

ОПТИМІЗАЦІЯ ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВІ СЦИНТИЛЯЦІЙНОГО КРИСТАЛА ВОЛЬФРАМАТУ КАДМІЮ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПО ПОШУКУ 2 β -РОЗПАДУ ЯДРА ^{116}Cd

І. І. Веретянников^{1,2}, Ф. А. Даневич¹, Ю. Г. Здесенко¹, В. В. Кобичев¹,
С. С. Нагорний¹, Д. В. Пода^{1,3}

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ

³ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

Показано, що за рахунок покращання енергетичної роздільної здатності сцинтиляційного спектрометра з кристалами $^{116}\text{CdWO}_4$ з 8 до 4 % ($FWHM$, на енергії 2 β -розпаду ^{116}Cd – 2,8 МеВ) можна в три-чотири рази знизити фон детектора. Це буде одним із вирішальних факторів поліпшення чутливості нового експерименту, який планується в Солотвинській підземній лабораторії, до рівня $T_{1/2} \approx 10^{25}$ років для 0 ν 2 β -розпаду ^{116}Cd , що відповідає масі нейтрино $m_\nu \approx 0,2$ еВ. З кристалом CdWO_4 ($\varnothing 40 \times 30$ мм), розміщеним у світловоді, одержано підвищення амплітуди сигналів на 22 %. Таке збільшення світловиходу сцинтиляційного детектора при використанні світловоду отримано вперше. Оцінено, що за умови використання двох світловодів та "off-line" корекції неоднорідності світлозбору на енергії 2,8 МеВ може бути досягнута енергетична роздільна здатність 3,7 %.

1. Вступ

Нещодавно було отримано вагомі підтвердження існування нейтринних осциляцій у дослідах з атмосферними [1 – 3] та сонячними нейтрино [4 – 6], з антинейтрино від реакторів [7] і в експерименті на прискорювачі [8]. Оскільки осциляції неможливі без наявності в нейтрино ненульових мас та їх змішування, цей факт розглядається як вказівка на існування нової фізики поза рамками стандартної моделі елементарних частинок. Згідно з різними теоретичними моделями, сучасні експериментальні дані з осциляцій представляють масу нейтрино в діапазоні $0,005 \leq m_\nu \leq 0,1$ еВ. Але "осциляційні" експерименти чутливі лише до квадрата різниці мас різних масових станів нейтрино. Найчутливішим шляхом дослідження природи нейтрино (діраківська чи майоранівська частинка) і шкали його мас є пошук забороненого в рамках стандартної моделі безнейтринного подвійного β -розпаду (0 ν 2 β) атомних ядер [9 – 11].

На даний момент існують чимало спроб зареєструвати 0 ν 2 β -розпад, але жодна не досягла успіху* [17]. Найкращі з цих досліджень установлюють нижню межу періоду піврозпаду по відношенню до 0 ν 2 β -розпаду на рівні $10^{23} - 10^{25}$ років, що відповідає верхній межі на масу нейтрино в діапазоні 0,3 – 3 еВ. А щоб зареєструвати ефект, що відповідає масі нейтрино 0,005 – 0,1 еВ, слід значно покращити чутливість експериментів.

Одне з найбільш жорстких обмежень на процес 0 ν 2 β -розпаду отримане в експерименті з ядром ^{116}Cd . Вимірювання проводилися в Солотвинській підземній лабораторії ІЯД НАН України, розташованій у соляній шахті на глибині 430 м [18], за допомогою низькофонового сцинтиляційного детектора на основі кристалів вольфрамату кадмію зі збагаченням ^{116}Cd до 83 % ($^{116}\text{CdWO}_4$). Чотири кристали $^{116}\text{CdWO}_4$ загальною масою 330 г проглядалися низькофоновим фотопомножувачем (ФЕП, D724KFL, THORN EMI) через світловод типу "логарифмічна спіраль" (див. п. 3.1) $\varnothing 10 \times 55$ см, що був склеєний

* Повідомлення про реєстрацію 0 ν 2 β -розпаду ^{76}Ge [12] піддано сумнівам у ряді робіт [13 – 15]. Нещодавно група з Гайдельбергу опублікувала дані експерименту з більшою на 30 % статистикою і продовжує наполягати на спостереженні 0 ν 2 β -розпаду ^{76}Ge з $T_{1/2} \approx 1,2 \cdot 10^{25}$ років, звідки оцінена ефективна маса електронного нейтрино $m_\nu \sim 0,4$ еВ [16].

з кварцу марки КУ-1 (25 см) і пластикового сцинтилятора (BC-412, Bicron) довжиною 30 см. Ці кристали оточувались активним захистом з 15 кристалів CdWO_4 великого об'єму загальною масою 20,6 кг, які проглядались ФЕП (ФЭУ-125нф) через пластиковий (BC-412, Bicron) світловод ($\varnothing 17 \times 49$ см). Обидва детектори розміщувались усередині додаткового активного захисту з пластикового сцинтилятора $40 \times 40 \times 95$ см. Таким чином, разом з обома світловодами було створено активний "4 π " захист для головного ($^{116}\text{CdWO}_4$) детектора. Зовнішній пасивний захист складався з шарів надчистої міді (3 – 6 см), свинцю (22,5 – 30 см) і поліетилену (16 см). Два сцинтиляційних детектори (з пластиковими сцинтиляторами розмірами $120 \times 130 \times 3$ см) було встановлено над установкою й використовувались як лічильники космічних мюонів. Для захисту від радону установку було ізольовано від проникнення повітря. У результаті обробки накопичених за 14183 год даних отримано обмеження на півперіод $0\nu 2\beta$ -розпаду ядра ^{116}Cd : $T_{1/2}^{0\nu} \geq 1,7 (2,6) \cdot 10^{23}$ років 90 % (68 %) CL, що відповідає верхній межі на майоранівську масу електронного нейтрино $m_\nu \leq 1,7 (1,4)$ еВ [19 – 21].

