

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИОНИЗАЦИОННЫХ ВЫХОДОВ ЯДЕР ОТДАЧИ В ЖИДКОМ АРГОНЕ МЕТОДОМ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ДВУХФАЗНОМ ДЕТЕКТОРЕ

*А. Е. Бондарь^{1,2}, А. Ф. Бузулуцков^{1,2}, Е. С. Гришняев¹,
А. Д. Долгов², В. В. Носов^{1,2}, В. П. Олейников^{1,2,*},
С. В. Полосаткин^{1,3}, А. В. Соколов^{1,2},
Е. О. Шемякина^{1,2}, Л. И. Шехтман^{1,2}*

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Измерение ионизационных выходов ядер отдачи имеет отношение к энергетической калибровке детекторов темной материи и низкоэнергетических нейтрино. В настоящей работе обсуждаются некоторые результаты предыдущих измерений ионизационных выходов ядер отдачи в жидком аргоне методом рассеяния нейтронов в двухфазном детекторе. Предлагаются методы по повышению светосбора сцинтилляционного (S_1) и ионизационного (S_2) сигналов в двухфазном детекторе путем использования SiPM-матриц и электродов THGEM с повышенной оптической прозрачностью. Данные шаги необходимы для реализации метода двойного рассеяния нейтронов, который позволит измерить ионизационный выход ядер отдачи в ранее не изученном диапазоне энергий.

Measurement of the ionization yields of nuclear recoils is related to the energy calibration of dark matter detectors and low-energy neutrinos. In the present work, some results of the previous measurements of the ionization yields of nuclear recoils in liquid argon using neutron scattering technique in a two-phase detector are discussed. Methods to increase light collection of scintillation (S_1) and ionization (S_2) signals in a two-phase detector using SiPM matrices and THGEM electrodes with increased optical transparency are proposed. These steps are necessary to realize the neutron double-scattering technique, which will allow us to measure the ionization yields of nuclear recoils in the unexplored energy range.

PACS: 95.35.+d; 72.10.-d; 29.40.-n; 95.55.Vj

*E-mail: V.P.Oleynikov@inp.nsk.su

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая калибровка детекторов ядер отдачи в жидком Ar и Xe имеет важное значение для низкофоновых экспериментов по прямому поиску темной материи и регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах [1]. Такая калибровка обычно осуществляется путем измерения ионизационных выходов и сцинтилляционных эффективностей ядер отдачи при упругом рассеянии нейтронов на ядрах. В то время как для жидкого Xe существует множество экспериментальных данных по ионизационным выходам [2–4], мало что известно об ионизационных выходах в жидком Ar.

Ионизационный выход, измеряемый в эксперименте, определяется следующим образом:

$$Q_y = n_e / E_0. \quad (1)$$

Здесь n_e — заряд первичной ионизации, т. е. число электронов ионизации, избежавших рекомбинации с положительными ионами; этот заряд зависит от энергии, выделенной ядром отдачи в жидкости (E_0), и от электрического поля в жидкости (\mathcal{E}). n_e всегда меньше, чем начальное число электрон-ионных пар, образованных в жидкости ядром отдачи (N_i). В двухфазном детекторе можно выделить две части сигнала: S_1 , вызванный сцинтилляциями в жидкости, и S_2 , вызванный ионизацией в жидкой фазе и последующей электролюминесценцией (ЭЛ) в газовой фазе.

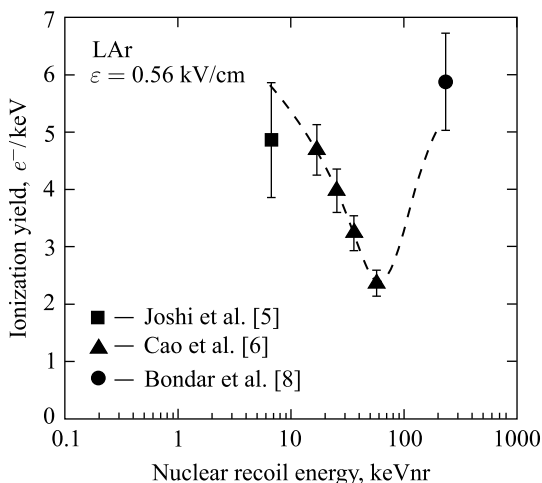


Рис. 1. Ионизационные выходы ядер отдачи в жидком Ar как функции энергии, измеренные в [5], [6] и [8] и экстраполированные к значению электрического поля 0,56 кВ/см. Кривая отображает предполагаемую энергетическую зависимость

