

УДК 681.2.084, 544.08

*Н. С. Румянцева, К. Н. Гусев***Применение современных конструкционных материалов, методик и детекторов для низкофоновых экспериментов**

Яркими примерами ключевых задач современной неускорительной физики являются поиск темной материи и двойного безнейтринного бета-распада. И одним из принципиальных требований, предъявляемых к экспериментальным установкам в обоих случаях, будет требование минимального уровня радиоактивного фона. Пути его снижения достаточно очевидны и широко применяются в актуальных экспериментах. Так, установки располагаются в подземных лабораториях, проводится тщательный отбор конструкционных материалов, а также используются различные методики активного подавления фона. Однако продвижение вперед в проектах нового поколения, помимо серьезного увеличения массы детекторов, требует заметного уменьшения и без того низкого уровня естественного радиоактивного фона. И одними из неустраняемых его источников являются именно конструкционные материалы, окружающие детектор (детекторы). В связи с этим крайне важно не только постоянно проводить поиск и отбор новых, все более низкофоновых, материалов, но и обеспечивать невнесение радиоактивных загрязнений на этапе их обработки и производства требуемых деталей. В предлагаемой статье описаны результаты успешного использования на этапе подготовки ультранизкофонового эксперимента нового поколения по поиску двойного безнейтринного бета-распада деталей, изготовленных современными методами из низкофоновых материалов.

Ключевые слова: двойной безнейтринный бета-распад, низкофоновые эксперименты, конструкционные материалы, новые методики производства, германиевые детекторы

Об авторах

Румянцева Надежда Сергеевна – старший преподаватель кафедры нанотехнологий и новых материалов государственного университета «Дубна», младший научный сотрудник Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований. *E-mail:* rumyantseva.nads@gmail.com. Московская обл., г. Дубна, ул. Вернова, д. 9, кв. 90.

Гусев Константин Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Современная физическая наука, как фундаментальная, так и прикладная, охватывает широкий спектр принципиальных проблем, решение которых позволит значительно продвинуться в понимании окружающего мира. Одной из главных целей, которые ставят перед собой современные ученые, является, несомненно, желание построить относительно простую теорию, которая будет максимально точно описывать всё существующее многообразие элементарных частиц и их взаимодействий. Наиболее яркими примерами того, что мы находимся на верном пути, могут служить открытие бозона Хиггса, обнаружение гравитационных волн и экспериментальное подтверждение существования нейтринных осцилляций.

На фоне поистине удивительных достижений науки в последние годы вполне осуще-

ствимыми представляются эксперименты нового поколения, призванные пролить свет на проблемы, не решенные до сих пор. Примерами таких проектов могут служить поиск темной материи и двойного безнейтринного бета ($0\nu\beta\beta$) распада. Несмотря на некоторые различия в постановке, можно выделить несколько общих черт подобных экспериментов:

- значительная (≥ 100 кг) масса детектора (детекторов);
- низкий уровень фона установки, что, в свою очередь, предполагает:
 - проведение экспериментов в подземных лабораториях;
 - тщательный отбор конструкционных материалов;
 - разработка методик изготовления необходимых деталей, предусматривающая невнесение загрязнений на этапе производства;

- наличие активной и пассивной систем защиты от фонового излучения;
- использование современных методов оффлайн подавления фона, таких как отбор полезных событий по форме сигнала детектора.

Важной особенностью экспериментов нового поколения является их многозадачность. По-видимому, ушли в прошлое те времена, когда исследовательская установка создавалась для решения одной, пусть и принципиальной, проблемы. Новые проекты либо предполагают возможность изучения нескольких процессов одновременно, либо позволяют использовать создаваемый прибор в прикладных целях. Так, например, в экспериментах, направленных на изучение процессов $0\nu\beta\beta$ распада, низкий энергетический порог регистрации излучения не играет решающей роли, однако, если реализовать подобную возможность, то такой детектор будет являться вполне подходящим прибором и для поиска темной материи. Таким образом, опыт успешного применения новых низкофоновых материалов в одном из крупномасштабных экспериментов может быть востребован и в других проектах. То же самое можно сказать и о незагрязняющих методиках изготовления необходимых деталей для упаковки детектора (детекторов).

