

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН
України, доктору фізико-математичних наук,
старшому науковому співробітнику,
старшому науковому співробітнику відділу
гетероструктурованих матеріалів Інституту
сцинтиляційних матеріалів НАН України
ТАРАСЕНКО Олегу Анатолійовичу

ВІДГУК

рецензента, кандидата технічних наук, старшого дослідника,
завідувача лабораторії тугоплавких сцинтиляційних матеріалів

Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України

ТУПІЦИНОЇ Ірини Аркадіївни

на дисертаційну роботу

СІБІЛЄВОЇ Тетяни Григорівни

«Виготовлення сцинтиляторів на основі полістиролу методом 3D-друку», що подана до захисту у разову спеціалізовану вчену раду Інституту сцинтиляційних матеріалів Національної академії наук України на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство галузі знань 13 – Механічна інженерія.

Актуальність обраної теми дисертації. Пластмасові сцинтиляційні детектори в даний час широко використовуються у фізиці високих енергій, астрофізиці, а також у багатьох застосуваннях, таких як мюонна томографія та адронна терапія. Сьогодні експерименти з фізики високих енергій вимагають від детекторів високої просторової роздільної здатності, що може бути реалізовано за рахунок сегментації сцинтиляційного матеріалу. Але стандартні технології виробництва дуже трудомісткі через багатостадійність виготовлення та складність збирання окремих кубиків в єдиний детектор.

Зараз в світі активно розвиваються адитивні технології, наприклад, 3D-друк, для отримання функціональних матеріалів, які знаходять застосування у різних галузях промисловості, медицини, науки і техніки. Тобто 3D-друк може дати можливість створювати сцинтилятори зі складною геометрією, уникаючи багатостадійності виробництва, постобробки, а також уникнути додаткових опірних конструкцій при зборці детектору. Тому саме розробці сцинтиляційних і світловідбиваючих матеріалів для 3D-друку та розробці технологічних підходів щодо виготовлення багатoelementних дрібносегментованих детекторів, зокрема методами 3D-друку, а також вивчення оптичних і сцинтиляційних властивостей отриманих зразків присвячена дисертаційна робота Сібілевої Тетяни Григорівни.

Розробка технологічних засад одержання сцинтиляторів на основі полістиролу методом 3D-друку, що дозволяють масштабувати цільові продукти в багатокілограмовій кількості може позитивно впливати на розвиток промисловості, а також наукоємних виробничих компаній, що спеціалізуються на випуску пластмасових сцинтиляторів.

Загальна характеристика роботи та отриманих у ній результатів. Загальний обсяг кваліфікаційної наукової праці, що подана на рецензію, складає 207 сторінок та складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 138 найменувань, 2 додатків та містить 110 рисунків та 25 таблиць.

У *першому розділі* дисертаційного дослідження наведено огляд літератури, що містить 138 посилань, і в якому описано сучасний стан розробки нових типів детекторів на основі пластмасових сцинтиляторів та способи їх виготовлення для експериментів фізики високих енергій, а також сучасний стан розвитку технологій 3D-друку у галузі сцинтиляторів.

У *другому розділі* дисертаційного дослідження наведено опис процесу виготовлення зразків модифікованого пластмасового сцинтилятора на основі полістиролу методом полімеризації у масі, філаментів для 3D-друку, а також обладнання та методики, за допомогою яких проводилась оцінка мінімального радіусу вигину філаменту та характеристика їх оптичних та сцинтиляційних властивостей.

У *третьому розділі* представлено комплексний підхід щодо виготовлення пластмасових сцинтиляторів методом 3D-друку: розробку складу та методики отримання сцинтиляційного філаменту на основі PS, відпрацювання оптимальних режимів 3D-друку для виготовлення прозорих зразків, дослідження оптичних та сцинтиляційних параметрів отриманих зразків. Результати, які були отримані в даному розділі, забезпечують подальшу можливість створення дрібносегментованих детекторів, які розглядаються у розділі 5.

У *четвертому розділі* проведені додаткові експерименти для дослідження впливу різних пігментів на коефіцієнти відбиття та пропускання. Особливу увагу було приділено дослідженню впливу полімерної термопластичної основи на оптичні характеристики отриманих методом 3D-друку відбивачів.

