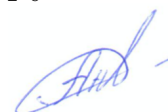


ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

На правах рукописи



Анфимов Николай Владимирович

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТОДЕТЕКТОРОВ

Специальность 01.04.01 —
«Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2020

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, профессор
Ольшевский Александр Григорьевич

Официальные оппоненты — **Строковский Евгений Афанасьевич**,
доктор физико-математических наук, ст.научный
сотрудник,
ОИЯИ, ЛФВЭ, Отделение №2 Физики на ускорительном комплексе Нуклотрон-НИСА,
начальник отделения

Чепурнов Александр Сергеевич,
кандидат физико-математических наук,
ст.научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (сокращенное название: НИИЯФ МГУ), Отдел Электромагнитных Процессов и Взаимодействий в Атомных Ядрах (ОЭПВАЯ),
старший научный сотрудник

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу:
<https://dissertations.jinr.ru/ru/Councils/NuclearPhysicsCouncil/dissertations>.

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета ОИЯИ по ядерной физике
ОИЯИ.03.02.2019.П

д-р физ.-мат. наук

Г.А. Карамышева

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Фотодетекторы, обладающие внутренним усилением, такие как вакуумные фотоумножители (ФЭУ), кремниевые фотоумножители (SiPM) и лавинные фотодиоды (ЛФД), играют важную роль в развитии науки и техники. Они используются в современном медицинском оборудовании — позитрон-эмиссионные томографы (ПЭТ), гамма-камеры; в системах контроля грузов и багажа — сканеры и интроскопы; нано- и биотехнологиях — секвенирование ДНК, однофотонное детектирование; системах волоконной передачи данных, лазерной локации и ЛИДАРах — автопилоты, обнаружение движущихся объектов, — и многих других областях. В современной экспериментальной ядерной физике такие фотодетекторы находят применение в сцинтилляционных счетчиках, время-пролетных системах, сцинтилляционных гомогенных и гетерогенных калориметрах, черенковских детекторах, трекерах, крупногабаритных жидко-сцинтилляционных и водно-черенковских детекторах, используемых в нейтринной физике и др. При этом число каналов фотодетектирования в установках может достигать десятков и сотен тысяч, поэтому разработка новых оптимальных методов и подходов для исследования применимости, сертификации и измерения характеристик фотодетекторов для детектирующих систем является весьма актуальной задачей.

На сегодняшний день разработано множество методов калибровки и измерения параметров фотодетекторов, однако, как правило, они ориентированы на детальное изучение индивидуальных фотодетекторов и не оптимизированы для массовых тестов (или множественных измерений). С другой стороны, каждая конкретная задача требует разработки новых и адаптации существующих методов и подходов.

В качестве первого результата в настоящей диссертации приведено статистическое обоснование оптимизации интенсивности падающего света для калибровки фотодетекторов, работающих в режиме счета фотонов, а затем этот результат, полученный из статистического анализа, применен в процедуре, разработанной для массового исследования зональных характеристик крупногабаритных фотоумножителей эксперимента JUNO. Также этот метод был применен и для изучения зональных распределений характеристик кремниевых фотоумножителей (SiPM) при сканировании лазерным пучком, что

было особенно важно для понимания работы SiPM нового типа с глубоинной структурой пикселей, разрабатываемого для решения актуальной задачи увеличения динамического диапазона SiPM.

В диссертационной работе также приведены разработанные для изучения временных характеристик фотодетекторов методы и подходы, развитие и адаптация которых позволили изучить возможность применения глубоинных SiPM во время-пролетной (ВП) ПЭТ-диагностике и электромагнитной (ЭМ) калориметрии в экспериментах по физике высоких энергий (COMPASS). Методы, применяемые при изучении многоканальных систем, также были использованы для изучения работы лавинных фотодидов — ЛФД, используемых в нейтринном эксперименте NOvA. При этом были выявлены особенности работы ЛФД в сопряжении с используемой в этом эксперименте электроникой, что в дальнейшем было учтено при моделировании работы детекторов NOvA.

Целью данной работы является разработка методов и подходов для исследования характеристик и сертификации фотодетекторов, работающих в режиме счета фотонов, для применения в экспериментах COMPASS, JUNO, NOvA, а также в прикладных задачах: ВП-ПЭТ и настройке технологии производства фотодетекторов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать методы и систему для проведения массового исследования зональных характеристик фотоэлектронных умножителей эксперимента JUNO.
2. Разработать методику и провести сканирование SiPM пятном света микронного размера для исследования зональных характеристик глубоинных SiPM.
3. Для время-пролетных измерений (ВП-ПЭТ, ЭМ-калориметрия) необходимо было разработать методику определения времени, с использованием анализа формы сигналов с SiPM, исследовать собственное временное разрешение SiPM и провести измерения с реальными прототипами детекторов. Изучить влияние загрузок на различные типы SiPM, считывающих калориметрический модуль для эксперимента COMPASS.

