2 Зразки. .......................................................................................................... 44

3

2.2.1 Поруватий кремній. .................................................................................. 44

2.2.2 Системи ПК-рідина. .................................................................................. 47

2.3 ФА методи та особливості їх реалізації. ................................................... 49

2.3.1 Газомікрофонний метод, фронтальна геометрія. .............................. 49

2.3.2 Методи проходження теплового збурення крізь зразок. ..................... 52

2.3.3 Мікрофони для газомікрофонних ФА комірок. ..................................... 57

2.3.4 Тарування газомікрофонних комірок. .................................................... 58

2.4 П’єзоелектрична реєстрація ФА відгуку. ................................................. 61

2.4.1 Особливості реалізація метода п’єзоєлектричної реєстрації. .............. 61

2.5 Оцінка похибок. .......................................................................................... 63

РОЗДІЛ 3. ФОТОАКУСТИЧНЕ ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФІЗИЧНИХ

ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ПОРУВАТОГО

КРЕМНІЮ .............................................................................................................. 64

3.1 Визначення теплофізичних параметрів ПК та композитів ПК-рідина. . 66

3.1.1 Методи проходження теплового збурення крізь зразок ....................... 67

3.1.2 Газомікрофонний метод критичної частоти. ......................................... 70

3.2 Моделювання теплопровідності ПК та ПК-рідина. ................................. 73

3.3 Особливості теплового розширення композитних систем ПК-рідина. 76

3.3.1 Ефективний коефіцієнт теплового розширення. ................................... 76

3.3.2 Квазістатичне теплове розширення. ....................................................... 80

3.4 Метод прямої п’єзоелектричної реєстрації в дослідженні процесів

формування ФА відгуку в структурах з ПК. ...................................................... 81

3.5 Висновки розділу 3. .................................................................................... 85

РОЗДІЛ 4. ПРЯМИЙ ФА ЕФЕКТ В ШАРУВАТИХ СТРУКТУРАХ:

П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНА РЕЄСТРАЦІЯ ................................................................. 88

4.1 Розподіл потенціалу в обмеженому п’єзоелектрику при прямому ФТА

ефекті. ..................................................................................................................... 90

4

4.2 ФА ефект в двошаровій системі зразок/п’єзоперетворювач. ................. 96

4.3 Метод двошарового перетворювача. ...................................................... 100

4.4 Чисельне моделювання ФА ефекту в багатошарових структурах....... 103

4.5 Висновки розділу 4. .................................................................................. 108

РОЗДІЛ 5. ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПРЯМОГО ФА ВІДГУКУ В

СТРУКТУРАХ З ШАРАМИ КОМПОЗИТНИХ СИСТЕМ «ПК-РІДИНА». . 109

5.1 Прямий ФА ефект в структурах з шарами композитних систем ПКрідина. ................................................................................................................... 111

5.1.1 Геометрія експериментальної структури. ............................................ 111

5.1.2 Особливості форми ФА відгуку від структур з шарами ПК-рідина

при прямій п’єзоелектричній реєстрації: Якісний аналіз. ............................. 112

5.1.3 Оцінка часу релаксації термоіндукованих тисків рідини в шарі

ПК……….. ........................................................................................................... 115

5.2 Моделювання процесу формування ФА відгуку в композитній системі

ПК-рідина. ............................................................................................................ 116

5.2.1 Постановка задачі. .................................................................................. 116

5.2.2 Розподіл температури в шаруватій структурі. ..................................... 117

5.2.3 Розподіл тиску рідини в поруватому шарі. .......................................... 119

5.3 Вплив термоіндукованих тисків рідини на процеси формування ФА

відгуку в структурах з шарами композитних систем ПК-рідина. .................. 122

5.3.1 Результати експериментальних досліджень......................................... 122

5.3.2 Чисельне моделювання ФА відгуку від структур з шарами композитів

ПК-рідина. ............................................................................................................ 123

5.4 Висновки розділу 5. .................................................................................. 125