П'ятий розділ дисертаційного дослідження присвячено впровадженню 3D-друку в технологію виготовлення ПС на основі PS разом із відбивачем, зокрема у вигляді дрібносегментованих сцинтиляторів. 3D-друк дає можливість застосовувати нові автоматизовані процеси для спрощення технології виготовлення дрібносегментованих сцинтиляторів, а також значно скоротити час виготовлення і собівартість продукції. Для досліджень використовували описані у попередніх розділах сцинтиляційний та світловідбиваючі філаменти.

Висновки дисертаційної роботи повністю відповідають поставленій меті дослідження та змісту представлених результатів.

Ступінь обґрунтованості та достовірності результатів, що отримані здобувачем, не викликають сумнівів, оскільки базуються на великому обсязі проведених експериментальних досліджень, виконаних на сучасному рівні з використанням високотехнологічного обладнання. Відомості про *особистий внесок* дисертанта повною мірою наведені в дисертації.

Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 6 статей, що реферуються у базах даних Scopus та Web of Science, 5 з них у журналах з Q1-Q2, а також у сімнадцяти тезах доповідей, одержано патент на корисну модель України. За змістом опублікованих наукових праць можна зробити висновок щодо достатньої повноти

викладення у них основних положень дисертації. Зміст анотації у повному обсязі відповідає основним положенням дисертації.

Значущість дослідження для науки і практики.

Наукова новизна отриманих результатів.

В роботі вперше:

1. Визначено оптимальний склад сцинтиляційного філаменту для 3D-друку, що включає паратерфеніл, 1,4-біс(5-феніл-2-оксазоліл)бензол, дифеніл, діоктилфталат та оптично прозорий полістирол. Продemonстровано, що дифеніл та діоктилфталат, які використовуються у зазначених кількостях в якості пластифікаторів, зменшують мінімальний радіус вигину отриманого філаменту до 65 мм, що забезпечує стабільність процесу 3D-друку пластмасових сцинтиляторів за технологією моделювання методом пошарового наплавлення (FDM) без розтріскування матеріалу із відносним світловим виходом: 88% по відношенню до зразку, отриманого методом полімеризації у масі; 92,6% по відношенню до зразку, отриманого методом екструзії; і 100% по відношенню до зразку, отриманого методом лиття під тиском.
2. Досліджено вплив параметрів 3D-друку пластмасових сцинтиляторів на основі полістиролу на оптичні та сцинтиляційні характеристики отриманих зразків. Визначено оптимальний режим 3D-друку, що дозволяє отримувати прозорі зразки з технічною довжиною ослаблення до 20 см і сцинтиляційними характеристиками, порівняними зі зразками, виготовленими за традиційними технологіями (полімеризація у масі, екструзія та лиття під тиском): температура друку від 220 °C до 230 °C, температурі робочої платформи від 100 °C до 110 °C, швидкість друку від 25 мм/с до 30 мм/с, висота формованого шару 0,2 мм, щільність заповнення шару 100%, відсоток перекриття заповнення формованого шару від 10% до 15%, потік заповнення від 110% до 115%, діаметр сопла 0,4 мм та вимкнений обдув.
3. Визначено склади світловідбиваючих філаментів на основі полікарбонату та поліметилметакрилату з додаванням від 5 мас. % до 10 мас. % діоксиду титану, від 5 мас. % до 15 мас. % дрібнодисперсного порошку політетрафторетилену та від 1 мас. % до 2 мас. % діоктилфталату, які дозволяють методом 3D-друку формувати світловідбиваючі шари з коефіцієнтами відбиття до 92% та коефіцієнтами

пропускання до 0,2% на довжині максимуму люмінесценції пластмасового сцинтилятора (420 нм) при товщині відбиваючого шару 1 мм.

4. Продемонстровано можливість одночасного 3D-друку сцинтиляційним та світловідбиваючим філаментами, що дозволяє в єдиному виробничому циклі без необхідності постобробки виготовляти багатoelementні пластмасові сцинтилятори на основі полістиролу із відносним світловим виходом при опроміненні космічними мюонами на рівні еталону (з аналогічною геометричною конфігурацією), виготовленого із склеєних кубиків пластмасового сцинтилятора, отриманих методом полімеризації у масі, при цьому світлові перехресні перешкоди між сцинтиляційними елементами не перевищують 2%.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблено сцинтиляційний та світловідбиваючі філаменти, які дозволяють виготовляти пластмасові сцинтилятори з відбивачем методом 3D-друку в єдиному виробничому циклі без постобробки, зокрема багатoelementні дрібноsegmentовані сцинтилятори із відносним світловим виходом на рівні еталону з такою ж геометричною конфігурацією, який було виготовлено із склеєних сцинтиляційних кубиків, отриманих методом полімеризації у масі.