4. После начала работы эксперимента NOvA были обнаружены эффекты множественного срабатывания соседних каналов — перекрестные наводки. Требовалось найти их источник и изучить возможность их подавления или учета.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложен и математически обоснован метод оптимизации измерения основных характеристик фотодетекторов, работающих в режиме счета фотонов [1].
2. С применением этого метода разработана и реализована установка [2] для измерения зональных характеристик крупногабаритных ФЭУ. Установка успешно применена для массовой характеристики ФЭУ уникального нейтринного детектора JUNO. В частности, изучено влияние магнитного поля на зональные характеристики крупногабаритных ФЭУ.
3. Проведены исследования характеристик современного фотодетектора SiPM и изучена возможность его применения:
 - предложен метод и проведены измерения зональных характеристик поверхностно-пиксельного и глубинного SiPM лазерным пучком микронного размера [3];
 - предложен метод и проведены измерения собственного временного разрешения SiPM с использованием совместного анализа отдельных фотоэлектронных пиков [4];
 - изучено временное разрешение регистрации пары гамма квантов аннигиляции при помощи глубинного SiPM и кристалла LFS малого размера для оценки возможности применения в ВП-ПЭТ [5; 6];
 - на электронном пучке изучено временное разрешение калориметра типа «Шашлык» со считыванием глубинным SiPM [5];
 - изучено влияние загрузки на работу калориметра типа «Шашлык» со считыванием глубинными SiPM разных типов на пучке для эксперимента COMPASS [7].
4. При разных условиях изучена работа считывающей электроники и фотодетектора эксперимента NOvA [8]. Показано, что перекрестные наводки, возникающие между каналами, связаны с примененной в эксперименте схемой питания ЛФД [9]. Выполненные измерения

позволили учесть эффект перекрестных наводок в моделировании работы детектора NOvA.

Научная новизна:

1. Методом максимального правдоподобия получены оценки среднего числа фотоэлектронов и его стандартной ошибки при анализе спектра с фотодетектора с использованием всех фотоэлектронных пиков, пьедестала и любого произвольного пика.

Впервые математически строго получены:

- оптимальная интенсивность света при анализе произвольного одиночного фотоэлектронного пика в спектре, при которой достигается наилучшая статистическая точность;

- оценка числа фотоэлектронов по одиночному пику и показано, что она является смещенной. Это важно учитывать при массовом тестировании фотодетекторов, особенно при малом числе событий в каждом наборе данных;

- оценка среднего числа фотоэлектронов и его стандартной ошибки при анализе спектра с фотодетектора с учетом шумов детектора; показана зависимость оптимальной интенсивности света от уровня шумов.

2. Выполнено оригинальное исследование SiPM методом сканирования лазерным лучом микронного размера. Впервые проведено сканирование SiPM с глубинной структурой и показано, что для красного света эффективный геометрический фактор заполнения у такого SiPM существенно меньше 100% .
3. Разработана оригинальная методика изучения зональных характеристик крупногабаритных ФЭУ при помощи сканирующей станции. Настоящая методика успешно применяется для массовой характеристики больших ФЭУ эксперимента JUNO.
4. Проведены измерения характеристик фоторегистрирующей системы на основе ЛФД в эксперименте NOvA и выявлены схемные особенности, приводящие к наводкам между каналами.
5. Предложен метод анализа временного разрешения по отклику от различного числа сработавших пикселей SiPM, что позволяет раз-

делить собственное временное разрешение фотодетектора и временное разрешение, связанное с шумами.

6. Впервые изучено временное разрешение регистрации сцинтилляционными кристаллами LFS со считыванием глубинным SiPM пары гамма-квантов аннигиляции для приложений ВП-ПЭТ.
7. На электронном пучке изучено временное разрешение калориметрического модуля типа «Шашлык» со считыванием на основе глубинных SiPM.
8. Впервые изучено влияние загрузки на глубинные SiPM для калориметрического модуля типа «Шашлык» в условиях эксперимента COMPASS (измерение DVCS).

Практическая значимость

1. Полученные оценки среднего числа фотоэлектронов $\hat{\mu}$ и его стандартного отклонения $\hat{\sigma}_\mu$ позволяют найти оптимальную интенсивность света, при которой достигается необходимая статистическая точность измерений. Это является важным параметром оптимизации и может быть использовано при практической реализации массового тестирования фотодетекторов и проведении множественных измерений.
2. Успешно реализован метод массового сканирования крупногабаритных фотоумножителей эксперимента JUNO. На разработанной установке проверено более 2500 фотоумножителей, при этом, кроме выполнения основной задачи выборочного измерения неоднородности характеристик по поверхности фотокатода ФЭУ, сканирующая станция является важным прецизионным инструментом калибровки и перепроверки результатов измерений, выполненных на другой используемой в тестах аппаратуре. Таким образом, реализована практическая задача массовой проверки и отбора ФЭУ для эксперимента JUNO, а использованные аппаратура, методы и подходы могут использоваться при решении аналогичных задач.
3. При помощи сканирующей станции была изучена чувствительность фотоумножителей к магнитному полю, в частности, была измерена зависимость эффективности регистрации света PDE от величины магнитного поля для ФЭУ разных производителей, из чего был по-

лучен и применен важный практический критерий отбора, гарантирующий $PDE > 24\%$ даже при наличии остаточного магнитного поля Земли до 5 мкТл.