Підвищення чутливості експерименту можливе шляхом збільшення числа ядер ^{116}Cd та часу вимірювань, зниження фону й покращання енергетичної роздільної здатності спектрометра. У даній роботі було проаналізовано основні джерела фону сцинтиляційного детектора з кристалами $^{116}\text{CdWO}_4$ і розглянуто можливість зниження фону завдяки покращанню енергетичної роздільної здатності. З метою пошуку оптимальної конструкції детектуючої системи "сцинтилятор – світловод – фотопомножувач", яка б забезпечувала максимальний збір сцинтиляційних фотонів і найкращу роздільну здатність, було проведено вимірювання й розрахунки світлозбору та енергетичної роздільної здатності детектора з кристалами CdWO_4 .

2. Значення енергетичної роздільної здатності для підвищення чутливості експерименту по пошуку 2β -розпаду ^{116}Cd

2.1. Аналіз джерел фону низькофонового сцинтиляційного спектрометра з кристалами $^{116}\text{CdWO}_4$

На рис. 1, а зображено спектр фону детектора з кристалами $^{116}\text{CdWO}_4$, виміряний упродовж 14183 год у ході експерименту по пошуку 2β -розпаду ^{116}Cd [21]. Енергетична роздільна здатність детектора (ширина піка на половині його висоти, $FWHM$) становила 8,3 % для γ -лінії ^{232}Th (2615 кеВ). В інтервалі енергій 2,6 – 3,0 МеВ, де очікується пік від $0\nu 2\beta$ -розпаду ^{116}Cd ($Q_{2\beta} = 2,8$ МеВ), основний внесок у фон дають такі компоненти: 1) $2\nu 2\beta$ -розпад ^{116}Cd (≈ 10 %); 2) внутрішнє забруднення кристала торієм (≈ 30 %); 3) γ -кванти з енергією 2615 кеВ від розпадів ^{208}Tl (≈ 60 %), що знаходиться в конструкційних матеріалах, в основному, у ФЕП.

Перша компонента фону є найнебезпечнішою, оскільки електрони, що випромінюються при $2\nu 2\beta$ -розпаді, неможливо відрізнити ніякими методами від очікуваних у $0\nu 2\beta$ -розпаді. Єдиним способом запобігти їх потраплянню в область $0\nu 2\beta$ -розпаду є покращання роздільної здатності детектора, що також дозволить значно зменшити внесок і від третьої складової фону. На рис. 1, б зображено очікуваний спектр детектора зі сцинтиляційними кристалами $^{116}\text{CdWO}_4$ загальною масою 10 кг (збагачення ^{116}Cd до 83 %), який можна отримати після п'яти років вимірювань за умови, що роздільна здатність покращиться вдвічі ($FWHM = 4$ % на енергії 2,8 МеВ). Покращання роздільної здатності дозволить зменшити внесок у фон від γ -квантів 2615 кеВ приблизно в три й від $2\nu 2\beta$ -розпаду ^{116}Cd майже в 50 разів. Крім того, планується зменшити внесок від γ -квантів за рахунок використання ФЕП класу Ultra Low Background [22] та збільшення довжини світловоду. Фон, спричинений слідовими кількостями ^{232}Th у кристалах, може бути подавлений за рахунок виробництва кристалів з меншим рівнем забрудненості, дискримінації сигналів за формою та

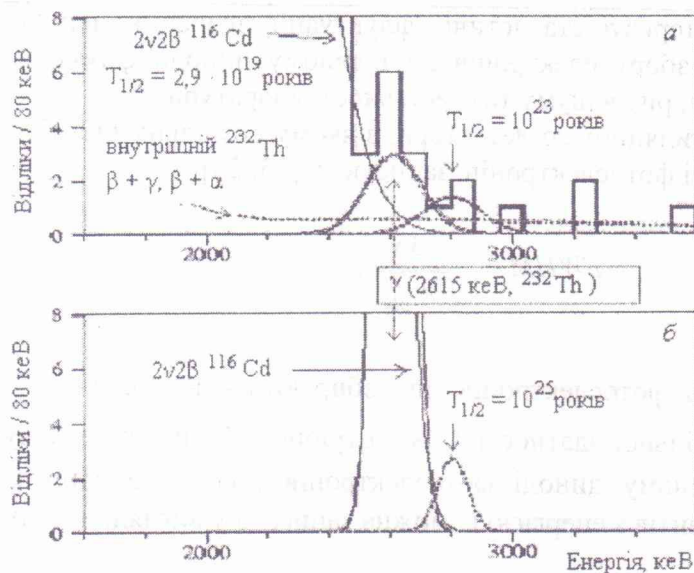


Рис. 1. Спектр фону детектора на основі сцинтиляційних кристалів $^{116}\text{CdWO}_4$ (a) і промодельований спектр фону детектора $^{116}\text{CdWO}_4$ (б).