Выражение (1) справедливо для как электронов отдачи, вызванных облучением вещества электронами или гамма-квантами, так и для ядер отдачи. Принято обозначать соответствующую энергию отдачи в единицах keV_{ec} (electron-equivalent recoil) и keV_{nr} (nuclear recoil).

Первые результаты по ионизационным выходам ядер отдачи в жидком Ar были получены буквально за последние три года: при более низких энергиях 6,7 кэВ [5] и 17–57 кэВ [6], а при более высоких энергиях 80 и 233 кэВ [7], 233 кэВ [8]. В работе [8] сравниваются результаты этих экспериментов, приведенные к определенному значению электрического поля (рис. 1, взят из [8]).

Видно, что ионизационный выход может зависеть от энергии нетривиальным образом: при увеличении энергии ионизационный выход сначала уменьшается, а затем возрастает, проходя через минимум. Стоит отметить, что подобная энергетическая зависимость ранее наблюдалась для электронов отдачи в жидком Ar [9]. С другой стороны, энергетическая зависимость для ядер отдачи в жидком Xe является монотонной в диапазоне от 1 до 300 keV_{nr} [10].

Чтобы решить вопрос о характере зависимости ионизационных выходов ядер отдачи от энергии, в настоящей работе предлагаются способы повышения светосбора сигналов S_1 и S_2 для реализации метода двойного рассеяния нейтронов [11], который мог бы позволить измерить ионизационные выходы для ядер отдачи с энергией ниже 233 кэВ.

ИЗУЧЕНИЕ СИГНАЛА S_1

Для измерения ионизационного выхода в жидком аргоне ранее [7, 8] использовался метод вычитания спектров, чтобы отделить события с упругим рассеянием нейтрона от радиационного захвата нейтрона (с испусканием гамма-кванта). Другая возможность заключается в использовании соотношения между сигналами S_1 и S_2 или соотношения между быстрой и медленной компонентами сигнала S_1 . Наличие такого критерия позволит производить идентификацию типа события, что является необходимым условием для реализации измерения ионизационных выходов ядер отдачи методом двойного рассеяния нейтронов.

Для изучения сигнала S_1 использовалась установка с двухфазным детектором, описанная в [8]. На рис. 2 представлена осциллограмма сигнала от суммы четырех ФЭУ при облучении детектора нейтронами. Напряжение на ФЭУ 800 В, напряжение на делителе ЭЛ зазора $V_0 = 14$ кВ. На первом канале осциллографа сигнал проходил через усилитель с временем формирования 1 мкс, на третьем — с 200 нс. В качестве триггера использовался сигнал S_2 на первом канале. На третьем канале в центре осциллограммы виден короткий сигнал, который, очевидно, соответствует сигналу S_1 . Через время 15 мкс, соответствующее времени дрейфа ионизации через жидкость, расположен сигнал S_2 .

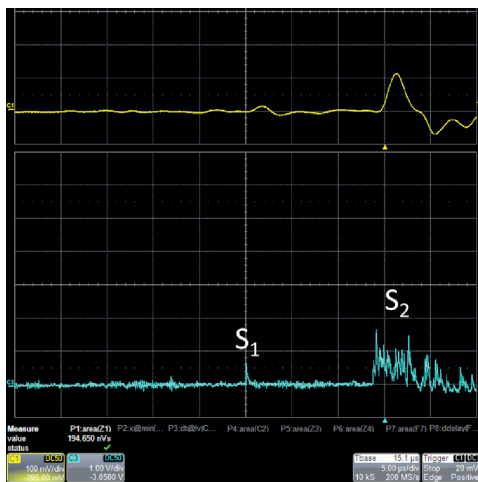


Рис. 2. Осциллограмма сигнала от суммы четырех ФЭУ при облучении детектора нейтронами. Показанные первый (C1) и третий (C3) каналы осциллографа отличаются временем формирования усилителя