4. Важным практическим результатом в изучении SiPM с глубинными микроканалами стало измерение эффективного геометрического фактора меньше 100%, что указывает на необходимость учета геометрии пикселя при проектировании фотодетектора этого типа.
5. Метод получения собственного временного разрешения SiPM позволяет разделить вклады во временное разрешение, вносимые самим фотодетектором, шумами электроники, а также используемым аналитическим методом. Таким образом, измерив все эти компоненты при практической реализации, можно оценить вклад SiPM и электроники во временное разрешение, получаемое в конечной детектирующей системе.
6. Проведенные измерения временного разрешения пары гамма-квантов аннигиляции, детектируемых сборками из LFS-кристаллов и глубинных SiPM, показывают возможность их применения в ВП-ПЭТ системах, так как полученное временное разрешение ~ 400 пс (ПШПВ) не уступает коммерчески доступным ВП-ПЭТ с разрешением 500-600 пс.
7. Изучено влияние загрузок и временное разрешение модулей ЭМ-калориметра типа «Шашлык», считываемых при помощи глубинных SiPM. Временное разрешение может достигать величины лучше 100 пс, что открывает практическую возможность использования таких модулей для идентификации частиц по времени пролета.
8. Эффект перекрестных наводок успешно учтен в компьютерной симуляции детектора NOvA для реконструкции энергии событий, а также для измерения сигналов, превышающих динамический диапазон АЦП.

Достоверность полученных результатов обеспечивается следующими положениями:

- Оценка $\hat{\mu}$, полученная по пьедестальному пику, соответствует классической оценке $\hat{\mu} = -\ln(N_0/N)$.

- Характер зависимости относительной ошибки оценки $\hat{\mu}$ близок к представленной в работе [10] приближительной оценке.
- Расчетная интегральная PDE, получаемая из зональных измерений на сканирующей станции, хорошо согласуется с PDE, измеренной в контейнере — системе для измерения интегральных характеристик ФЭУ.
- Измерения перекрестных наводок в ЛФД детектора NOvA позже были подтверждены независимыми измерениями группой из Калифорнийского технологического университета [11].
- Сканирование образцов SiPM демонстрирует структуру микропикселей, совпадающую с заданной технологическим процессом.
- Поведение временного разрешения в зависимости от интенсивности света согласуется с поведением, представленным в работе [12].

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались автором на международных конференциях:

1. **Micropixel avalanche photodiodes (MAPD) with super high pixel density.** 12th Vienna Conference on Instrumentation — VCI 2010, 15-20 Февраля 2010, The Institute of High Energy Physics of the Austrian Academy of Sciences., Вена, Австрия.
2. **О возможности использования МЛФД в ПЭТ с временными измерениями.** Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии — ИСМАРТ-2010, 14-19 ноября 2010, Институт Сцинтилляционных Материалов, Харьков, Украина.
3. **Исследование МЛФД сканирующим лазерным пучком.** Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии — ИСМАРТ-2012, 19-23 ноября 2012, ОИЯИ, Дубна, Россия.
4. **Testing methods for 20-inches PMTs of the JUNO experiment.** Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR-17), 27 февраля - 3 марта 2020, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.
5. **State of art for silicon photo-multipliers development.** Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии — ИСМАРТ-2018, 9-12 октября 2018, Институт Ядерных Проблем, БГУ, Минск, Белоруссия (пленарный доклад).

6. **Improvements in the NOvA Detector Simulation based on JINR stand measurements.** Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR-20), 24-28 Февраля 2020, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.

На семинарах и международных совещаниях:

1. **Измерение характеристик микропиксельных лавинных фотодиодов.** 26 апреля 2012, Научно-методический семинар ЛЯП ОИЯИ.
2. **Измерение параметров временного разрешения кремниевого фотоумножителя.** 17 мая 2018, Научно-методический семинар ЛЯП ОИЯИ.
3. **Novel deep micro-well MAPD with super high pixel density and their applications.** Matrix Geiger-Mode Avalanche Micro-Pixel Photo Diodes for Frontier Detector Systems, FP7, 22-23 Февраля 2010, Прага, Чехия
4. **A new electromagnetic calorimeter for COMPASS-II.** Advanced Studies Institute on Symmetries and Spin (SPIN-Praha-2013), 7-13 Июля 2013, Прага, Чехия
5. **Studies of the NOvA APD Sag vs different bypass capacitance.** Совещание коллаборации NOvA, 23-26 Апреля 2015, Фермилаб, США
6. **PMT testing facilities status.** Совещание коллаборации JUNO, 14 февраля 2017, Чжухай, Китай (пленарный доклад).

