

ФТТ-2018

***АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА***

55 лет




**СБОРНИК ДОКЛАДОВ
VIII Международной научной конференции**

24 - 28 сентября 2018 г., Минск

Том 3

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ
НАУК БЕЛАРУСИ ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ
(ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И ПОЛУПРОВОДНИКОВ)

БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Конференция приурочена к 90-летию НАН Беларуси, 25-летию
Международной ассоциации академий наук и 55-летию образования
Института физики твердого тела и полупроводников
(в настоящее время – Научно-практический центр Национальной
академии наук Беларуси по материаловедению)**

ФТТ-2018

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА**

СБОРНИК ДОКЛАДОВ
VIII Международной научной конференции
24 – 28 сентября 2018 г., Минск

В трех томах

Том 3

Минск
«Ковчег»
2018

УДК 539.21(082)
ББК 22.37я43
А43

Редакционная коллегия:
акад. *Н.М. Олехнович* (пред.);
д-р. физ.-мат. наук *В.Ф. Гременок*; д-р. физ.-мат. наук *С.Е. Демьянов*;
канд. физ.-мат. наук *О.В. Игнатенко*; чл.-корр. *Ф.П. Кориунов*;
д-р. физ.-мат. наук *Г.И. Маковецкий*; канд. физ.-мат. наук *А.В. Мудрый*;
д-р. физ.-мат. наук *А.П. Сайко*; член-корр., д-р. физ.-мат. наук *И.О. Троянчук*;
член-корр., д-р. физ.-мат. наук *В.М. Федосюк*; д-р. физ.-мат. наук *А.У. Шелег*;

А 43

Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. VIII Междунар. науч. конф., (Минск, 24-28 сентября 2018). В 3 т. Т. 3. / ГНПО «ГНПЦ НАН Беларуси по материаловедению»; ред. колл.: Н.М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск: Ковчег, 2018. - 287 с.

ISBN 978-985-7202-53-9.

В сборнике опубликованы доклады, представленные на Международной научной конференции по актуальным проблемам физики твердого тела. В нем изложены результаты новейших исследований по проблемам физики магнетизма, полупроводников, диэлектриков и сегнетоэлектричества. Значительное число докладов посвящено вопросам практического применения разработанных материалов, технологий и устройств.

Материалы докладов одобрены и рекомендованы к опубликованию организационным комитетом конференции и печатаются в виде, представленном авторами, без дополнительного редактирования.

УДК 539.21(082)
ББК 22.37я43

Научное издание

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

**VIII Международной научной конференции
24 – 28 сентября 2018 г., Минск**

В трех томах
Том 3

Ответственные за выпуск *А.В. Мудрый, А.М. Живулько, В.Д. Живулько*
Компьютерная верстка *А.М. Живулько, В.Д. Живулько*

Подписано в печать 10.08.18. Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 33,4. Уч.-изд. л. 21,1. Тираж 20 экз. Зак. 403.

Выпущено по заказу ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению».
Издатель и полиграфическое оформление ООО «Ковчег». ЛИ № 1/381 от 01.07.2014.

ISBN 978-985-7202-56-0 (Т.3)
ISBN 978-985-7202-53-9

©ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по
материаловедению, 2018
©Оформление. ООО «Ковчег», 2018

THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

SCIENTIFIC AND PRACTICAL MATERIALS RESEARCH
CENTRE OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF
BELARUS
(INSTITUTE OF SOLID STATE AND SEMICONDUCTOR
PHYSICS)

BELARUSIAN REPUBLICAN FOUNDATION FOR
FUNDAMENTAL RESEARCH

SSP – 2018

**Actual Problems of
Solid State Physics**

Proceedings of the VIII International Scientific Conference
24 – 28 September 2018, Minsk, Belarus