використання інформації про координату сцинтиляційного спалаху. За таких умов фон детектора може бути зменшений приблизно в 20 разів, що дасть змогу підвищити чутливість досліду до рівня $T_{1/2}^{0\nu} \sim 10^{25}$ років. Ця чутливість відповідає значенню маси нейтрино майоранівської природи $m_\nu \sim 0.2$ eV, а отже, дозволить перевірити повідомлення про спостереження $0\nu 2\beta$ -розпаду ^{76}Ge [12, 16].

2.2. Роздільна здатність детектора з кристалом CdWO_4

Наближено можна вважати [23 – 25], що флуктуації величин, які визначають роздільну здатність сцинтиляційного детектора, складаються як вектори:

$$FWHM^2 = R_i^2 + R_p^2 + R_{PMT}^2. \quad (1)$$

Тут R_i – внутрішня роздільна здатність сцинтилятора; R_p та R_{PMT} – роздільні здатності, пов'язані з розповсюдженням світла та з процесами в ФЕП відповідно [23 – 25]. Внутрішня роздільна здатність кристала R_i пов'язана з багатьма ефектами, але найголовнішими є два фактори. Перший – непропорційний відгук сцинтилятора як функція енергії γ -квантів. Багато досліджень стверджують, що цей ефект дає основний внесок у внутрішню роздільну здатність. Другий внесок пов'язаний з неоднорідностями в сцинтиляторі, спричиненими локальними відмінностями світловиходу. Можливість останнього пов'язана з градієнтами концентрації центрів люмінесценції в сцинтиляційному кристалі. При цьому кількість фотонів залежить від точки в кристалі, де відбувається сцинтиляційний спалах. Можна очікувати, що в детекторах CdWO_4 неоднорідність може бути спричинена, наприклад, порушенням стехіометрії та її варіаціями в об'ємі кристала.

Переносна компонента R_p залежить від оптичних властивостей сцинтилятора, його геометричної форми та розмірів, якості оптичного контакту між кристалом і ФЕП, наявності світловодів, неоднорідності квантової ефективності фотокатода та її залежності від довжини хвилі фотона, кута падіння фотона на фотокатод. У сцинтиляторах CdWO_4 ця компонента може бути досить значимою. Це пов'язано з невисокою прозорістю цих кристалів до власного сцинтиляційного випромінювання, наявністю подвійного променезаломлення та неоднорідностей.

Величина R_{PMT} характеризує статистичні флуктуації сигналу на виході ФЕП, а отже, залежить від ефективності збору електронів на першому диноді, флуктуацій підсилення електронів у системі динодів, рівня шуму та стабільності апаратури.

Для ідеального сцинтиляційного детектора, в якому роздільна здатність визначається лише флуктуаціями кількості фотоелектронів, записують [23, 24]

$$FWHM \approx \frac{2,35}{\sqrt{\bar{N}_{phe}}}, \quad (2)$$

де $\bar{N}_{phe}$ – середня кількість фотоелектронів, що збираються на першому диноді. Таким чином, щоб досягнути роздільної здатності 4 %, потрібно забезпечити умову: $\bar{N}_{phe} \geq 3500$. Кількість зібраних на першому диноді фотоелектронів при поглинанні в сцинтиляторі $CdWO_4$ β -частинок або γ -квантів з енергією Q можна записати у вигляді добутку:

$$\bar{N}_{phe} = \bar{N}_{ph} \cdot Q \cdot QE \cdot LC, \quad (3)$$

де $\bar{N}_{ph}$ – середня кількість утворених сцинтиляційних фотонів на 1 MeV поглинутої енергії; QE – квантова ефективність фотокатода ФЕП; LC – коефіцієнт збирання фотонів на ФЕП.

Величина QE обраховується як інтегральна згортка спектра висвічування кристала $CdWO_4$ та квантової чутливості ФЕП (рис. 2). Вона виявилася рівною 0,17 для найкращого з трьох ФЕП типу D724KFL з рубідій-цезієвим (RbCs) фотокатодом, які були виготовлені компанією THORN EMI спеціально для солотвинського експерименту. Для ФЕП з мультилужним фотокатодом отримали $QE = 0,13$, що збігається зі значенням, що використовувалося в роботі [23].

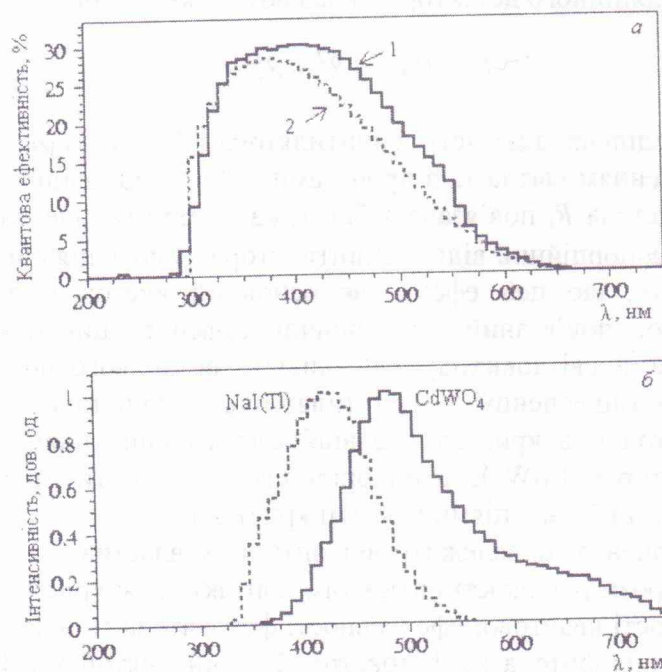


Рис. 2. Спектральна залежність квантової ефективності фотопомножувачів з різними фотокатодами (1 – RbCs, 2 – мультилужний) (а) та спектр висвічування сцинтиляторів NaI(Tl) [28] і $CdWO_4$ [27] (б).