ВИСНОВКИ …………………………………………………..………………127

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..…………………………………….129

5

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

c теплоємність;

/ ( ) D c Ti i i i = χ ρ коефіцієнт теплової дифузії, температуропровідність;

Ei модуль Юнга середовища i;

ˆEi

/ (1 ) Ei i −υ

1/2 ( ) T

e c = ρχ теплова активність;

f частота модуляції;

2

T

к

D

f

πh

= критична частота для однорідного шару з товщиною h ;

к

f

F

f

=

безрозмірна частота модуляції випромінення;

i

i = ПК відповідає поруватому, i = с – композитному шару,

i = р – рідина;

0

I інтенсивність світлового потоку на поверхні зразка;

j уявна одиниця;

k модуль всебічного стиснення;

K проникність мезо-ПК для флюїдів;

i

l товщина шару середовища i

;

P z t ( , ) термоіндукований тиск рідини в порах;

T температура;

β стисливість рідини;

β T Коефіцієнт обємного теплового розширення;

χ теплопровідність;

η динамічна в’язкість рідини;

ϕ фазовий зсув;

6

γ адіабатична газова постійна;

φ поруватість;

2 Ti

i T

D

µ l

ω

= = довжина теплової дифузії середовища i;

λ

2

=j

K

ηβφ λ ω

Θ( , ) z t змінна компонента температури;

θ ( )z

просторовий розподіл амплітуди змінної компоненти

температури;

ρ густина;

σ i

(1 ) / i − j µ ;

h

товщина однорідного зразка у формі пластини, або

товщина шаруватої структури в цілому;

h1

товщина фронтального по відношенню до опромінення

шару двошарового зразка;

h2 товщина підкладки двошарового зразка;

Модель Р-Г модель Розенцвейга-Гершо;

Метод ВВ метод відкритого вікна;

Метод ДП метод демпфованої пластини;

ГП газовий поршень;

ТІТ термоіндукований тиск рідини в порах (P z t ( , ));

ПК поруватий кремній;

ПНП поруваті напівпровідники;

ПКР композитні системи ПК-рідина;

КТР коефіцієнт теплового розширення;

7

ВСТУП

Актуальність теми. Структури на основі поруватих напівпровідників

(ПНП) широко застосовуються в сучасних технологіях. Це пов’язано з тим,

що існує низка різноманітних технологічних підходів до керування

властивостями таких структур як модифікуванням самої матриці поруватого

матеріалу, так і шляхом інкорпорування в пори різних речовин та

нанооб’єктів. Зокрема, композитні системи, що створені на основі ПНП,

можуть мати різну морфологію та хімічний склад компонентів різні ступень

заповнення пор та характер зв'язку між компонентами. ПНП, переважно є

наноструктурованими, тобто характерні розміри їх структурних утворень

(пор, кристалітів, кластерів) менші за 100нм. Модифікація ПНП шляхом

створення композитних систем на їх основі, суттєво розширює діапазон

фізичних характеристик останніх.

Інтерес до структур з композитними системами на основі ПНП

пов’язаний не тільки з розвитком прикладних нанотехнологій, що безумовно

є важливим, але й значним чином визначається фундаментальними

проблемами фізики наноструктур. У таких структурах спостерігаються

квантоворозмірні ефекти, характерні для речовини в станах з обмеженою

геометрією (confined geometry). Визначальним для властивостей матеріалу

стає внесок поверхні кристалітів і кластерів різних фаз та взаємодія на їх

границях. Заповнення пор ПНП речовинами, отримання яких в

наноструктурованому вигляді іншими методами є достатньо

проблематичним, дозволяє досліджувати широке коло наноструктурованих

матеріалів в межах єдиного методологічного підходу. Дослідження

композитних систем на основі ПНП є важливим також для моделювання та

побудови адекватної картини фізичних процесів у цих матеріалах, зокрема

процесів теплового транспорту в неоднорідних наноструктурованих

середовищах.