In three volumes

Volume 3

Minsk
«Kovcheg»
2018

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)	11
Баглов А.В., Малашевич А.А., Лисимова Е.С., Борисенко В.Е. Структурные и фотокаталитические свойства нанокompозита диоксид титана/кремний	12
Белько Н.В., Самцов М.П., Гусаков Г.А., Таболич А.А., Луговский А.А., Пархоменко В.А., Воропай Е.С. Влияние функционального состава поверхности на свойства водных суспензий ультрадисперсных алмазов	15
Белько Н.В., Самцов М.П., Гусаков Г.А., Таболич А.А., Луговский А.П., Луговский А.А., Пархоменко В.А., Воропай Е.С. Свойства комплексов наноалмазов детонационного синтеза с индотрикарбощианиновым красителем	18
Близнюк Л.А., Петроченко Т.П., Басов Н.А., Каско В.И., Новиков В.П., Рязанов И.В. Влияние углеродного наноструктурированного модификатора на свойства керамики на основе алюминат лантана – титанат кальция	21
Боргеков Д.Б., Козловский А.Л., Здоровец М.В. Исследование устойчивости наноструктур к деградации в агрессивных средах	24
Бундюкова В.Д., Якимчук Д.В., Канюков Е.Ю., Демьянов С.Е. Золотые наноструктуры в порах шаблонов SiO ₂ /Si	27
Vetcher A., Govor G., Timoshkov I. Nanomodified composite magnetic materials on based metall powder	30
Ласовский Р.Н., Грода Я.Г., Вихренко В.С. Диффузия и электропроводность в одномерных решеточных системах	34
Гурецкий С.А., Колесова И.М., Кравцов А.В., Мантыцкая О.С., Пушкарев А.В., Петров А.В. Модификация материалов на основе полуводного сульфата кальция углеродными наносистемами	37
Гуринович Л.И., Троцюк Л.Л., Кулакович О.С., Сушко Н.И., Демир Х.В., Гапоненко С.В. Поляризованная фотолюминесценция квантовых точек в анизотропных полимерных плёнках, содержащих наностержни золота	40
Gusakova J., Tay V.K., Gusakov V. Structural and electronic properties of 2D MoS ₂ (1-x)Se _{2x} alloy: DFT study	43
Жилова О.В., Бабкина И.В., Ситников А.В., Макагонов В.А., Ремизова О.И. Структура пленок на основе оксида олова, легированного кремнием	47
Лешок А.А., Козлова Т.А., Сасинович Д.А., Черных А.Г., Лазарук С.К. Наноструктурированный кремний – перспективный материал анодов литий-ионных батарей	49
Королик О.В., Колесов Е.А., Тиванов М.С., Шевцова В.И., Гременок В.Ф. Температурный сдвиг линий крс для графена с берналовской и поворотной укладкой	52

Королев Д.С., Окулич Е.В., Коряжкина М.Н., Шуйский Р.А., Белов А.И., Михайлов А.Н., Антонов И.Н., Горшков О.Н., Тетельбаум Д.И. Влияние облучения ионами различной природы на параметры резистивного переключения мемристивных наноструктур на основе оксида кремния	55
Кутербеков К.А., Бекмырза К.Ж., Ногай А.С., Алибай Т.Т. Исследование характеристик катализаторов для мембранно-электродных блоков низкотемпературных топливных элементов	57
Лакуста М.В., Волкова Г.К., Лоладзе Л.В., Брюханова И.И., Глазунова В.А., Даниленко И.А., Константинова Т.Е. Активация процесса спекания ZrO_2 путем модификации его структуры добавкой GeO_2	60
Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Шишкин И.А., Рогожина Г.А., Гуренкова В.А. Влияние неконтролируемых факторов на свойства пористого кремния	63
Магазинская Е.В. Приготовление наночастиц фосфата железа	66
Конфедератова К.А., Мансуров В.Г., Малин Т.В., Галицын Ю.Г., Александров И.А., Вдовин В.И., Журавлев К.С. Термодинамика формирования квантовых точек GaN на поверхности (0001) AlN при разложении тонкого слоя GaN	68
Милахин Д.С., Малин Т.В., Мансуров В.Г., Галицын Ю.Г., Кожухов А.С., Журавлев К.С. Электронно-стимулированное формирование кристаллической фазы AlN на реконструированной ($\sqrt{31} \times \sqrt{31}$)R $\pm 9^\circ$ поверхности сапфира	70
Гончаров В.К., Козадаев К.В., Микитчук Е.П. Моделирование свойств поверхностных наноструктур на торце оптического волокна для фотоакустической генерации ультразвука	73
Лотин А.А., Новодворский О.А., Храмова О.Д., Путилин Ф.Н., Егоров А.В., Савилов С.В., Паршина Л.С., Михалевский В.А., Чербыло Е.А. Лазерный синтез наночастиц железа для получения углеродных нанотрубок	76
Пилько В.В., Комаров Ф.Ф., Погребняк А.Д. Трибомеханические свойства многослойных покрытий MoN/CrN	78
Прислопский С.Я., Гапоненко С.В., Монайко Э., Сергенту В.В., Тигиняну И.М. Сильнополяризованное обратное рассеяние в полупроводниковых соединениях Al ₃ B ₅	81
Прокопьев С.Л., Михей В.Н., Людчик О.Р., Гайдук П.И. Формирование наноразмерных островков на поверхности эпитаксиальных слоев SiGe мощным лазерным излучением	83
Прокопьев С.Л., Зайков В.А., Ивлев Г.Д., Новиков А.Г., Гайдук П.И. Структурные свойства поликристаллических слоев Si/Ge после импульсного лазерного облучения	86
Романов И.А., Пархоменко И.Н., Власукова Л.А., Комаров Ф.Ф., Мильчанин О.В., Моховиков М.А., Мудрый А.В., Живулько В.Д., Wendler E. Светоизлучающие свойства пленок оксида кремния, имплантированных оловом	89
Семченко А.В., Сидский В.В., Тюленкова О.И., Солодуха А.В., Петлицкий А.Н., Ковальчук Н.С. Синтез и морфология столбчатых наноструктур на основе оксида цинка	92