Для кількості фотонів, що випромінюються в сцинтиляторах вольфраматів кадмію, у літературі [23, 26, 27] зустрічаються такі значення: $N_{ph} = (15 - 28) \cdot 10^3$ фотонів/MeV. З кристалом CdWO_4 розміром $\varnothing 40 \times 30$ мм, установленим на ФЕП з мультилужним фотокатодом (XP2412, Philips), одержали роздільну здатність $FWHM = 6,7\%$ для γ -лінії 1,064 MeV ^{207}Bi (рис. 3). Коефіцієнт збирання світла в цій геометрії було розраховано методом Монте-Карло за допомогою пакета GEANT4 (див. п. 3.3). Було одержано, що на фотокатод ФЕП потрапляє 27 % від загальної кількості фотонів, що випромінювалися в об'ємі сцинтилятора. Таким чином, за формулами (2) і (3) ми оцінили, що в цьому кристалі утворюється не менше як $30 \cdot 10^3$ фотонів/MeV.

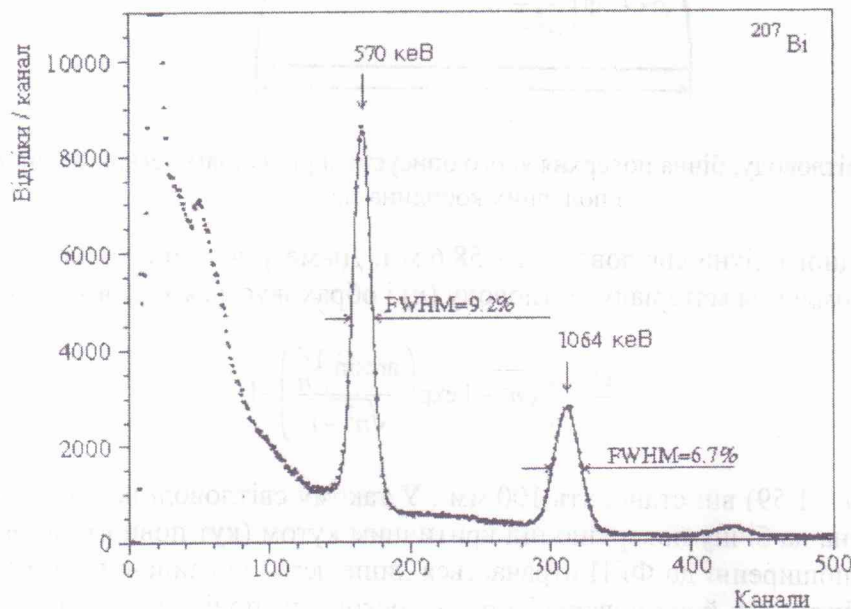


Рис. 3. Гамма-спектр ^{207}Bi виміряний за допомогою сцинтилятора CdWO_4 $\varnothing 40 \times 30$ мм, оптично приєднаного до ФЕП (XP2412, Philips).

Підставляючи у формулу (3) значення $\bar{N}_{phe}$, маємо, що для отримання $FWHM = 4\%$ на енергії $Q_{2\beta}^{116}\text{Cd}$ світлозбір повинен становити не менше як 25 % (тобто 90 % порівняно зі стандартною конструкцією (кристал оптично приєднаний до ФЕП) за умови використання ФЕП з $QE = 0,17$. Якщо дещо послабити вимоги до якості ФЕП і припустити використання RbCs ФЕП з $QE \approx 0,15$ або ФЕП з мультилужним фотокатодом ($QE = 0,13$), одержимо $LC = (28 - 32)\%$. Тобто світлозбір у детекторі з довгим світловодом (світловодами) потрібно забезпечити таким же, як у випадку, коли кристал установлено безпосередньо на ФЕП, або навіть більшим у $\approx 1,2$ рази. Крім того, оскільки розрахунки проведено для ідеального випадку, оптимізація детектора передбачає не лише можливість передачі необхідної кількості фотонів на фотокатод ФЕП, а також і компенсацію неоднорідностей світлозбору.

3. Вимірювання й розрахунки світлозбору та роздільної здатності сцинтиляційного детектора з кристалом CdWO_4

3.1. Експериментальна методика

Вимірювання відносної амплітуди сигналів та енергетичної роздільної здатності проводилися з кристалом CdWO_4 $\varnothing 40 \times 30$ мм. Було використано ФЕП діаметром 5 дюймів (D724KFL, THORN EMI) з RbCs фотокатодом. Кращий ФЕП даного типу задіяний у низькофоновому спектрометрі в Солотвино, а тому для вимірювань використовувався ФЕП з дещо гіршою квантовою ефективністю: $QE \approx 0,11$. Кристал обгортався трьома шарами

тефлонової плівки PTFE (BC-642, Bicron) та шаром майлару. Оптичний контакт забезпечувався силіконовою змазкою (Qr-3067, Dow Corning). Застосовувався світловод типу “логарифмічна спіраль” [29], виготовлений із сцинтилятора на основі полістиролу. Схему такого світловоду зображено на рис. 4.