8

При створенні нанокомпозитів для експериментальних досліджень як

модельний матричний матеріал зручно використовувати поруватий кремній

(ПК). Це обумовлено значним прогресом, що досягнутий за останні

десятиріччя в розробці методів отримання ПК, простотою та гнучкістю цих

методів, доступністю вихідної сировини, практичним значенням кремнію, як

базового матеріалу сучасної електроніки.

В останні роки одним з найбільш важливих напрямків досліджень ПК

стало його прикладне застосування в медицині та біології. Композитні

системи з ПК-матрицею можуть бути біосумісними, біонейтральними, або

біоактивними. Імплантати, засоби доставки ліків, біосенсори, системи типу

“lab-on-chip”, контейнери для вирощування клітинних культур, контрасти та

сенсибілізатори для діагностики й активних методів терапії, генерація

синглетного кисню – це лише частина таких застосувань. Зауважимо, що

пори ПК, в таких випадках зазвичай заповнені рідкими розчинами, тобто, з

точки зору матеріалознавства високих технологій, формуються композитні

системи особливого типу ПК-рідина.

Оскільки фізика нанокомпозитів на основі ПНП знаходиться на

початковому етапі свого розвитку, важливе місце в цій галузі займають

експериментальні методи. Зауважимо, що класичні експериментальні методи

часто не можуть бути застосовані для вивчення наноструктур взагалі, або

потребують значних зусиль для відповідної адаптації. Так, зокрема, суттєві

експериментальні труднощі виникають при вивченні теплофізичних,

термопружних, оптичних властивостей ПК. Це також стосується і

композитних систем в складі структур ПНП. Тобто існує проблема пошуку,

адаптації та розробки нових ефективних експериментальних методів

дослідження вказаних властивостей. Зрозуміло, що простота реалізації та

комплексність отриманої інформації є тут бажаною рисою.

Серед методів, які в останні роки все ширше використовуються для

вивчення ПНП відзначимо фотоакустичні (ФА) методи. Ці методи базуються

на ФА ефекті, який полягає у генерації в речовині пружних коливань в

9

результаті поглинання модульованого випромінювання. ФА методи

дозволяють отримувати спектри оптичного поглинання, вивчати процеси

теплового транспорту як ПК так і композитів на його основі, контролювати in

situ процес пороутворення при анодуванні кремнію і т.п. Ці методи є чутливі

до величин цілого ряду оптичних, теплофізичних, геометричних та

термопружних параметрів структур на основі ПНП.

Підкреслимо таку важливу рису ФА методів, як можливість

дослідження малої кількості речовини, зокрема тонких шарів (в окремих

випадках достатньою є ділянка площею в кілька квадратних мікронів при

субмікронній товщині шару). В більшості реалізацій ФА методи неруйнівні, а

часто і безконтактні та мають ряд переваг при дослідженнях поруватих

матеріалів та шаруватих структур.

Проблемою, що перешкоджає широкому застосуванню ФА методів для

вивчення ПНП є складність та багатостадійність процесів, що відбуваються

при ФА перетворенні. Так, параметри відгуку, що отримують одним з ФА

методів (амплітуда та фазовий зсув ФА сигналу, форма часової залежності),

можуть одночасно бути чутливими до цілого ряду параметрів, що

характеризують фізичні властивості матеріалів та структур, а також до

особливостей перебігу в них різноманітних процесів.

Виходячи із сказаного, стає зрозумілою важливість та актуальність

дослідження особливостей процесу ФА перетворення в композитних

системах на основі ПНП як з фундаментальної, так і з прикладної точок

зору.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові

результати, отримані в дисертаційній роботі, пов’язані з тематикою наукових

досліджень, що виконуються на кафедрі загальної фізики фізичного

факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка за

комплексною науковою програмою “4. Конденсований стан — фізичні

основи новітніх технологій ”, а саме з науково-дослідними роботами

«Експериментальне та теоретичне дослідження структури та фізичних

10

властивостей низькорозмірних систем на основі напівпровідникових

структур, різних модифікацій вуглецю та композитів» № 06БФ051-04 (№ д. р.