Семченко А.В., Сидский В.В., Гайшун В.Е., Коваленко Д.Л., Тюленкова О.И. Влияние отжига на структуру и оптические свойства ZnO:Al пленок, синтезированных золь-гель методом	95
Тагиев М.М., Абдинова Г.Д. Электрические свойства объемных наноструктурированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$	97
Тимошков Ю.В., Курмашев В.И., Сакова А.А., Говор Г.А., Вечер А.К. Применение нанокпозиционных материалов для формирования прецизионных микроструктур компонентов МЭМС	99
Тулбаева Д.Ж., Ермакова А.Е., Козловский А.Л., Здоровец М.В. Влияние термического отжига на наночастицы оксида железа	102
Филатов М.С., Родивиллов С.В., Стогней О.В. Структура и морфология градиентных покрытий на основе Ni и стабилизированного ZrO_2	105
Маковская Т.И., Кривошеева А.В., Шапошников В.Л., Данилюк А.Л. Взаимосвязь электрофизических параметров в транзисторной МОП-структуре с 2D-каналом	107
Шаронов Г.В., Гусаков Г.А., Мухуров Н.И. Исследование физико-технических характеристик наноструктурированных покрытий на основе пористого анодного оксида алюминия, модифицированного наноалмазами	110
Шлимас Д.И., Козловский А.Л., Здоровец М.В., Кадыржанов К.К. Влияние ускоренных ионов Fe^{7+} на структурные характеристики Ni-нанотрубок	113
Шумская Е.Е., Канюков Е.Ю., Кутузов М.Д., Козловский А.Л., Здоровец М.В. Формирование ионно-трековых шаблонов на основе полиэтилентерефталата для синтеза магнитных нанотрубок	116
Шут В.Н., Мозжаров С.Е., Янченко В.В., Акулёнок О.М. Физические и антибактериальные свойства ультрадисперсных порошков оксида меди	119
Ювченко В.Н., Комаров Ф.Ф., Власукова Л.А. Моделирование воздействия облучения быстрыми тяжелыми ионами на полупроводники InAs, InSb и нанокластеры полупроводников и металлов в диоксиде кремния	122
Смирнов А.В., Канюков Е.Ю., Бундюкова В.Д., Якимчук Д.В. Эллипсометрия как экспресс-метод определения параметров пор ионно-трековых шаблонов SiO_2 на кремниевой подложке	125
ПРИКЛАДНЫЕ РАЗРАБОТКИ: ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИЗДЕЛИЯ, ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ	128
Subasri Raghavan, Dendi Sreenivas Reddy, Kalidindi Ramachandra Soma Raju, Kakara Srinivasa Rao, Gaponenko Nikolai, Kholov Payrav Sol-gel derived solar control coatings on glass for architectural and automobile applications	129
Бохан Ю.И., Варнава А.А. Термоэлектрический керамический элемент с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления	131