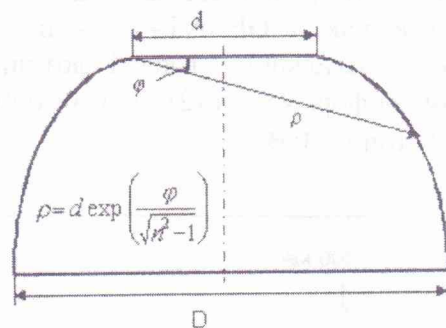


Рис. 4. Схема світловоду, бічна поверхня якого описується рівнянням логарифмічної спіралі в полярних координатах.

Діаметр вхідного вікна світловоду $d = 58,6$ мм. Діаметр вихідного вікна (D) залежить від коефіцієнта заломлення матеріалу світловоду (n) і обчислюється за формулою [29]

$$\frac{D}{d} = \frac{2}{n} \sqrt{n^2 - 1} \exp \left(\frac{\arcsin \frac{1}{n}}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) - 1. \quad (4)$$

Для полістиролу ($n = 1,59$) він становить 100 мм. У такому світловоді всі промені потрапляють із вхідного вікна на бічну поверхню під критичним кутом (кут повного відбиття). Таким чином, світло при поширенні до ФЕП втрачається лише через поглинання в об'ємі світловоду та неповне відбиття від його поверхні при недосконалій поліровці. Відносна амплітуда сигналів та енергетична роздільна здатність обраховувалися по γ -пікам ^{207}Bi , ^{137}Cs та ^{232}Th в діапазоні енергій $\approx 0,3 - 2,6$ MeV.

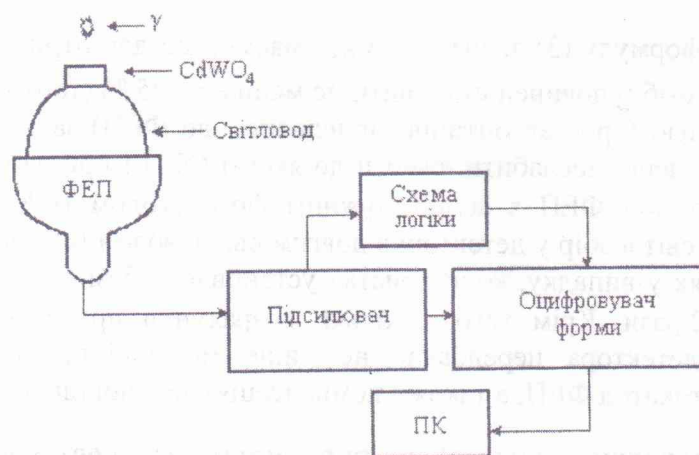


Рис. 5. Блок-схема системи накопичення даних.

Вимірювання виконувалися за допомогою системи накопичення даних, блок-схему якої зображено на рис. 5. Сигнал з ФЕП через попередній підсилювач подавався на схему логіки та оцифровувач форми. Схема логіки складалася з двох каналів, що формували сигнали часової прив'язки й вибору енергетичного порогу. Сигнал часової прив'язки вироблявся за допомогою підсилювача з часом формування сигналу $\approx 0,5$ мкс і порогового дискримінатора. Канал вибору енергетичного порогу складався із спектрометричного підси-

лювача (БУС2-97) з часом формування сигналу 6 мкс та дискримінатора (БСА2-95). Ці сигнали подавалися на систему збігів, яка виробляла тригер запуску оцифровувача форми. Оцифровувач форми з частотою 20 МГц розроблено на основі 12-розрядного аналогово-цифрового перетворювача (AD9022, Analog Devices) [30]. Сигнали з оцифровувача передавалися до ПК через плату зв'язку (PC-DIO-24, National Instruments). Накопичення енергетичних спектрів забезпечувалося програмою, яка дозволяла в "on-line" режимі відділяти сигнали CdWO_4 (з постійною спаду $\tau \approx 13$ мкс) від коротких сигналів ($\tau \approx 0,1$ мкс), що виникали у світловоді. Обробка енергетичних спектрів виконувалася за допомогою програмного пакета PAW (Physics Analysis Workstation).