Личный вклад. Автор непосредственно участвовал во всех работах, результаты которых вошли в диссертацию. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают определяющий персональный вклад автора в опубликованные работы.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 реферируемых научных изданиях, индексируемых международными (WoS, Scopus) и российскими (РИНЦ) базами данных, и включенных в перечень, рекомендованный ВАК [1–6; 9]. Дополнительные детали описаны в 2 технических отчетах [7; 8].

Диссертационная работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 18-12-00271).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и раздела благодарностей. Полный объем диссертации составляет 150 страниц с 86 рисунками и 8 таблицами. Список литературы содержит 79 наименований.

Содержание работы

В Первой главе обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Глава содержит краткий обзор современных фотодетекторов, используемых в физике высоких энергий и прикладных задачах.

Начинается глава с краткого исторического очерка развития фоторегистрирующих приборов. Затем обсуждаются современные фотодетекторы:

- вакуумные лампы — фотоэлектронные умножители: принцип работы, различные конструкции, назначение;
- полупроводниковые фотодетекторы — фотодиоды, лавинные фотодиоды, кремниевые фотоумножители: принцип работы, различные конструкции, назначение.

Вместе с этим, обсуждаются эксперименты, проекты и приложения, которые подтолкнули автора к развитию настоящих методов исследования фотодетекторов и их применения:

- Нейтринный детектор JUNO. Центральный детектор — сцинтилляционный сферический объем диаметром 37,5 м, массой 20 кт, окруженный $\sim 18\,000$ крупногабаритных фотоумножителей ($\phi=50$ см). Требуемое рекордное энергетическое разрешение для детектора такого объема $3\%/\sqrt{E}[\text{МэВ}]$ диктует необходимость детального изучения и отбора ФЭУ: высокая PDE $> 24\%$ и ее малая неоднородность $< 15\%$, нечувствительность к остаточному магнитному полю Земли $\sim 5\text{мкТл}$.
- Эксперимент NOvA. Детекторы NOvA представляют из себя высокосегментированный сцинтилляционный калориметр с волоконным считыванием света при помощи ЛФД. Выявленные в ходе эксплуа-

- тации особенности группового срабатывания каналов подтолкнули к исследованию электроники и фоторегистрирующей части детектора.
- Изучение новой технологии SiPM с глубинными микроканалами. Такая технология позволяет создавать высокие плотности микропикселей, что определяет динамический диапазон SiPM, без существенной потери PDE. Широкий динамический диапазон позволяет использовать такие SiPM как для регистрации одиночных фотонов, так и в условиях больших интенсивностей света (10-100 тысяч фотоэлектронов). Однако остается неясным уменьшение PDE при увеличении плотности и уменьшения размера пикселей: связано это с эффективным геометрическим фактором заполнения или с уменьшением напряженности поля внутри пикселя.
 - Электромагнитный калориметр ECAL0 установки COMPASS. Калориметр располагается в ограниченном пространстве (~ 50 см) вблизи спектрометрического магнита SM1, поэтому фоторегистрирующая часть калориметра была выполнена на основе нечувствительных к магнитному полю компактных фотодатчиков — глубинных SiPM. Необходимо изучить работу глубинных SiPM в условиях различных загрузок калориметра частицами, возможность использования калориметра для время-пролетных измерений.
 - Применение SiPM во время-пролетной ПЭТ. Современные ПЭТ-томографы в качестве фотодетектора используют многоканальные фотоумножители, что ограничивает их применение совместно с МРТ томографом. Полупроводниковые фотодетекторы нечувствительны к магнитному полю, что открывает возможность применения SiPM в этой области ядерной медицины. Использование информации о времени пролета гамма-квантов позволяет значительно повысить контраст картинки.

Вторая глава посвящена развитию статистических методов для калибровки фотодетекторов в импульсном режиме.

Для оценки среднего числа фотоэлектронов μ и его стандартного отклонения σ_μ мы использовали Метод Наибольшего Правдоподобия — MLE

(англ. Maximum Likelihood Estimation). Результаты этого исследования опубликованы в [1].

Если на фотодетекторе разделяются отдельные фотоэлектронные пики, как, например, на SiPM (см. рис. 1а), то возможен анализ как по отдельным n -м пикам, так и совместно по всем пикам. В случае совместного анализа всех пиков оценка среднего числа фотоэлектронов и его относительная ошибка получают:

$$\hat{\mu}_{\infty} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{\infty} nN_n \quad \text{и} \quad \frac{\hat{\sigma}_{\mu_{\infty}}}{\hat{\mu}_{\infty}} = \frac{1}{\sqrt{N\hat{\mu}}}, \quad (1)$$

где N - общее число событий.