0106U006390) та підрозділу 4 “ Комплексне дослідження фізичних

властивостей напівпровідникових і вуглецевих наноматеріалів та їх

композитів різної структури та мірності ” д/б теми «Фундаментальні

дослідження в галузі фізики конденсованого стану і елементарних частинок,

астрономії і матеріалознавства для створення основ новітніх технологій»

№ 11БФ051-01 (№ д. р. 0111U004954).

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є

встановлення фізичних закономірностей формування прямого та непрямого

фотоакустичного відгуку в композитних системах на основі поруватого

кремнію при їх опроміненні періодично-модульованим оптичним

випроміненням.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

• розробити та створити експериментальні стенди для реалізації

класичних ФА методів (газомікрофонна та п’єзоелектрична реєстрація) з

низькочастотною періодичною модуляцією світлового потоку для

дослідження композитних систем на основі ПНП;

• провести вимірювання амплітудо- та фазочастотних характеристик

ФА сигналу для однорідних пластин ПК та систем ПК-рідина, а також

структур з шарами ПК та ПК-рідина на монокристалічній підкладці;

• провести експериментальні дослідження ФА ефекту в обмеженому

(багатошарової конструкції) п’єзоелектрику та в шаруватій структурі

зразок/п’єзоперетворювач зі скінченною товщиною шарів, а також розробити

відповідну модель формування ФА відгуку;

• з’ясувати роль внутрішньопорових термоіндукованих тисків рідини в

мезопорах ПК та процесів їх релаксації на форму та параметри

фотоакустичного відгуку в композитних системах з різними значеннями

товщини шарів та пористості матриці для випадків рідин з різною в’язкістю;

11

• з’ясувати роль морфологічних особливостей поруватої матриці та

дослідити вплив рідкого наповнювача на теплопровідність композитних

систем на основі мезопористого кремнію.

Об’єкт дослідження – фототермічні та фотоакустичні явища в

наноструктурованих композитних системах на основі поруватого кремнію.

Предмет дослідження – фізичні процеси, що відбуваються при

фототермічному та фотоакустичному перетворенні в наноструктурованих

композитних системах на основі поруватого кремнію при опроміненні

періодично-модульованим оптичним випромінюванням.

Методи дослідження:

• методи періодичної модуляції збуджуючого випромінювання;

• акустичні методи (газомікрофонна та п’єзоелектрична реєстрація)

експериментального дослідження форми та параметрів фотоакустичного

відгуку;

• методи математичного моделювання: методи Фур’є аналізу, методи

рішення диференційних рівнянь в часткових похідних, методи кінцевих

різниць та аналітичного обрахунку;

• скануюча електрона мікроскопія, скануюча атомна силова мікроскопія;

• гравіметрична порометрія.

Наукова новизна одержаних результатів:

• в процесах фотоакустичного перетворення вперше виявлено значне (до

двох порядків величини) збільшення ефективних значень коефіцієнтів

теплового розширення композитних систем «поруватий кремній –

рідина» на основі мезопористого ПК в порівнянні з їх значеннями в

квазістатичних процесах та зі значеннями коефіцієнтів теплового

розширення вихідних поруватих матриць;

• вперше експериментально отримано та порівняно між собою значення

коефіцієнтів теплопровідності композитних систем «поруватий кремній –

рідина» на основі мезопористого кремнію та вихідних пористих матриць,

встановлено, що в шарах мезопористого кремнію з поруватістю 65% не

12

менше половини теплового опору формується міжкристалітними

тепловими контактами;

• в наближенні жорстких нормалей отримано та експериментально

перевірено аналітичні вирази для параметрів сигналу фотоакустичного

відгуку від двошарових структур «зразок / п’єзоперетворювач»;

• вперше експериментально встановлено особливості форми часової

залежності сигналу прямого фотоакустичного відгуку, що отриманий від

шаруватих структур з шарами композитних систем «поруватий кремній –

рідина», а саме: сигнал містить послідовність крутого переднього

фронту, максимуму та наступного мінімуму з подальшим додатковим

збільшенням потенціалу;