3.2. Результати вимірювань

Було проведено вимірювання енергетичної роздільної здатності та відносної амплітуди імпульсів залежно від обробки поверхні кристала CdWO_4 , геометрії світловодів та обробки їх поверхні. Спочатку кристал ($\varnothing 40 \times 30$ мм), обгорнутий тефлоновою плівкою, оптично приєднувався до ФЕП без світловоду. Потім між кристалом та ФЕП розміщували світловод, бічну поверхню якого обгортали шаром майлару. Наступний етап досліджень передбачав використання цього ж світловоду, але з виїмкою ($\varnothing 40 \times 30$ мм) у вхідному вікні, куди поміщали кристал. Оптичний контакт між кристалом і світловодом, у цьому випадку, забезпечувався силіконовим мастилом (LC-01, ETRAC). Результати вимірювань наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Результати вимірювань енергетичної роздільної здатності (*FWHM*) та відносної амплітуди імпульсів з кристалом CdWO_4 $\varnothing 40 \times 30$ мм у різних умовах

№	Умови вимірювань	Енергетична роздільна здатність <i>FWHM</i> (%) на енергії, кеВ					Відносна амплітуда імпульсів, %
		239 (^{232}Th)	570 (^{207}Bi)	662 (^{137}Cs)	1064 (^{207}Bi)	2615 (^{232}Th)	
1	Кристал полірований (П)	18,8 (3)	12,2 (3)	11,1 (3)	9,4 (4)	5,8 (5)	100
2	Кристал шліфований (Ш)	16,5	11,2	10,1	8,6	6,6	81 (1)
3	Кристал (П) зі світловодом	17,8	11,8	10,4	8,9	6,4	76
4	Кристал (Ш) зі світловодом	16,6	10,2	10,1	8,6	6,6	89
5	Кристал (Ш) у Ш отворі світловоду	14,7	11,8	11,6	10,5	9,2	116
6	Кристал (Ш) у П отворі світловоду	14,2	12,0	10,9	10,4	9,5	122

З наведених вимірювань випливає (див. табл. 1), що розміщення кристалів у середині світловоду дозволяє значно (на 22 %) збільшити збір світла. Але, незважаючи на таке покращання сітлозбору, очікуваного значення роздільної здатності не отримано. До того ж для γ -квантів з більшою енергією спостерігається деяке погіршення роздільної здатності. Причиною цього може бути істотна неоднорідність світлозбору. Так само неоднорідністю збору світла можна пояснити погіршення роздільної здатності при використанні полірованого кристала порівняно зі шліфованим (див. результати вимірювань № 1 і № 2 в табл. 1). Відомо, що шліфовані поверхні кристалічних сцинтиляторів покращують роздільну здатність завдяки зменшенню неоднорідності світлозбору [31]. Є підстави вважати, що, за умови використання двох світловодів з порожнинами, цю неоднорідність можна компенсувати, а отже, і отримати потрібне значення роздільної здатності.

3.3. Розрахунки світлозбору сцинтиляційного детектора в різних геометріях

Було проведено розрахунки світловиходу кристала CdWO_4 (циліндричної форми, $\varnothing 40 \times 30$ мм) залежно від геометрії детектора методом Монте-Карло за допомогою програмного комплексу GEANT 4 [32]. Усі оптичні поверхні (крім одного випадку) вважались полірованими, світловоди були оточені повітрям та обгорнуті майларом з коефіцієнтом відбиття 0,90. Зовнішній діаметр циліндричної частини світловодів дорівнював 67 мм, їх загальна довжина – 250 мм. Оптичні властивості середовищ (l – середня довжина пробігу оптичного фотона, n – коефіцієнт заломлення) вибрано такими: CdWO_4 : $l = 15$ см, $n = 2,3$; скло: $l = 2,0$ м, $n = 1,5$; полістирол: $l = 2,0$ м, $n = 1,59$; силіконове мастило: $l = 2,0$ м, $n = 1,5$; повітря та вакуум: $l = \infty$, $n = 1,0$. У всіх випадках детектор мав циліндричну симетрію. Для кожної геометрії розігрувалось 10^5 фотонів, рівномірно розподілених по об'єму сцинтилятора та з ізотропно розподіленим імпульсом і поляризацією. Результати моделювання наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Залежність частини сцинтиляційних фотонів, що потрапляють на фотокатод ФЕП (LC), від геометрії детектора

№	Геометрія сцинтиляційного детектора	LC, %
1	Кристал, обгорнутий тefлоновою плівкою (коефіцієнт відбивання 95 %), оптично з'єднано з ФЕП	$23,6 \pm 0,5$ (П) $27,4 \pm 0,5$ (Ш)
2	Кристал, занурений у силіконове мастило ($n = 1,50$) в циліндричному світловоді ($n = 1,59$), який проглядають два ФЕП	$18,9 \pm 0,3$ (П)
3	Кристал, оптично з'єднаний з двома циліндричними полістироловими світловодами ($n = 1,59$)	$21,2 \pm 0,4$ (П)
4	Кристал, оптично з'єднаний з двома циліндричними полістироловими світловодами ($n = 1,59$) з конічними головками	$32,8 \pm 0,6$ (П)

Примітка. У геометріях № 2 – 4 вся поверхня кристала знаходиться в оптичному контакті зі світловодом. Літерами позначено стан поверхні кристала: П – полірований, Ш – шліфований.

Видно, що найбільше фотонів з кристала CdWO_4 на ФЕП ($LC \approx 33$ %) можна передати за допомогою двох світловодів з конічними головками. Ця геометрія дозволяє на 22 % покращити світлозбір порівняно із стандартною конструкцією детектора. Можливість такого покращання підтверджується результатами вимірювань, описаних в п. 3.2.