Материалы и методики, описанные в данной работе, были опробованы в процессе подготовки крупномасштабного ультранизкофоновое эксперимента по поиску двойного безнейтринного бета-распада *LEGEND* [2]. В этом проекте будут использоваться германиевые детекторы различных типов, изготовленные из материала, обогащенного изотопом *Ge-76*, т.е. детектор будет являться одновременно источником искомых событий. Одним из преимуществ, выделяющих данную установку из ряда конкурентов, является рекордно высокое энергетическое разрешение детектирующей системы. Коллаборация *LEGEND* была создана для проведения германиевого эксперимента в тонном масштабе с целью достижения ультимативной чувствительности по периоду полураспада более 10^{28} лет. Рассчитывать на полноценную реализацию нового проекта позволяют успешные результаты его

предшественников, а именно завершающих на сегодняшний день набор данных проектов *Majorana* [1] и *GERDA* [3], в одном из которых (*Majorana*) удалось добиться рекордного энергетического разрешения, а в другом (*GERDA*) – беспрецедентного уровня радиоактивного фона и впервые в мире достичь чувствительности по периоду полураспада *Ge-76* более 10^{26} лет. Усилия коллаборации *LEGEND* направлены на осуществление поэтапной экспериментальной программы по поиску $0\nu\beta\beta$ -распада, начиная с измерения 200 кг обогащенного изотопа *Ge-76* с использованием существующего криостата *GERDA*.

Полупроводниковые детекторы в эксперименте *LEGEND*

Подбор типов детекторов для нового проекта обусловлен несколькими факторами, и самым очевидным из них является максимально возможная масса отдельного детектора, т.к. её увеличение приводит к уменьшению общего числа каналов эксперимента, т.е. к снижению общей массы конструкционных материалов, подводящих кабелей и каналов спектрометрической электроники, а значит и потенциальных источников радиоактивного фона. Другой важной особенностью идеального детектора для ультранизкофоновое эксперимента является малая чувствительность к источникам загрязнения, в частности α - и β -эмиттерам, которые неизбежно привносятся на этапе производства и различных манипуляций. Поэтому в германиевых проектах применяются детекторы, изготовленные из материала *p*-типа (рис. 1). У них практически вся внешняя поверхность, являющаяся n^+ контактом, изготовлена посредством диффузии лития, а значит обладает заметной толщиной >1 мм, что делает их, по сравнению с детекторами из германия *n*-типа, принципиально менее чувствительными к α -частицам и β -частицам низких энергий. Наконец, в эксперименте *LEGEND* будут использоваться все детекторы, которые применяются сейчас в проектах *Majorana* и *GERDA*, т.к. их переделка в более современный тип, о котором будет вкратце написано ниже, экономически нецелесообразна и, даже при наличии финансов, приведет к потере заметного количества обогащенного материала (вплоть до 50%).

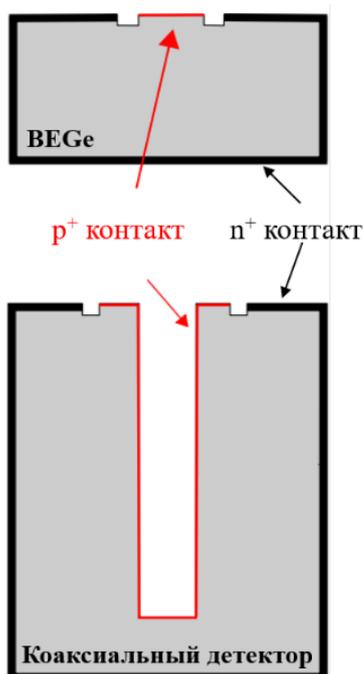


Рис. 1. Германиевые детекторы: типа *BEGe* (вверху) и коаксиального типа (внизу)

Существует достаточно много различных типов германиевых детекторов, и одни из самых распространенных – это коаксиальные детекторы [8], современные образцы которых (благодаря постоянному улучшению методик изготовления германия высокой чистоты) могут иметь массу в 3 кг и более, что является одним из критериев успеха в поиске $0\nu\beta\beta$ -распада, но при этом их энергетическое разрешение и эффективность отбора по форме импульса (*Pulse Shape Discrimination – PSD* [6]) хуже, чем у *BEGe*-детекторов [4]. Кроме того, их недостатком является значительная площадь имплантированного p^+ контакта, что увеличивает их чувствительность к α -частицам. *BEGe*-детекторы имеют сравнительно низкую массу (около 0,7 кг), однако возможность применения эффективного метода *PSD* и великолепное энергетическое разрешение (за счет меньшей емкости) делает такой детектор наиболее подходящим для поиска $0\nu\beta\beta$ -распада. Так, в эксперименте *GERDA* используются детекторы обоих типов. В эксперименте *Majorana* используются детекторы с точечным контактом другого типа, так называемые *PPC* [5] (рис. 2).