Бушкевич И.А., Бородин А.В., Фишкина Ю.Э., Ташлыкова-Бушкевич И.И. Термическая стабильность микроструктуры быстрозатвердевшего сплава Al-Mg-Li-Sc-Zr	134
Васин Д.С., Тишкевич Д.И., Труханов А.В., Грабчиков С.С. Воздействие тяжёлых заряженных частиц на поверхность экранов из композита W ₈₅ Cu ₁₅	137
Вечер А. К., Говор Г.А., Ларин А.О. Магнитные свойства низкочастотного композиционного магнитно-мягкого материала	140
Дмитриев Д.В., Василенко А.П., Гаврилова Т.А., Гилинский А.М., Кожухов А.С., Торопов А.И., Журавлев К.С. МЛЭ InAlAs/InGaAs/InP гетероструктур для систем радиофотоники	143
Иванова Л.Д., Гранаткина Ю.В., Мальчев А.Г., Нихезина И.Ю., Емельянов М.В., Никулин Д.С. Термоэлектрические свойства твердых растворов халькогенидов висмута и сурьмы, полученных кристаллизацией в жидкости	146
Горский А.В., Старухин А.С., Кнюкшто В.Н. Оптические сенсоры давления основанные на тушении флюоресценции металлокомплексов порфиринов	149
Кожушко В.В., Сергиенко В.П., Мышковец В.Н. Массив электромагнитных акустических преобразователей для измерения упругих модулей металлических композитов	152
Кондусов В.В., Кондусов В.А. Автоматизированная установка для задания тепловых режимов при термоэлектрической тренировке полупроводниковых приборов	155
Лукашевич Р.В., Сеньковский К.Г., Турчин М.А., Казючиц Н.М., Русецкий М.С., Казючиц В.Н. Исследование поля излучения эталонной рентгеновской установки с использованием алмазного детектора	158
Малашкевич Г.Е., Шимко А.Н., Ступак А.П., Прусова И.В., Сергеев И.И. Спектрально-люминесцентные свойства кварцевых стекол, активированных ионами Sm ³⁺ и Sm ²⁺	161
Ржеуцкий Н.В., Луценко Е.В., Войнилович А.Г., Свитенков И.Е., Шуленкова В.А., Яблонский Г.П. Оптимизация условий роста зародышевых и буферных слоев AlN на подложках сапфира методом молекулярно-пучковой эпитаксии	164
Старухин А.С., Горский А.В., Павич Т.А., Ковгар В. Кнюкшто В.Н. Синтез и спектральные параметры бихромофорных комплексов металлопорфиринов и куркумина	167
Ташлыкова-Бушкевич И.И., Яковенко Ю.С., Мойсейчик Е.С., Бейда А.И. Эволюция микроструктуры тонких пленок сплава Al-1.0 ат. % Cr при ионно-ассистированном осаждении на стекло	170
Шашков С.Н., Копачевский В.Д., Бабин А.В., Григоренко А.М. Сканирующие рамановские микроскопы серии CONFOTEC: перспективы применения	173

Скрылёв А.В., Акбаева Г.М., Панченко Е.М. Сегнетомягкие или легкопереключаемые материалы на основе ЦТС с различными электрофизическими свойствами	175
Асадов М.М., Алиев О.М., Гасанова У.А., Никитов С.А., Янушкевич К.И. Материаловедческие основы разработки перспективных магнитных материалов систем FeS–PbS–In ₂ S ₃ (Ga ₂ S ₃)	178
Ильюшенко А.Ф., Кусин Р.А., Черняк И.Н., Жегздринь Д.И., Илюкевич А.И., Басов Н.А., Близнюк Л.А., Петроченко Т.П. Разработка технологии изготовления изделий с высокой механической прочностью ..	180
Огородников Д.А., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б., Кетько А.В., Шведов С.В., Алиева Н.В. Воздействие ионизирующего излучения на параметры МОП-транзисторов	183
Гусакова О.В. Быстрозатвердевшие фольги сплава SnZnBiIn и паяные соединения на их основе	186
Шепелевич В.Г., Гусакова О.В., Гусакова С.В. Стабильность микроструктуры и свойств быстрозатвердевшего сплава (BiSn) _{95,2} Sb _{4,8}	189
Korshunov F.P., Zhdanovich N.E., Gurinovich V.A. Radiation-thermal treatment influence on swithing characteristics of silicon p-n-p-n-structures	192
Гуляев Д.В., Дмитриев Д.В., Валишева Н.А., Царев А.В., Колосовский Е.А., Тазиев Р.М., Федюхин Л.А., Журавлев К.С. Электрооптический модулятор на основе квантово-размерного эффекта штарка в двухслойном гребенчатом волноводе InAlGaAs на подложке из InP	195
Зайков В.А., Ивлев Г.Д., Климович И.М., Комаров Ф.Ф., Людчик О.Р., Королик О.В., Гусакова С.В. Влияние импульсного лазерного отжига на структуру тонкопленочных покрытий TiAlCN на кремнии	197
Зарбалиев М.М., Джиловдарлы (Аббасов) А.А. Создание научной школы физики полупроводников в институте физики НАН Азербайджана	200
Канюков Е.Ю., Шумская Е.Е., Кутузов М.Д., Козловский А.Л., Здоровец М.В., Плиско Т.В., Бурть Е.С., Бильдюкевич А.В., Николаевич Л.Н. Модифицированные ионно-трековые мембраны для сепарации биологических объектов	203
Алисиенок О.А., Шидловская В.Г., Мельникова Г.Б., Козловский А.Л., Здоровец М.В., Кутузов М.Д., Шумская Е.Е., Канюков Е.Ю. ПЭТФ-мембраны модифицированные диоксидом титана	206
Крутько В.К., Глазов И.Е., Мусская О.Н., Кулак А.И., Сафронова Т.В., Путляев В.И. Биорезорбируемая кальцийфосфатная пенокерамика	210
Харченко А.А., Бринкевич Д.И., Лукашевич М.Г., Просолович В.С., Оджаев В.Б. Янковский Ю.Н. Спектры отражения имплантированных Ag ⁺ пленок диазохинон-новолачного фоторезиста	213