Розроблені світловідбиваючі філаменти можуть використовуватись як при одночасному 3D-друці із пластмасовим сцинтилятором, так і окремо для виготовлення відбивачів для будь-яких інших сцинтиляторів, при цьому коефіцієнт відбиття сягає 92%.

Розроблено технологічні підходи щодо 3D-друку пластмасових сцинтиляторів на основі полістиролу, які можуть бути застосовані на будь-яких 3D-принтерах, що працюють за технологією FDM. При цьому технічна довжина ослаблення надрукованого ПС сягає 20 см, а світловий вихід порівняний з ПС, виготовленими за традиційними технологіями (полімеризація у масі, екструзія, лиття під тиском), при розмірі сцинтиляційних елементів 10 мм × 10 мм × 10 мм.

За результатами розробок отримано патент на корисну модель України №151781, G01T 1/20 (2006.01) «Сцинтиляційна матриця для реєстрації іонізуючого випромінювання». Методом 3D-друку виготовлено сцинтиляційні матриці та прототип дрібноsegmentованого сцинтилятора «Суперкуб», які забезпечують

мінімальні оптичні перехресні перешкоди та сцинтиляційну ефективність на рівні еталонного зразку, отриманого із склеєних кубиків, виготовлених методом полімеризації у масі.

Дана робота прокладає шлях до нового автоматизованого та економічно-доцільного процесу виробництва майбутніх сцинтиляційних детекторів, незалежно від розміру та складності геометричної конфігурації.

Дискусійні положення та зауваження до дисертації.

1) Розроблені в роботі дрібносегментовані сцинтилятори на основі полістиролу насамперед призначені для використання в експериментах фізики високих енергій, де основною вимогою до матеріалів є радіаційна міцність. Розгляд змін функціональних параметрів дрібносегментованого детектора, виготовленого з кількох видів нових матеріалів, під впливом радіації був би доцільним у цій роботі.

2) Час висвічування сцинтилятора – ще один критичний параметр, з точки зору використання в експериментах фізики високих енергій. Відомо, що комерційні сцинтилятори на основі полістиролу мають надзвичайно швидкий сцинтиляційний відгук, час висвічування 2-3,5 нс, як було зазначено в дисертаційній роботі. Чи впливають добавки, які вводили в полістирол під час виготовлення філоменту та термічний вплив під час 3D-друку на кінетичні характеристики світіння дрібносегментованого детектора?

3) Розмір сегменту багатопіксельного сцинтиляційного детектора визначає просторову роздільну здатність детектора. Чи дозволяє розроблений у дисертаційній роботі метод отримання з використанням 3D-друку зменшити розміри сегментів сцинтилятора?

4) В роботі були розроблені світловідбиваючі філаменти, які за своїми оптичними характеристиками краще існуючих комерційних світловідбиваючих матеріалів для 3D-друку. Але для виготовлення прототипу детектору «Суперкуб» був використаний комерційний матеріал Rosa3D, чому?

Однак, поставлені питання та зауваження не впливають на загальне позитивне враження від роботи, яка є завершеним науковим дослідженням, виконана на високому науковому рівні та має велику практичну цінність.

Відсутність порушення академічної доброчесності. Жодних ознак можливого плагіату або інших порушень академічної доброчесності не виявлено.

Загальний висновок та оцінка дисертації. Вважаю, що за актуальністю, новизною, рівнем і достовірністю отриманих наукових результатів дисертаційна робота Сібілевої Тетяни Григорівни «Виготовлення сцинтиляторів на основі полістиролу методом 3D-друку» повністю відповідає всім вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор, Сібілева Тетяна Григорівна, безумовно заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство галузі знань 13 – Механічна інженерія.

Рецензент:

завідувач лабораторії
тугоплавких сцинтиляційних матеріалів
Інституту сцинтиляційних матеріалів
Національної академії наук України,
к.т.н., ст. досл.



Ірина ТУПШІНА

Підпис І. Тупіциної засвідчую:

учений секретар Інституту
сцинтиляційних матеріалів
Національної академії наук України,
к.т.н., ст. досл.



Юрій ДАЦЬКО