Рис. 2. Германиевый детектор типа *PPC*

Диаметр p^+ контакта таких детекторов меньше, чем у *BEGe*-детекторов, вследствие чего они имеют еще меньшую емкость, что позволяет использовать их в задачах, требующих максимального снижения энергетического порога регистрации ионизирующего излучения. К недостаткам *PPC*-детекторов можно отнести небольшую массу, сходную с *BEGe*. Кроме того, в силу особенностей технологии изготовления вся горизонтальная поверхность детектора на стороне точечного p^+ контакта прозрачна для α -частиц, т.к. покрыта лишь тонким пассивационным слоем. Сравнительно недавно был предложен новый тип детектора из обособленного германия, так называемый инвертированный коаксиальный [7]. В разрезе он выглядит так, как на рис. 3, что очень похоже на обычный коаксиальный детектор, но принципиально от него отличается. Так, имплантированный p^+ контакт сделан на противоположной цилиндрическому отверстию стороне и имеет малый диаметр (близкий к диаметру контакта *BEGe*). На всей остальной поверхности сделана диффузия лития, т.е. n^+ контакт. За счет такой геометрии данный тип детектора соединяет в себе достоинства детекторов с точечным контактом, а именно применимость эффективного метода *PSD* и малую емкость (и, как следствие, хорошее энергетическое разрешение) с возможностью изготовления детекторов массой 2 кг и более, а также малой площадью поверхности, чувствительной к α -частицам и β -излучению низких энергий.

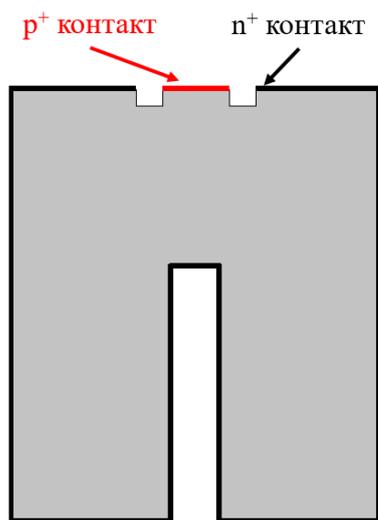


Рис. 3. Инвертированный коаксиальный детектор

Новые конструкционные материалы и методики

Как уже было упомянуто, как минимум первая фаза нового эксперимента *LEGEND* будет использовать методику, успешно апробированную в проекте *GERDA*, т.е. открытые германиевые детекторы будут непосредственно погружены в жидкий аргон, который не только охладит их до необходимой температуры, но и будет служить активной защитой от внешнего излучения (установка будет оборудована системой регистрации сцинтилляций в аргоне). На каждую из гирлянд детекторов будет надет кожух, выполненный из нейлона со спектросмещающим покрытием для дополнительного подавления фонового излучения вблизи детекторов. Криостат *GERDA* находится в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине 3500 метров водного эквивалента и в ближайшее время будет модифицирован для обеспечения возможности погружения в него 200 кг германиевых детекторов. Метод дискриминации по форме импульса, разработанный для германиевых детекторов в проектах *GERDA* и *Majorana*, даст заметный вклад в улучшение фонового индекса нового эксперимента. Однако для повышения чувствительности *LEGEND* необходимо дополнительное уменьшение фона, которое может быть достигнуто путем использования более низкофоновых конструкционных материалов, окружающих детекторы. Таким образом, по-

иск альтернативных материалов, которые могут быть применены в эксперименте нового поколения *LEGEND*, является важной задачей. Так, например, в установке *GERDA* в оправках для детекторов используется тефлон (*PTFE*), стабильный при низких температурах и имеющий низкое содержание радиоактивных изотопов. К сожалению, оно заметно меняется от производителя к производителю. Так, сравнивая материалы, использовавшиеся в первой и второй фазах проекта *GERDA*, можно обнаружить, что радиационная чистота *PTFE* по урану и тории в фазе II ухудшилась в два раза, однако изменение конструкции оправок детекторов позволило заметно уменьшить массу необходимого материала, что привело к снижению общей радиоактивности тефлона в эксперименте в 3 раза (см. таблицу 8 в [3]).