Буслюк В.В., Оджаев В.Б., Панфиленко А.К., Петлицкий А.Н., Просолович В.С., Филипня В.А., Янковский Ю.Н. Генерационно-рекомбинационные процессы в диодах - генераторах широкополосного шума	216
Петров А.В., Мацуткевич Я., Банис Ю., Плющ А.В., Шуба М.В., Гурский Л.И. Функциональные характеристики композитов ЦТС - $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$	219
Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Горушко В.А. Электропроводность пленок силицида платины сформированного с применением быстрой термообработки	222
Рембеза С.И., Буслов В.А., Овсянников С.В., Рембеза Е.С., Кошелева Н.Н., Свистова Т.В. Полевой транзистор с металлооксидным каналом, газочувствительный при комнатной температуре	225
Корякин С.В., Серокурова А.И., Архипов И.В. Технология производства полупроводниковых пластин арсенида галлия современной точности обработки для микроволновых интегральных схем	228
Mohammad Reza Gaeni, Ali Bakouei, Mohammad Hossein Majles Ara Study of the pyrolysis product and reaction mechanism of TN liquid crystal	231
Солобай А.А., Грабчиков С.С., Труханов А.В. Материалы для защиты микроэлектронной и радиоэлектронной аппаратуры от статических магнитных полей	232
Станчик А.В., Иванов В.А., Гременок В.Ф., Башкиров С.А. Электрические свойства тонких пленок $Cu_2ZnSnSe_4$ на гибких металлических подложках	234
Старухин А.С., Ковгар В.В., Горский А.В., Кнюкшто В.Н., Червенец Р.А. Абсолютные квантовые выходы флуоресценции металло-комплексов пофоринов и фталоцианинов	237
Летко А.К., Каско В.И. Получение и исследование $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$ керамики	240
Тагиев М.М., Абдинова Г.Д., Пириева Т.И., Алигулива Х.В. Термоэлектрические и магнитотермоэлектрические свойства термоэлементов и охладителей на основе твердого раствора $VI_{85}SB_{15}$	243
Тишкевич Д.И., Грабчиков С.С., Васин Д.С., Зубарь Т.И., Труханов С.В. Влияние органических добавок на микроструктуру электроосажденных VI покрытий	246
Тишкевич Д.И., Грабчиков С.С., Грабчикова Е.А., Васин Д.С., Богатырев Ю.В., Якушевич А.С., Ластовский С.Б. Расчет длины пробега высокоэнергетических ионов в однослойных и многослойных экранах радиационной защиты	249
Францкевич Н.В., Францкевич А.В., Шеденков С.И. Влияние дозы пред имплантированных протонов и температуры во время имплантации, на накопление водорода в приповерхностном слое монокристаллического Si, в случае его дальнейшего введения в пластины из DC плазмы	252