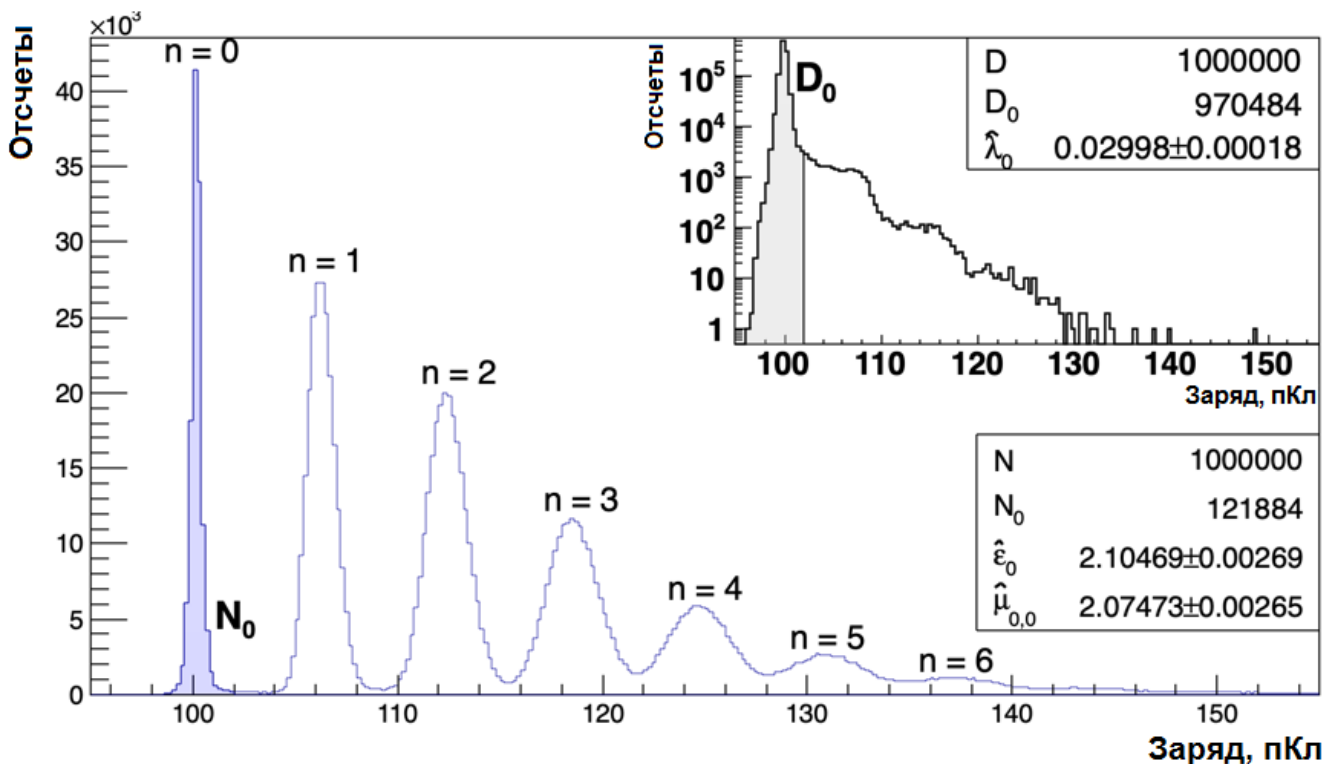


Рис. 1 — Зарядовый сигнальный спектр SiPM Hamamatsu MPPC 100 мкм 1×1 мм². На вставке темновой спектр. Приведены оценки параметров (см. ф-л. 2 и 4)

Относительная ошибка в ф-л. 1 определяет предельную статистическую точность, получаемую при анализе спектров с фотодетекторов. В идеальном случае, в отсутствие искажающих факторов, таких как дисперсия усиления, кросс-токи и др., ф-л. 1 удобно использовать для оценки $\hat{\mu}$ по относительной дисперсии распределения сигналов с фотодетектора, даже если

пики не разделяются. Такими выражениями часто пользуются для приближительной калибровки фотодетекторов.

При наличии факторов, искажающих фотостатистику, например, кросс-токи в SiPM, оценки удобно проводить по пьедестальному пику ($n = 0$). Оценки методом MLE получаются:

$$\hat{\mu}_0 = -\ln \frac{N_0}{N} \quad \text{и} \quad \frac{\hat{\sigma}_{\hat{\mu}_0}}{\hat{\mu}_0} = \frac{1}{\sqrt{N\hat{\mu}_0}} \sqrt{\frac{e^{\hat{\mu}_0} - 1}{\hat{\mu}_0}}, \quad (2)$$

где N_0 — число событий в пьедестале.