• розроблено та експериментально перевірено модель формування прямого

фотоакустичного відгуку в шаруватих структурах з шарами композитних

систем «поруватий кремній – рідина» на монокристалічній підкладці, що

пов’язує часову форму сигналу з теплофізичними, термопружними та

морфологічними параметрами поруватого кремнію, геометричними

параметрами структури та фізичними параметрами рідини, що заповнює

пори;

Практичне значення одержаних результатів. Отриманні в роботі

результати сприяють більш глибокому розумінню процесів, які відбуваються

при фототермічному та фотоакустичному перетворенні в структурах на

основі кремнію, зокрема в структурах нанокомпозитних матеріалів з

інкорпорованими в пори наповнювачами. Це сприяє розвитку існуючих та

розробці нових методів дослідження наноструктурованих поруватих

матеріалів, безконтактного та неруйнівного контролю структур на основі ПК,

in situ методів контролю процесів пороутворення в методі анодування

кремнію, методів вивчення морфології ПК, а також впровадженню нових

принципів побудови сенсорних пристроїв.

Особистий внесок здобувача. Формулювання задач та вибір об’єктів

дослідження, обговорення одержаних результатів здійснювалось здобувачем

13

разом із науковим керівником Р. М. Бурбело [1–19]. Розробка моделей

формування прямого ФА відгуку в двошарових структурах з скінченною

товщиною шарів була виконана здобувачем разом з І. Я. Кучеровим [20, 21].

Підбір, систематизація та аналіз літературних даних проведено особисто

здобувачем. Експериментальне визначення теплофізичних параметрів шарів

ПК та ПК-рідина проведено разом з О. І. Титаренко [7, 8] та П. А. Лішуком

[9]. Розробка моделі формування ФА відгуку в композитних системах на

основі ПК, дослідження параметрів ФА відгуку отриманого від структур

«поруватий кремній на монокристалічній підкладці» та їх співставлення з

результатами моделювання виконано разом з М. В. Ісаєвим [5-9].

Апробація результатів дослідження. Основні результати дослідження

були представлені на міжнародних конференціях та семінарах: “UkrainianGerman Simposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on

Nanobiotechnology”, September 6-10, 2010, Beregove, The Crimea, Ukraine; 4th

International Scientific and Technical Conference “Sensor Electronics and

Microsystem Technologies (SEMST–4)”, June 28 – July 2, 2010, Odessa, Ukraine;

V Українській науковій конференції з фізики напівпровідників (УНКФН-5,

9–15 жовтня 2011 р), Ужгород, Україна; 8th International Conference «Porous

Semiconductors – Science and Technology (PSST-2012)» , March 25-30, 2012,

Malaga, Spain; Conference on Photoacoustic and Photothermal Theory and

Applications (CPPTA), 25-27 September, 2013, Warsaw, Poland; VI

международный симпозиум «Фуллерены и наноструктуры в

конденсированных средах», Минск, Белорусь, 14-17 июня 2011 г; 20thAnnual

Conferenceof Doctoral Students - WDS 2011Part 3 - Physics, Prague, Matfyzpress,

2011; International Conference «Nanomaterials: Application and Properties (NAP2012)», 17-22 September 2012, Alushta, the Crimea, Ukraine; Summer school

International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials

(NANO-2013)», 25 August – 1 September 2013, Bucovel, Ukraine.

14

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 21 наукових працях:

15 наукових статей, у тому числі 11 у фахових виданнях, та 4 у реферованих

збірникахках наукових праць і 6 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу,

п’яти розділів, висновків і списку використаних джерел. Матеріали

викладено на 149 сторінках, робота містить 37 рисунків та 6 таблиць.