Одним из альтернативных материалов для изготовления необходимых деталей является нейлон. Выбор данного материала является неслучайным, поскольку в эксперименте *GERDA* (и, вероятнее всего в первой фазе *LEGEND*) кожухи, окружающие гирлянды из детекторов, выполнены из нейлона. Таким образом, нейлон достаточно хорошо изучен: он стабилен при криогенных температурах и низкорadioактивен ($\sim 15 \cdot 10^{-12}$ г/г по тории и $10 \cdot 10^{-12}$ г/г по урану [9]). Эти величины сравнимы с *PTFE*, который использовался в *GERDA*. Однако очень важно, что его удельная плотность в два раза меньше плотности *PTFE* (1,1 и 2,2 г/см³ соответственно), а значит общая масса материала – потенциального источника фона вблизи детекторов также снизится в два раза, что приведет к снижению общей радиоактивности.

Еще одним перспективным кандидатом на роль конструкционного материала для низкофоновых экспериментов является *Ultem*®. Он также обладает низкой удельной плотностью (1,3 г/см³) и прекрасной температурной устойчивостью. Кроме того, это один из самых прочных из существующих пластиков. Результаты измерений *Ultem* методом ИСП-МС (индуктивно-связанная плазменная масс-спектрометрия) проведены, но пока не опубликованы, однако можно отметить, что и он имеет схожую с нейлоном радиационную чистоту.

Важным преимуществом обоих предлагаемых материалов по сравнению с тефлоном является возможность избежать механической обработки изготавливаемых деталей за счет применения технологий 3D печати. Это позволяет предотвратить потенциальное дополнительное загрязнение элементов в процессе производства, заметно сократить его длительность, а также уменьшить количество этапов при финальной очистке деталей перед монтажом детекторов. Современный 3D принтер – это достаточно компактное устройство, которое можно разместить в «чистой комнате», соблюдая все требования, которые применяются при «чистых» работах, в том числе, что немаловажно, обеспечив контроль доступа к нему. Если при этом использовать такой принтер исключительно для изготовления деталей, необходимых в данном эксперименте, то возможность внесения загрязнений на этапе производства сводится к минимуму.

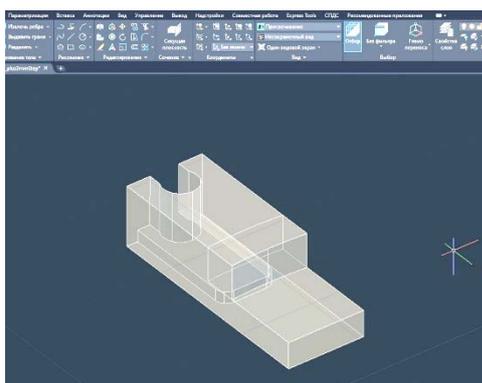


Рис. 4. 3D модель элемента оправки детектора

Для проведения совместных тестовых измерений низкофоновой спектрометрической электроники с детекторами различных типов из натурального (необогатенного) германия в рамках подготовки к эксперименту *LEGEND* были созданы 3D модели необходимых деталей детекторных оправок (рис. 4). Затем они были напечатаны:

- из нейлона – на имеющемся в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ 3D принтере (рис. 5, сверху);
- из *Ultem* – в производственной компании (г. Москва) на специализированном промышленном 3D принтере, так как высокая температура плавления данного материала не позволяет работать с ним на обычном принтере (рис. 5, снизу).



Рис. 5. Детали оправки, выполненные из нейлона (сверху) и из *Ultem*© (снизу)

Изготовленные таким образом элементы оправок детекторов были успешно применены в интеграционных тестах, проводившихся в специальном криостате с жидким аргоном в подземной лаборатории Мюнхенского технического университета (Германия). На фото (рис. 6) показана гирлянда из двух детекторов типа *BEGe*, упакованных в оправки, в которых использовались детали из нейлона, перед погружением в аргон. В следующей серии тестов были также применены элементы из *Ultem*. Таким образом, оба конструкционных материала и методика изготовления посредством 3D печати были успешно апробированы в условиях, максимально приближенных к условиям проекта *LEGEND*, и могут быть использованы в полномасштабном эксперименте.