Оценка $\hat{\mu}_0$ в ф-л. 2 соответствует классической оценке, приводимой во многих источниках [10; 13]. Выражение для относительной ошибки в ф-л. 2 получено впервые. Анализ показывает, что существует оптимальная интенсивность света $\mu \approx 1.6$, при которой достигается наилучшая статистическая точность. Аналитические выражения 2 хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования (см. рис. 1а.). Схожий результат был нестрого получен в работе [10]. В общем случае оценка $\hat{\mu}_0$ оказывается положительно смещенной относительно истинного числа μ . Смещение оценки $\beta(\hat{\mu}_0)$ на практике оказывается малым

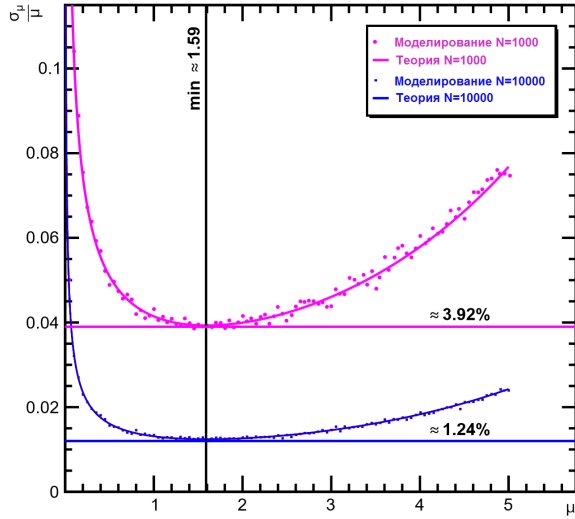
$$\beta(\hat{\mu}_0) \approx \frac{e^{\hat{\mu}_0} - 1}{2N}, \quad (3)$$

поэтому приблизительно можно пользоваться выражениями из ф-л. 2. Однако в случае малой статистики или больших значений μ необходимо учитывать смещение.

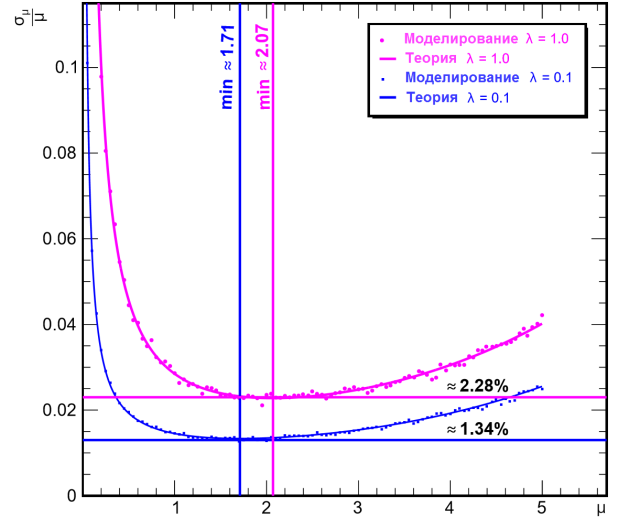
При наличии шумов фотодетектора часть шумовых сигналов накладывается на сигнальные, и для оценки среднего числа фотоэлектронов и его ошибки приходится использовать совместный анализ сигнального (рис. 1а) и шумового спектра (рис. 1б). Таким образом, оценки изменяются и находятся как:

$$\hat{\mu}_{0,0} = \hat{\xi}_0 - \hat{\lambda}_0 = \ln \frac{D_0}{N_0} \quad \text{и} \quad \frac{\hat{\sigma}_{\hat{\mu}_{0,0}}}{\hat{\mu}_{0,0}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{e^{\hat{\xi}_0} + e^{\hat{\lambda}_0} - 2}{(\hat{\xi}_0 - \hat{\lambda}_0)^2}}, \quad (4)$$

где ξ_0 и λ_0 — средние значения в шумовом и зарядовом спектре с одинаковой статистикой N , оцененные по пьедестальным пикам, $\hat{\xi}_0 = -\ln N_0/N$ и $\hat{\lambda}_0 = -\ln D_0/N$.



а) Случай без шумов ф-л. 2.



б) Случай наличия шумов ф-л. 4.

Рис. 2 — Зависимость относительной дисперсии σ_μ/μ от μ при различном числе событий N при анализе по пьедестальному пику. Точки — компьютерное моделирование, сплошные линии — теоретические выражения (не аппроксимация).

При наличии шумов оптимум сдвигается в область больших значений μ (см. рис. 2б).

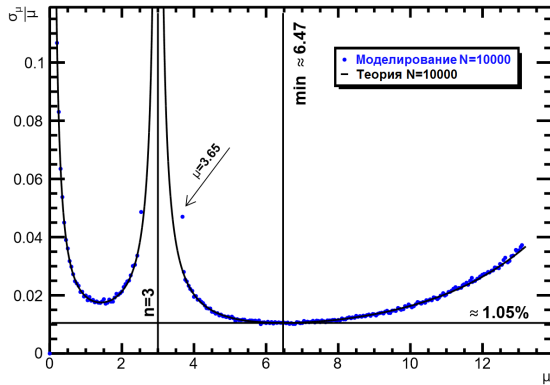
Также был проведен анализ и получены оценки при использовании произвольного n -го пика:

$$\hat{\mu}_n = -nW\left(-\frac{\sqrt{\hat{p}_n n!}}{n}\right) \quad \text{и} \quad \frac{\hat{\sigma}_{\hat{\mu}_n}}{\hat{\mu}_n} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\hat{p}_n^{-1} - 1}{(\hat{\mu}_n - n)^2}}, \quad (5)$$