Чайка Э.В.	
Перспективы использования способа изостатического прессования в термопластичных пресс-формах в технологии биокерамики	255
Шепелевич В.Г., Гольцев М.В., Иванов А.А.	
Фазовый состав и зеренная структура быстрозатвердевшего сплава $In_{58,6}Sn_{38,4}Zn_{3,0}$	258
Урбанович В.С., Маликина Т.Д., Лавыш Е.О., Шлома Е.Н., Карась С.М.	
Исследование поверхности твердосплавных пластин после электроэрозионной обработки для пайки режущих элементов из сверхтвердой нитридной керамики	261
Тернов Е.В., Галяс А.И., Кривченя Д.А.	
Об автоматизации измерений термоЭДС и удельного сопротивления термоэлектрических материалов при высоких температурах	264
Федотова Ю.А., Чвек М., Федотов А.К., Прищепа С.Л., Комиссаров И.В., Ковальчук Н.С.	
Электротранспорт в твистированном графене	267
Баев В.Г., Федотова Ю.А., Воробьева С.А., Гуменник В.Э., Федотов А.К., Прищепа С.Л., Комиссаров И.В., Ковальчук Н.С.	
Влияние электрохимической функционализации графена наночастицами кобальта на электротранспортные свойства	269
Урбанович В.С., Тимофеева И.И., Васильковская М.А., Маликина Т.Д.	
Взаимодействие в системе TiB_2-TaB_2 при высоких давлениях и температурах и физико-механические свойства полученных композитов	273
Урбанович В.С., Маликина Т.Д., Jaworska L., Cygan S., Судник Л.В., Перевислов В.Н.	
Физико-механические свойства микро-/нанокомпозитов на основе нитрида кремния, спеченных при высоком давлении	277
Макаренко Л. Ф., Ластовский С. Б., Якушевич А. С., Гаубас У., Павлов Е., Молл М.	
Влияние примесного состава на образование бистабильного дефекта междоузельного типа в кремнии	280
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	284

БИОРЕЗОРБИРУЕМАЯ КАЛЬЦИЙФОСФАТНАЯ ПЕНОКЕРАМИКА

¹Крутько В.К.*, ¹Глазов И.Е., ¹Мусская О.Н., ¹Кулак А.И., ²Сафронова Т.В., ²Путляев В.И.

¹Государственное научное учреждение «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси», 220072 РБ, г. Минск, ул. Сурганова, 9/1

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, РФ, г. Москва, Ленинские горы, 1

**tsuber@igic.bas-net.by*

Биоматериалы на основе фосфатов кальция широко исследуются и применяются в качестве искусственного аналога кости [1, 2], имеющего значительные преимущества по отношению к ксеноимплантатам. Кальцийфосфатные (КФ) биоматериалы должны обладать определенными механическими характеристиками, зависящими от природы поврежденной костной ткани, способностью срачивания с костной тканью, стимулировать процесс остеогенеза, а также быть химически инертными к тканям, межтканевым жидкостям и иммунной системе организма. Наиболее перспективными являются керамические матрицы для тканевой инженерии с пористостью более 50% [3, 4], которая способствует снижению прочности керамики. Пористую КФ керамику в большинстве случаев получают методом выгорающих добавок, пропиткой и последующим обжигом ячеистого матрикса либо другими способами [3–8]: 1) с применением порообразующих агентов; 2) спеканием частиц определенной формы и размера; 3) вспениванием; 4) сублимационной сушкой; 5) прямой и обратной репликой пористой матрицы; 6) 3D-печать.

Целью работы являлось получение и исследование физико-химических характеристик биорезорбируемой КФ пенокерамики с использованием порошков гидроксиапатита (ГА), трикальцийфосфата (ТКФ), брусита и раствора поливинилового спирта (ПВС) методом прямой реплики пенополиуретановой (ППУ) матрицы.

Пенокерамику получали методом темплатного синтеза с использованием КФ порошков и открыто-пористого ППУ Regicell 60 (Германия) с размером ячеек 420–440 мкм, пористостью 60–90% и плотностью 0,028–0,034 г/см³ (рис. 1 а). Предварительную обработку ППУ матриц проводили 1% раствором ПВС на водяной бане при 70°C. Пропитывающую суспензию получали на основе порошка ГА, прогретого при 800°C, с добавлением 10–50 масс.% порошка брусита, высушенного при 50°C, и дистиллированной воды либо 1% ПВС при соотношении (КФ порошок) / (связующее) равном 1:2. Пропитывающую суспензию наносили на ППУ матрицы на водяной бане; влажные образцы высушивали на тепловентиляторе, затем в сушильном шкафу при 60°C. Предварительное спекание образцов проводили при 800°C в течение 5 ч; окончательный отжиг – при 1200°C в течение 3 ч.

Методом расслоения установлено, что устойчивость пропитывающих суспензий на основе порошка ГА и связующего в ряду: дистиллированная вода < 1% ПВС < 2,5% ПВС < 5% ПВС повышается от 4 мин до 5 ч при использовании порошка ГА с размером частиц ≤ 71 мкм и – от 16 мин до 23 ч при использовании порошка ГА с размером частиц ≤ 63 мкм. Оптимальные составы пропитывающих суспензий устойчивых в течение 20 мин для нанесения на пористые матрицы являются: 2,5% ПВС / порошок ГА (≤ 71 мкм), 1% ПВС / порошок ГА (≤ 63 мкм) и 2,5% ПВС / порошок ТКФ (≤ 63 мкм).