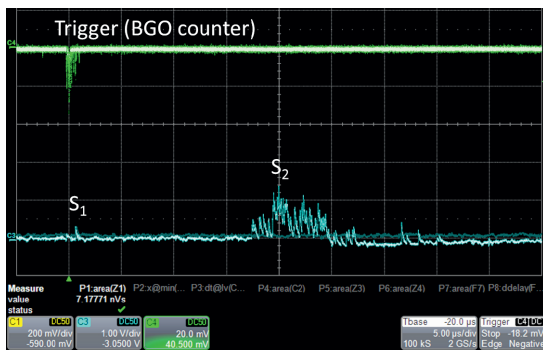


Рис. 3. Осциллограммы сигналов при облучении детектора источником ^{22}Na . Четвертый канал (C4) — сигнал с BGO-счетчика. Третий канал (C3) — сигнал от суммы четырех ФЭУ

Чтобы корректно выделить сигналы S_1 , был проведен другой эксперимент с источником ^{22}Na . Данный источник излучает позитрон, который при аннигиляции порождает два коллинеарных гамма-кванта с энергией 511 кэВ. Один из них попадает в счетчик со сцинтилятором BGO, который дает триггерный сигнал, а другой попадает в детектор (рис. 3).

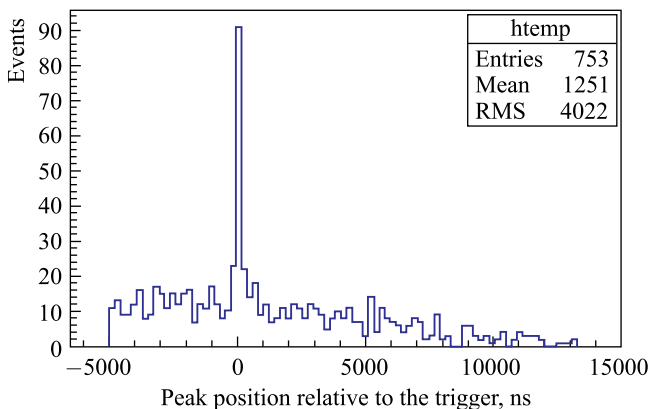


Рис. 4. Положение вероятных сигналов S_1 относительно триггера

На рис. 4 представлена гистограмма положения сигналов S_1 относительно времени триггера. Как можно заметить, в районе нуля есть пик. Значит, это действительно сигналы S_1 .

Анализ амплитудного спектра событий, находящихся в районе пика, показал, что амплитуда сигнала S_1 составляет от 1 до 3 фотоэлектронов. Такой амплитуды будет недостаточно для корректного использования критериев разделения нейтронов и гамма-квантов. Единственный выход заключается в модернизации установки и увеличении светосбора сигнала S_1 .

ПОВЫШЕНИЕ СВЕТОСБОРА СИГНАЛА S_1

Наиболее эффективный метод увеличения светосбора сигнала S_1 заключается в расположении матрицы фотоприемников, в частности SiPM-матрицы, как сверху ЭЛ-зазора, так и на дне детектора. Для покрытия активной обла-