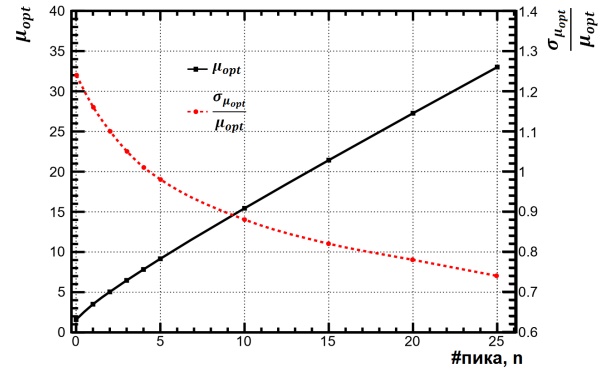
где $\hat{p}_n = (\hat{\mu}_n)^n e^{-\hat{\mu}_n}/n! = N_n/N$ — оценка вероятности n -го пика при числе событий N_n в нем и W — функция Ламберта.

Выражения 5 хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования. На рис. 2а видно две ветви, где имеются локальные минимумы, обусловленные двужначностью функции Ламберта. Абсолютный минимум лежит на ветви, где $\mu > n$. При приближении к n видно, что точность ухудшается и имеется разрыв. Разрыв обусловлен ограниченностью метода MLE, основанного на дифференцировании информации Фишера. Точное определение доверительного интервала для μ_n в общем случае потребует применения Неймановских конструкций [14] или метода Фельдмана-Казинса [15], которые выходят за пределы представленной работы.

Видно, что оптимум для $n = 3$ лежит в области больших μ , чем при пьедестальной оценке. При этом достигается лучшая статистическая точность. На рис. 3б приведена зависимость оптимальной интенсивности света μ_{opt} от используемого n -го пика и какая статистическая точность при $N = 10000$ может быть достигнута.



а) Зависимость σ_{μ}/μ от μ при анализе по 3-му пику.



б) Зависимость $\sigma_{\mu_{opt}}/\mu_{opt}$ и μ_{opt} при анализе n -го пика.

Рис. 3 — Зависимость относительной дисперсии σ_{μ}/μ и оптимальной интенсивности света μ_{opt} .

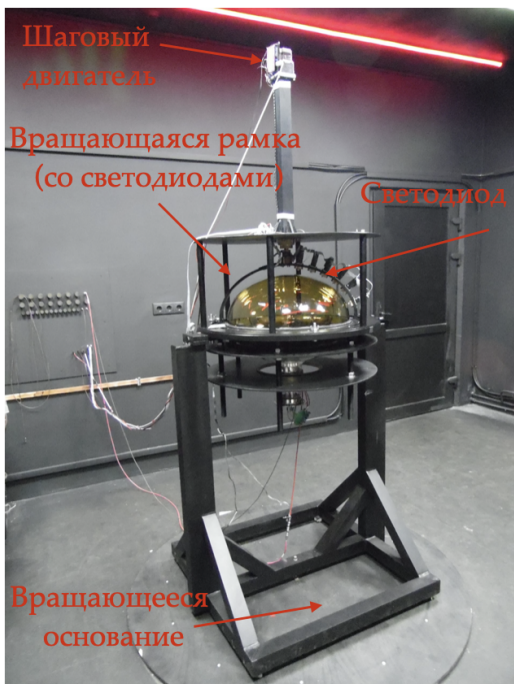
Третья глава посвящена массовому исследованию и характеристике крупногабаритных фотоумножителей для эксперимента JUNO. Результаты этого исследования опубликованы в [2].

В детекторе будет использоваться около 5 000 тысяч фотоумножителей японской фирмы Hamamatsu типа R12860HQE [16] с диодной системой и примерно 15 000 китайской фирмы NNVT с усилительной системой на основе двухкаскадной МКП [17].

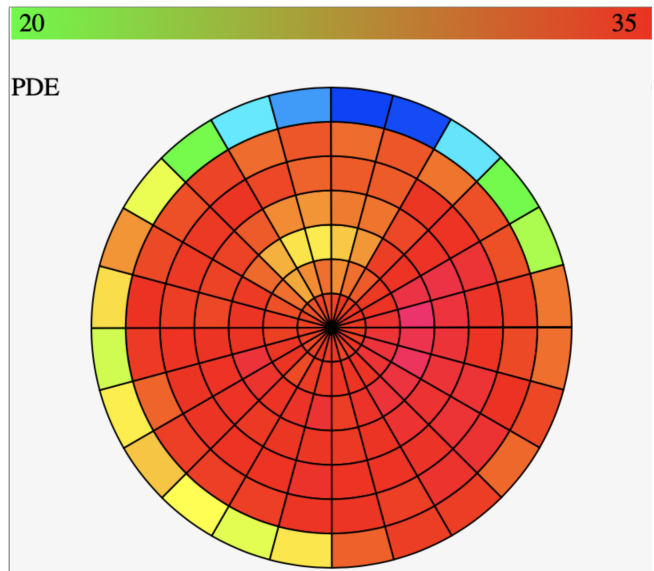
Все фотодетекторы проходят проверку в системе, называемой «Контейнер». Контейнер представляет из себя систему, в которую загружается и тестируется сразу 32 фотоумножителя. Каждый ФЭУ помещается в выдвижной бокс, в котором происходит равномерная засветка всего фотокатода. Таким образом контейнер измеряет интегральные характеристики ФЭУ, такие как: PDE, усиление, TTS, пик-долина и др.