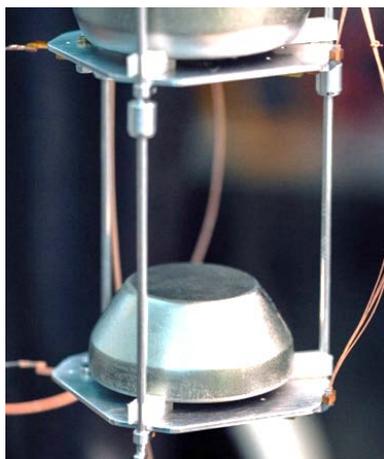


Рис 6. Применение деталей оправки, выполненных из нейлона на 3D принтере

Следующим шагом было тестирование гирлянды, состоящей из *BEGe*- и *PPC*-детекторов. Здесь необходимо отметить, что контакты к детекторам осуществляются посредством ультразвуковой сварки алюминиевой проволокой диаметром 20 мкм. Это позволяет обеспечить хорошие электрические контакты при минимальном количестве использованного материала. Данная методика с успехом применяется в эксперименте *GERDA* и планируется к использованию в *LEGEND*. Три из четырех вышеописанных типов детекторов, а именно коаксиальные, *BEGe* и инвертированные коаксиальные, работали в проекте *GERDA* на финальном этапе, после проведения последней модификации в 2018 году. Таким образом, был накоплен достаточно большой опыт приваривания контактов к детекторам этих типов с помощью ультразвука и доказано, что эта методика не приводит к ухудшению их эксплуатационных характеристик, в частности, к возникновению токов утечки.

Однако *PPC*-детекторы использовались ранее только в эксперименте *Majorana*, где они упаковывались в вакуумные криостаты с контактами классического (пружинного) типа. Поэтому одной из задач нашего тестирования была проверка применимости методики ультразвуковой сварки и с данными детекторами. Для этого было необходимо изготовить специальный держатель для детектора, который позволяет проводить с ним различные манипуляции, такие как сварка контактов, транспортировка и монтаж в гирлянду. Элементы подобных держателей в *GERDA* производились стандартным способом из нержавеющей стали. Применить их в данном тестировании

не представлялось возможным. Дело в том, что большая часть планирующихся к использованию в *LEGEND* обогащенных *PPC*-детекторов имеет меньший, по сравнению с большинством имеющихся *BEGe*-детекторов, диаметр. В связи с этим было предложено уменьшить размер опорной платы детекторов (рис. 7), что, в свою очередь, позволит уменьшить диаметр нейлоновых кожухов для гирлянд таких детекторов, а значит и количество аргона внутри этих кожухов в непосредственной близости от детекторов.

Необходимые элементы держателей уменьшенного диаметра были в кратчайшие сроки изготовлены с помощью 3D печати в ЛЯП ОИЯИ (рис. 8). Это позволило осуществить первую ультразвуковую сварку контактов к *PPC*-детектору, а также собрать и опустить в жидкий аргон первую гирлянду из *BEGe*- и *PPC*-детекторов. Оба детектора имели низкие токи утечки и успешно работали в аргоне в течение длительного времени (более месяца). Таким образом, доказано, что низкофоновая методика ультразвуковой сварки контактов может быть применена и в случае *PPC*-детекторов.



Рис. 7. Опорная плата для детектора, выполненная из *Ultem*



Рис. 8. Элемент держателя для детектора, выполненный из нейлона посредством 3D печати

Заключение

Для достижения принципиально новых результатов в экспериментах по поиску двойного безнейтринного бета-распада следующего поколения крайне важно обеспечить набор данных в практически «бесфоновой» моде. Таким образом, одной из главных задач является снижение радиоактивного фона, чего, в частности, можно добиться за счет применения новых, более низкофоновых, конструктивных материалов для изготовления деталей оправок детекторов, используемых в эксперименте, а также современных методик их производства. В предлагаемой работе описаны результаты исследования двух новых низкофоновых материалов: нейлон и *Ultem*. Из них посредством современной методики 3D печати были изготовлены элементы оправок и держателей германиевых детекторов различных типов. Проведенное тестирование показало, что изученные материалы полностью соответствуют требованиям низкофоновых экспериментов нового поколения, а технологии 3D печати могут с успехом использовать-

ся вместо стандартных технологий производства.

Данные исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00213-мол_а.

Библиографический список

1. Aalseth C.E. *et al.* Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 132502.
2. Abgrall N. *et al.* arXiv:1709.01980.
3. Agostini M. *et al.* Eur. Phys. J. C. 2018. V. 78. P. 388.
4. Agostini M. *et al.* Eur. Phys. J. C. 2019. V. 79. P. 978.
5. Barbeau P.S., Collar J.I., Tench O. JCAP. 2007. V.09, 009.
6. Budjáš D. *et al.* JINST. 2009. V. 4. P. 10007.
7. Domula A. *et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 2018. V. 891. P. 106–110.
8. Marler J.M., Hewka P.V. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1974. V. 21. P. 287–295.
9. Vacri M. L. *et al.* AIP Conference Proceedings. 2015. V. 1672. P. 150001.

Поступила в редакцию
28.08.2020