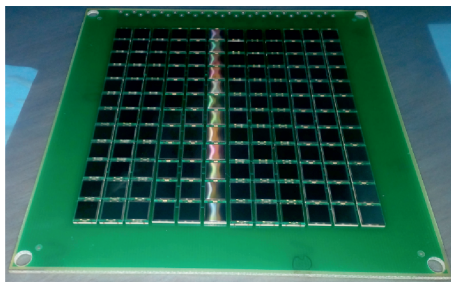


Рис. 5. Матрица размером 12×12 элементов, составленная из SiPM S13360-6050PE

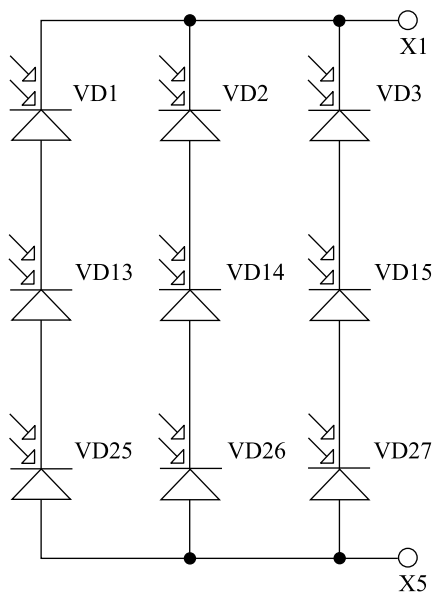


Рис. 6. Электрическая схема соединения элементов матрицы

сти 10×10 см можно использовать матрицу размером 12×12 элементов, составленную из кремниевых фотоумножителей SiPM S13360-6050PE. Одна из проблем заключается в большом количестве используемых каналов SiPM. Для решения проблемы каждые 9 элементов матрицы будут объединяться в один канал при помощи параллельно-последовательного подключения (рис. 5 и 6).

Была проведена серия тестов с последовательным и параллельным подключением двух SiPM S13360-6050PE, погруженных в жидкий азот. Наблюдалась стабильная работа в обоих случаях. Подробное описание изменения характеристик сигнала в зависимости от типа подключения будет приведено в следующих статьях.

ТНГЕМ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

На сегодняшний день в установке расположены два толстых газовых электронных умножителя, ТНГЕМ0 и ТНГЕМ1, которые используются в качестве электродов ЭЛ-зазора. Геометрическая прозрачность обоих ТНГЕМ составляет 27%. Для увеличения светосбора сигнала S_2 , регистрируемого из ЭЛ-зазора с помощью верхней SiPM-матрицы, планируется заменить ТНГЕМ1 на аналогичный, но с большим диаметром отверстий. Кроме того,

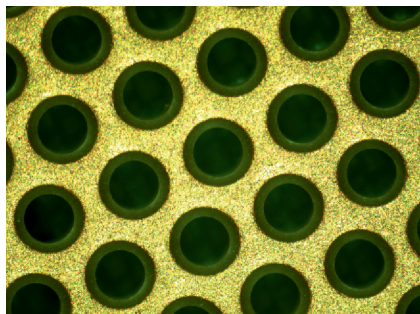


Рис. 7. THGEM с прозрачностью 27%

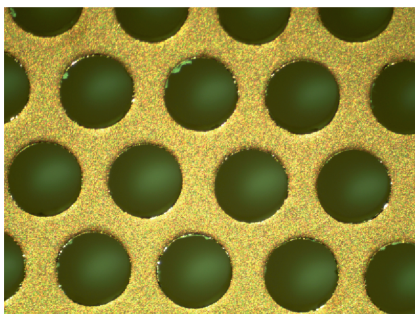


Рис. 8. THGEM с прозрачностью 48%

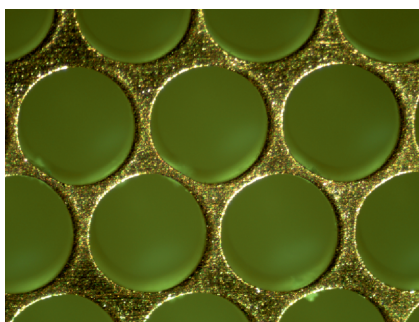


Рис. 9. THGEM с прозрачностью 75 %

замена THGEM0 и THGEM1 на более прозрачные позволит повысить светосбор и для сигнала S_1 на верхнюю матрицу.