На снимке КФ пенокерамики (рис. 1 б) представлена пористая структура со сквозными порами, которая повторяет архитектуру ППУ матрицы (рис. 1 а). На СЭМ-изображении скола поверхности КФ пенокерамики после отжига при 1200°C видно (рис. 1 в), что она имеет

микропористую структуру, образованную конгломератами размером 3–9 мкм, которые сформированы более мелкими сферическими частицами размером от 0,5 до 1,0 мкм. Макропоры достигают диаметр до 3,5 мкм, а микропоры – менее 0,3 мкм.

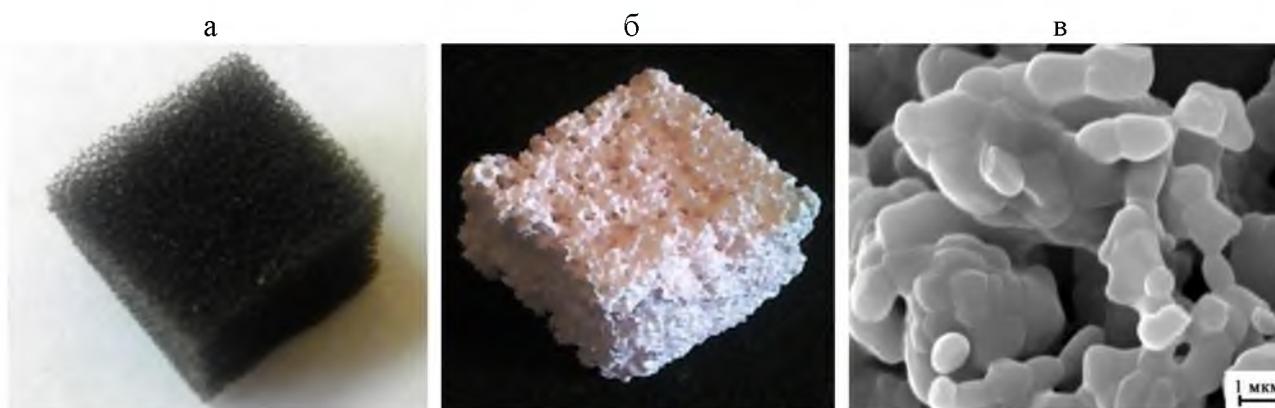


Рисунок 1 – Снимки ППУ матрицы (а), КΦ пенокерамики (б) и СЭМ-изображение скола поверхности КΦ пенокерамики (в)

В результате была получена КΦ пенокерамика на основе различных порошков: ГА (800°C); ГА (800°C) / 30 масс.% ГА (60°C); ГА (800°C) / 10–50 масс.% брушит (50°C); ТКФ (800°C) / 30 масс.% брушит (50°C) с пористостью 40–55% и статической прочностью до 3–7 МПа. Введение в пропитывающую ГА суспензию 10–50 масс.% порошка брушита (50°C) после отжига при 1200°C приводит к значительному снижению статической прочности вследствие аморфизации и частичного разложения ГА до α - и β - ТКФ. Пенокерамика на основе ТКФ (800°C) оказалась очень хрупкой и после 1200°C все образцы разрушились. Введение в пропитывающую ТКФ (800°C) суспензию 30 масс.% порошка ТКФ (70°C) приводит к некоторому повышению статической прочности КΦ пенокерамики до 1,0 МПа, при этом пористость составляет 48%.

После отжига при 1200°C в КΦ пенокерамике на основе ГА (800°C) / брушит (50°C) происходит разложение ГА до α - и β - ТКФ, и с увеличением количества брушита до 40–50 масс.% значительно снижается содержание α - ТКФ, и кристаллизуется β - ТКФ до 75%. В таких же условиях в КΦ пенокерамике на основе ГА (800°C) / 20% α - ТКФ происходит увеличение количества α - ТКФ в два раза до 40%. Таким образом, введение в КΦ пенокерамику на основе ГА (800°C) 10–50 масс.% порошка брушита (50°C) приводит к повышению пористости до 60% и значительному снижению статической прочности до 0,1 МПа за счет аморфизации и последующего разложения ГА до ТКФ и образования губчатой структуры с канальными порами.