Можна обрахувати граничну величину роздільної здатності, використовуючи результати моделювання, дані вимірювань і формули (2) та (3). За умови збору 33 % фотонів і використання ФЕП з квантовою ефективністю $QE = 0,17$ можна досягнути роздільної здатності 3,4 % на енергії 2β -розпаду ядра ^{116}Cd . Таким чином, навіть припускаючи приблизно 10 % погіршення за рахунок ефектів, що обговорювалися в п. 2.2 (на таке погіршення роздільної здатності реального детектора вказують також автори роботи [23]), сподіваємося одержати $FWHM \approx 3,7$ %.

4. Висновки

Проведено аналіз джерел фону низькофонового сцинтиляційного спектрометра з кристалами CdWO_4 в області очікуваного піка від безнейтринного 2β -розпаду. На 60 % фон спричинений γ -квантами з енергією 2615 кеВ від розпадів ^{208}Tl (дочірній продукт ^{232}Th) в конструкційних матеріалах спектрометра, в основному у ФЕП. Ще 10 % фонових подій дає двонейтринний 2β -розпад ^{116}Cd . Залишок (30 %) може бути пояснений, головним чином, розпадами дочірніх продуктів ^{232}Th , що в слідovій кількості (≈ 40 мкБк/кг) містяться в сцинтиляторах $^{116}\text{CdWO}_4$. Лише за рахунок покращання енергетичної роздільної здатності спектрометра (з 8 до 4 % на енергії 2β -розпаду ^{116}Cd) внесок від перших двох компонент може бути зменшений в три – чотири рази.

Проаналізовано фактори, що впливають на енергетичну роздільну здатність сцинтиляційного детектора з кристалами CdWO_4 . Проведено вимірювання відносного світловиходу та роздільної здатності сцинтиляційного детектора з кристалами CdWO_4 залежно від умов світлозбору, форми світловоду та обробки поверхні. Експериментально встановлено, що амплітуда сигналів від сцинтилятора CdWO_4 при оптимальній геометрії збільшується в 1,2 рази порівняно зі стандартною конструкцією (сцинтилятор оптично з'єднано з ФЕП).

Процеси збирання світла в сцинтиляційному детекторі з кристалом CdWO_4 промодельовано методом Монте-Карло за допомогою програмного комплексу GEANT4. Розрахунки проведено для стандартної конструкції детектора (сцинтилятор оптично з'єднано з ФЕП) та геометрії, коли кристал проглядається двома ФЕП через світловоди різної форми. Результати моделювання й вимірювань показують, що можна отримати покращання роздільної здатності до 3,7 % на енергії $Q_{2\beta}^{116}\text{Cd}$ (2,8 MeV) для сцинтиляційного спектрометра на основі кристалів CdWO_4 . Ведеться підготовка до проведення таких вимірювань.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Fucuda Y., Hayakawa T., Ichihara E. et al.* Super-Kamiokande Collaboration // *Phys. Rev. Lett.* - 1998. - Vol. 81. - P. 1562; 1999. - Vol. 82. - P. 1810; *Fucuda S., Fucuda Y., Ishitsuka M. et al.* Super-Kamiokande Collaboration // *Phys. Rev. Lett.* - 2000. - Vol. 85. - P. 3999.
2. *Mann W. A.* Soudan 2 Collaboration // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* - 2001. - Vol. 91. - P. 134.
3. *Ambrosio M., Antolini R., Auriemma G. et al.* MACRO Collaboration // *Phys. Lett. B* - 2001. - Vol. 517. - P. 59.
4. *Lande K., Wildenhain P.* // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* - 2003. - Vol. 118. - P. 49.
5. *Abdurashitov J. N., V. N. Gavrin, S. V. Girin et al.* SAGE Collaboration // *Phys. Rev. C* - 1999. - Vol. 60. - P. 055801; *Vermul V. M.* // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* - 2002. - Vol. 110. - P. 315.
6. *Ahmad Q. R., Allen R. C., Andersen C. T. et al.* SNO Collaboration // *Phys. Rev. Lett.* - 2002. - Vol. 89. - P. 011302; nucl-ex/0204009.
7. *Eguchi K., Enomoto S., Furuno K. et al.* KamLAND Collaboration // *Phys. Rev. Lett.* - 2003. - Vol. 90. - P. 021802; hep-ex/0212021.
8. *Ahn M. H., Aoki S., Bhang H. et al.* K2K Collaboration // *Phys. Rev. Lett.* - 2003 - Vol. 90. - P. 041801; hep-ex/0212007.
9. *Moe M., Vogel P.* // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* - 1994. - Vol. 44. - P. 247.
10. *Vergados J. D.* // *Phys. Rep.* - 2002. - Vol. 361. - P. 1.
11. *Zdesenko Yu.* // *Rev. Mod. Phys.* - 2002. - Vol. 74. - No. 3. - P. 663.
12. *Klapdor-Kleingrothaus H. V., Dietz A., Harley H. L., Krivosheina I. V.* // *Mod. Phys. Lett. A* - 2001. - Vol. 16. - P. 2409.
13. *Aalseth C. E., Avignone F. T. III, Barabash A. et al.* // *Mod. Phys. Lett. A* - 2002. - Vol. 17. - P. 1475; hep-ex/0202026.
14. *Zdesenko Yu. G., Danevich F. A., Tretyak V. I.* // *Phys. Lett. B* - 2002. - Vol. 546. - P. 206.
15. *Feruglio F., Strumia A., Vissani F.* // *Nucl. Phys. B* - 2002. - Vol. 637. - P. 345; 2003. - Vol. 659. - P. 359; hep-ph/0201291.
16. *Klapdor-Kleingrothaus H. V., Krivosheina I. V., Dietz A., Chkvorets O.* // *Phys. Lett B* - 2004. - Vol. 586. - P. 198.
17. *Tretyak V. I., Zdesenko Yu. G.* // *At. Data Nucl. Data Tables* - 1995. - Vol. 61. - P. 43; *At. Data Nucl. Data Tables* - 2002. - Vol. 80. - P. 83.
18. *Zdesenko Yu. G., Kropivnyansky B. N., Kuts V. N., Nikolaiko A. S.* // *Proc. 2nd Int. Symp. Uderground Physics. Baksan Valley* - 1987. - Moscow: Nauka, 1988. - P. 291.
19. *Danevich F. A., Georgadze A. Sh., Kobychiev V. V. et al.* // *Phys. Rev. C* - 2000. - Vol. 62. - P. 045501.
20. *Bizetti P.G., Danevich F.A., Fazzini T. F. et al.* // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* - 2002. - Vol. 110. - P. 389.
21. *Danevich F.A., Georgadze A. Sh., V. V. Kobychiev et al.* // *Phys. Rev. C* - 2003. - Vol. 67. - P. 014310.
22. *Catalog THORN EMI Electron Tubes Ltd.* - 1993.