ВИСНОВКИ

Шляхомпорівняльногоаналізурезультатівкомплексних

експериментальнихітеоретичнихдослідженьпроцесівформування

сигналівпрямоготанепрямогофотоакустичноговідгукуіззастосуванням

фотоакустичнихметодівзперіодичноюмодуляцієюсвітловогопотоку

поглибленорозумінняпроцесівфотоакустичногоперетворенняв

шаруватихструктурахізкомпозитнимисистемаминаосновімезопористого

кремнію

Наосновіаналізучасовихтачастотнихзалежностейсигналу

фотоакустичноговідгукупризастосуваннігазомікрофонногота

п’єзоелектричногометодівреєстраціїдонаноструктурованихсистемна

основіпоруватогокремніювиявленорядособливостейщообумовлені

процесамифототермоакустичногоперетворенняЗокремадляструктур

поруватийкремнійнапідкладцізафіксованоособливостіформичасових

залежностейпотенціалунаелектродахп’єзоперетворювачаасамезміна

нахилузменшогонапочаткуперіодівнагрівуохолодженнянабільший

дляструктурпоруватийкремній–рідинавстановленонаступну

послідовністьуформіфотоакустичноговідгукукрутийпереднійфронт

максимумтамінімумзнаступнимлінійнимростомДлявільнихшарів

мезопористогокремніюпризастосуванніметодупроходження

періодичнихтепловихзбуренькрізьодноріднийзразокзафіксовано

мінімумнафазочастотнихзалежностяхвиявленозначневдесяткиразів

зростанняамплітудивідгукудлясистемвільнийшарпоруватогокремнію

–в’язкарідина

Дляструктурзкомпозитнимисистемамипоруватийкремній–рідина

запропонованопідхідщоґрунтуєтьсяназастосуванніфункційвпливута

розкладуФур’єнаосновіякоговиконаномоделюванняформи

фотоакустичногосигналуприпрямокутніймодуляціїтазастосуванні

п’єзоелектричногометодуреєстраціївідгукуВстановленозвязокміж

особливостямиформисигналуасаменаявністюіхарактеромекстремумів

тафізичнимиігеометричнимипараметрамизразка



Виявленощоефективнікоефіцієнтитепловогорозширеннякомпозитних

системпоруватийкремній–рідинавпроцесахфототермопружного

перетворенняможутьсуттєвоперевищуватидодвохпорядківвеличини

коефіцієнттепловогорозширеннятакихсистемвквазістатичнихпроцесах

Збільшеннявеличинитермічнихдеформаційобумовленодією

термоіндукованихтисківрідинивпорахтапризводитьдопідвищення

ефективностіенергоперетворенняприфотоакустичномуефекті

Показанощоприформуваннінепрямогофотоакустичноговідгукуметод

відкритоговікнавідвільнихшарівкомпозитівнаосновімезопористого

кремніюзмінатискувкомірцієрезультатомодночасноїдіїдвох

механізмівнагрівуприлеглогодозразкагазутазміниоб’ємукомірки

внаслідокдеформаціївигинузразкапринеоднорідномунагріві

Експериментальновизначенокомплексомфотоакустичнихметодів

значеннякоефіцієнтівтеплопровідностімезопористогокремніюрізної

поруватостітаїхзмінувнаслідокінкорпоруваннявпорирідинДля

мезопористогокремніюзпоруватістюцізначеннялежатьв

діапазоні÷ВтмКакомпозитівнаїхоснові–вдіапазоні

÷ВтмКВстановленощозменшеннятеплопровідності

поруватогокремніювпорівнянніззумовленозокремазначною

роллютепловихопорівміжокремимикристалітамиВмезопористому

кремніїзпоруватістюміжкристалітнимитепловимиконтактами

формуєтьсянеменшеполовинизагальноготепловогоопору

Наосновітеоріїтермопружностітонкихпластинрозробленомодель

формуванняфотоакустичноговідгукувструктурахзразок

п’єзоперетворювачзкінцевоютовщиноюшарівотриманота

експериментальноперевіреноаналітичнівиразидляпараметрів

фотоакустичногосигналуамплітудитафазовогозсувущопов’язуютьїх

значеннязгеометричнимипружнимитатеплофізичнимипараметрами

шарівекспериментальноїструктури