Адсорбционно-структурные свойства КΦ пенокерамики по сравнению с исходными КΦ порошками значительно отличаются и максимальное значение удельной поверхности характерно для пенокерамики на основе брушита ($A_{ВЕТ}$ 34 м²/г), а минимальное – для пенокерамики на основе на основе ГА (800°C) / 30 масс.% брушит (50°C) ($A_{ВЕТ}$ 2,2 м²/г). Такие anomalous адсорбционно-структурные свойства могут быть связаны с тем, что при отжиге брушит переходит в пирофосфат кальция (ПФК), а в присутствии ГА происходит несколько процессов (разложение ГА до ТКФ и образование ПФК). Следует отметить, что пенокерамика на основе порошка ГА (60°C) с развитой поверхностью, характеризуется более высокой удельной поверхностью по сравнению с пенокерамикой на основе поверхностно неактивного ГА (800°C).

Образование биомиметического апатита *in vitro* на КФ пенокерамике при выдерживании в растворе SBF в течение 21 сут свидетельствует об ее биосовместимости. Введение в ГА пенокерамику фазы α -ТКФ способствует повышению степени ее резорбции в изотоническом растворе 0,9% NaCl. Результаты «динамического» метода по резорбции КФ пенокерамики в солянокислом буферном растворе при pH=2,2 свидетельствуют о том, что образование в составе ГА пенокерамики, отожженной при 1200°C, фаз α - и β - ТКФ существенно повышают степень ее резорбируемости с 1–2 сут до 14–19 ч. Поэтому введение в исходную ГА (800°C) суспензию непрогретых КФ порошков приводит к формированию более резорбируемых КФ фаз, что позволяет регулировать степень резорбции конечного биоматериала.

Установлено, что высвобождение тетрациклина и бриллиантового зеленого из КФ пенокерамики протекает в три стадии, причем бриллиантовый зеленый высвобождается с постоянной скоростью, а тетрациклин – при значительном ее снижении. Эффект увеличения количества высвобождаемого вещества при невысокой пористости КФ пенокерамики может быть обусловлено наличием микропористой структуры и специфического взаимодействия функциональных групп тетрациклина и ГА. Из КФ пенокерамики в течение первых 5 мин высвобождается концентрация тетрациклина, достаточная для оказания лечебного эффекта, поэтому можно предположить, что КФ пенокерамика может быть эффективна в качестве систем адресной доставки лекарств пролонгированного действия.

Следовательно, введение в исходную ГА (800°C) суспензию непрогретых фосфатов кальция (брушит, ТКФ, ГА) приводит к формированию более резорбируемых КФ фаз, что позволяет регулировать степень резорбции конечного биоматериала. Изучение перспектив дальнейшего практического использования КФ пенокерамики показало, что

1) в КФ пенокерамике независимо от ее состава и пористости в течение первых 5 мин высвобождается концентрация тетрациклина, достаточная для оказания лечебного эффекта; на основании чего можно предположить, что КФ пенокерамика может быть эффективна в качестве системы адресной пролонгированной доставки лекарств, что будет способствовать снижению дозировки употребляемого антибиотика;

2) на примере pH-чувствительного антисептика бриллиантового зеленого обнаружено, что КФ пенокерамика может успешно применяться в качестве системы адресной доставки лекарственных веществ, устойчивых в щелочной среде, с их последующим пролонгированным высвобождением.

Работа выполнялась при финансовой поддержке программы БРФФИ-РФФИ (проекты X18P-063 бел., 18-53-00034 рос.).

[1] В.К. Крутько, А.И. Кулак, О.Н. Мусская, Ю.А. Лесникович. София. 1, 50 (2017).

[2] O.N. Musskaya, A.I. Kulak, V.K. Krut'ko, Yu.A. Lesnikovich, V.V. Kazbanov, N.S. Zhitkova. *Inorganic Materials*. 54, 2. 117 (2018).

[3] С.М. Баринов, В.С. Комлев. Неорганические материалы. 52, 4, 383 (2016).

[4] Т.В. Сафронова, В.И. Путляев. Наносистемы: физика, химия, математика №4, 24 (2013).

[5] V.K. Krut'ko, A.I. Kulak, O.N. Musskaya. *Inorganic Materials*. 53, 4, 429 (2017).

[6] T.V. Safronova, V.I. Putlyaev. *Inorganic Materials*. 53, 1, 17 (2017).

[7] В.К. Крутько, А.И. Кулак, О.Н. Мусская, Т.В. Сафронова. Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 9, 264 (2017).

[8] Т.В. Сафронова, С.А. Корнейчук, В.И. Путляев, Я.Ю. Филиппов, Т.Б. Шаталова, В.К.

Крутько, О.Н. Мусская, С.А. Уласевич. Успехи в химии и химической технологии. 31, 15, 8 (2017).