23. Dorenbos P., De Haas J. T. M., Van Eijk C. W. E. // IEEE Trans. Nucl. Sci. - 1995. - Vol. 42. - No. 6. - P. 2190.
24. Van Eijk C. W. E. // Nucl. Instr. Meth. A - 2001. - Vol. 471. - P. 244.
25. Moszynski M. // Nucl. Instr. Meth. A - 2003. - Vol. 505. - P. 101.
26. Holl I., Lorenz E., Mageras G. // IEEE Trans. Nucl. Sci. - 1988. - Vol. 35. - P. 105.
27. Kinloch D. R., Novak W., Rady P., Toepke I. // IEEE Trans. Nucl. Sci. - 1994. - Vol. 41. - No. 4. - P. 752.
28. Catalog Crismatec, Saint-Gobain, Ceramiques Industrielles. - 1992.
29. Tove F. A. // Rev. Sci. Instr. - 1956. - Vol. 27. - P. 143.
30. Fazzini T., Bizzeti P. G., Maurenzig P. R. et al. // Nucl. Instr. Meth. A - 1998. - Vol. 410. - P. 213.
31. Birks J. B. Theory and Practice of Scintillation Counting - Pergamon, London, 1964.
32. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. GEANT4 Collaboration // Nucl. Instr. Meth. A - 2003. - Vol. 506. - P. 250; <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>.

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО КРИСТАЛЛА ВОЛЬФРАМАТА КАДМИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПОИСКУ 2β -РАСПАДА ЯДРА ^{116}Cd

И. И. Веретянный, Ф. А. Даневич, Ю. Г. Здесенко, В. В. Кобычев,
С. С. Нагорный, Д. В. Пода

Показано, что улучшение энергетического разрешения сцинтилляционного спектрометра с кристаллами $^{116}\text{CdWO}_4$ с 8 до 4 % (FWHM, на энергии 2β -распада ^{116}Cd – 2,8 МэВ) позволит в три – четыре раза уменьшить фон детектора. Это будет одним из важнейших факторов улучшения чувствительности нового эксперимента, который планируется в Солотвинской подземной лаборатории, до уровня $T_{1/2} \approx 10^{25}$ лет для $0\nu 2\beta$ -распада ^{116}Cd , что соответствует величине массы нейтрино $m_\nu \approx 0,2$ эВ. С кристаллом CdWO_4 ($\varnothing 40 \times 30$ мм), помещенным в световод, получено увеличение амплитуды сигналов на 22 %. Такое возрастание световыхода сцинтилляционного детектора при использовании световода получено впервые. Оценено, что при условии использования двух световодов и “off-line” коррекции неоднородности светосбора на энергии 2,8 МэВ можно получить разрешение 3,7 %.

CdWO₄ SCINTILLATION DETECTOR OPTIMIZATION FOR THE 2β EXPERIMENT WITH ^{116}Cd

I. I. Veretyannikov, F. A. Danevich, Yu. G. Zdesenko, V. V. Kobychyev,
S. S. Nagorny, D. V. Poda

Improvement of the energy resolution of $^{116}\text{CdWO}_4$ scintillation spectrometer from 8% to 4% (FWHM, at the energy of ^{116}Cd 2β -decay – 2,8 MeV) can reduce background by a factor of 3 - 4 times. It allows to improve sensitivity of the new experiment, which is developing in the Solotvina Underground Laboratory, up to the level of $T_{1/2} \approx 10^{25}$ years for $0\nu 2\beta$ -decay of ^{116}Cd , which corresponds to the neutrino mass $m_\nu \approx 0,2$ eV. With the CdWO_4 crystal ($\varnothing 40 \times 30$ mm) located in a light guide, 22 % increase of light collection was obtained. Such an improvement of light collection for a scintillation detector with light guide is reached for the first time. The energy resolution of 3,7 % (at energy 2,8 MeV) can be obtained using two light guides and off-line correction of light collection nonuniformity.

Надійшла до редакції 19.04.04,
після доопрацювання – 19.07.04.