Для этих целей были изготовлены THGEM четырех разных типов: с толщиной 0,5 мм или 1 мм; с прозрачностью 48 или 75 % (рис. 7, 8, 9). В дальнейшем будут проведены испытания и выбран THGEM, обладающий оптимальным соотношением между прозрачностью и механической прочностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены некоторые результаты предыдущих измерений ионизационных выходов ядер отдачи в жидком аргоне методом рассеяния нейтронов в двухфазном детекторе. Продемонстрировано, что в двухфазном детекторе, использованном нами ранее для измерения ионизационных выходов в жидком аргоне [8] путем регистрации электролюминесцентного сигнала (S_2), можно регистрировать и сигнал первичной сцинтилляции (S_1). Его амплитуда, од-

нако, оказалась недостаточной для эффективного отделения событий с ядрами отдачи от гамма-фона. Были предложены методы по повышению светосбора сигналов S_1 и S_2 с использованием SiPM-матриц и THGEM-электродов с повышенной оптической прозрачностью. Данные шаги необходимы для реализации метода двойного рассеяния нейтронов, который позволит измерить ионизационные выходы ядер отдачи при энергиях ниже 233 кэВ. Измерение ионизационных выходов в широком диапазоне значений энергии имеет важное значение для энергетической калибровки детекторов на основе жидких благородных газов, используемых для поиска темной материи, и для понимания механизмов регистрации ионизации в жидком Ar.

Благодарности. Работа поддержана Российским научным фондом (проект 14-50-00080); она выполнена в рамках исследовательской программы для эксперимента DarkSide-20k.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chepel V., Araujo H.* Liquid Noble Gas Detectors for Low Energy Particle Physics // *J. Instr.* 2013. V. 8. P. R04001.
2. *Manzur A., Curioni A., Kastens L., McKinsey D.N., Ni K., Wongjirad T.* Scintillation Efficiency and Ionization Yield of Liquid Xenon for Monoenergetic Nuclear Recoils Down to 4 keV // *Phys. Rev. C.* 2010. V. 81. P. 025808.
3. *Horn M., Belov V.A., Akimov D. Yu., Araújo H.M., Barnes E.J., Burenkov A.A., Chepel V., Currie A., Edwards B., Ghag C., Hollingsworth A., Kalmus G.E., Kobayakin A.S., Kovalenko A.G., Lebedenko V.N.* Nuclear Recoil Scintillation and Ionisation Yields in Liquid Xenon from ZEPLIN-III Data // *Phys. Lett. B.* 2011. V. 705. P. 471.
4. *Plante G., Aprile E., Budnik R., Choi B., Giboni K.-L., Goetzke L.W., Lang R.F., Lim K.E., Melgarejo Fernandez A.J.* New Measurement of the Scintillation Efficiency of Low-Energy Nuclear Recoils in Liquid Xenon // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 84. P. 045805.
5. *Joshi T. H., Sangiorgio S., Bernstein A., Foxe M., Hagmann C., Jovanovic I., Kazkaz K., Mozin V., Norman E.B., Pereverzev S.V., Rebassoo F., Sorensen P.* First Measurement of the Ionization Yield of Nuclear Recoils in Liquid Argon // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 112. P. 171303.
6. *Cao H. et al. (the SCENE Collab.).* Measurement of Scintillation and Ionization Yield and Scintillation Pulse Shape from Nuclear Recoils in Liquid Argon // *Phys. Rev. D.* 2015. V. 91. P. 092007.
7. *Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Grishnyaev E., Polosatkin S., Shekhtman L., Shemyakina E., Sokolov A.* Measurement of the Ionization Yield of Nuclear Recoils in Liquid Argon at 80 and 233 keV // *Europhys. Lett.* 2014. V. 108. P. 12001.
8. *Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Grishnyaev E., Nosov V., Oleynikov V., Polosatkin S., Shekhtman L., Shemyakina E., Sokolov A.* Measurement of the Ionization

Yield of Nuclear Recoils in Liquid Argon Using a Two-Phase Detector with Electroluminescence Gap // *J. Instr.* 2017. V. 12. P. C05010.

9. Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Shekhtman L., Sokolov A. X-Ray Ionization Yields and Energy Spectra in Liquid Argon // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 816. P. 119.
10. Lenardo B., Kazkaz K., Manalaysay A., Szydagis M., Tripathi M. A Global Analysis of Light and Charge Yields in Liquid Xenon // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2015. V. 62, No. 6. P. 3387.
11. Akerib D. S. *et al.* (*LUX Collab.*). Low-Energy (0.7–74 keV) Nuclear Recoil Calibration of the LUX Dark Matter Experiment Using D-D Neutron Scattering Kinematics. arXiv:1608.05381v2.