Для измерения зонального распределения характеристик была разработана система сканирования ФЭУ — сканирующая станция (см. рис. 4а). Это устройство представляет из себя суппорт, куда устанавливается фотоумножитель, и сверху находится вращающаяся рамка с 7 стабилизированными свето-

диодными импульсными источниками света. Интенсивность света подобрана так, чтобы ФЭУ регистрировал свет в диапазоне $1 \div 2$ ф.э, где достигается наилучшая точность при оценке параметров по пьедесталу (см. рис. 2б). Шумы удовлетворительных фотоумножителей не превышают 100 кГц ($\lambda_0 = 0.1$). Светодиоды с равным шагом покрывают зенитный угол до 90° . Вращение рамки позволяет сканировать ФЭУ в полном азимутальном угле. В стандартной процедуре сканирования используется 24 шага по азимутальному углу. Таким образом, фотоумножитель сканируется в 168 точках, в результате получаются карты распределения характеристик: PDE (см. рис. 4б), усиление и др.



а) Сканирующая станция



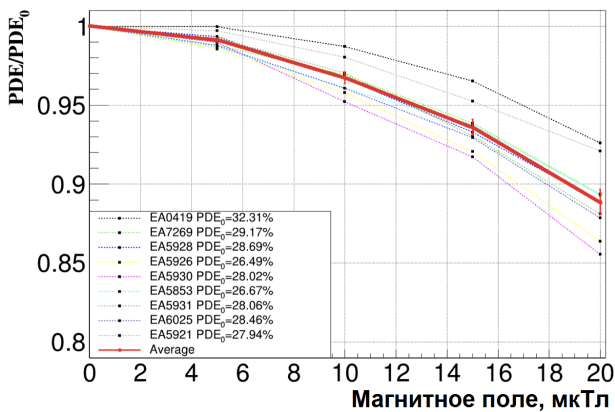
б) Карта сканирования PDE (Hamamatsu).

Рис. 4 — Сканирование крупногабаритных фотоумножителей.

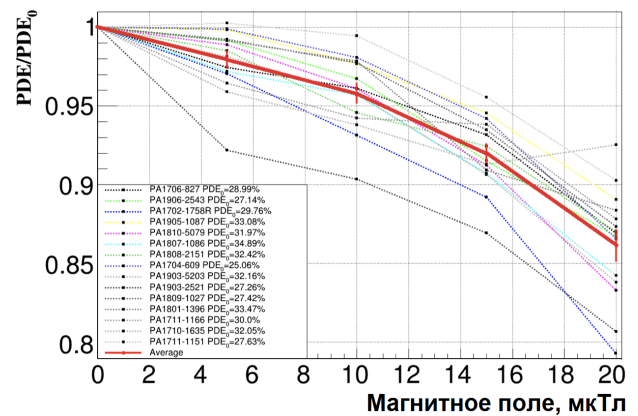
Далее из полученных распределений рассчитываются интегральная PDE, усиление для кросс-проверки результатов с контейнерными измерениями, а также неоднородность этих характеристик. Неоднородность σ_{PDE} — ключевая характеристика, изучаемая на сканирующей станции. Было протестировано более 2500 фотоумножителей. Показано, что для всех типов ФЭУ эта величина превышает установленный порог в 15% лишь в 1% случаев, что является незначительным. Поэтому нет необходимости тестировать все фотоумножители на сканирующей станции. Неоднородность в среднем составляет

$\sigma_{\text{PDE}} = 4,3\%$ ($\sigma_{\sigma_{\text{PDE}}} = 1,8\%$) для Hamamatsu и $\sigma_{\text{PDE}} = (8,4)\%$ ($\sigma_{\sigma_{\text{PDE}}} = 2,9\%$) для NNVT.

На площадке тестирования ФЭУ установлены и эксплуатируются 2 сканирующие станции. Каждая станция помещена в светоизолированную комнату с 3 взаимоперпендикулярными катушками Гельмгольца. Катушки позволяют не только полностью компенсировать магнитное поле Земли, но и задавать вектор магнитного поля по величине и направлению. Требование коллаборации JUNO для фотоумножителей — нечувствительность к магнитному полю вплоть до 5 мкТл. Фотоумножители Hamamatsu изучались при направлении магнитного поля вдоль первого динода, при этом динод находился справа — это соответствует наибольшему влиянию поля на отклонение фотоэлектронов. Для ФЭУ с МКП поле ориентировалось в том же направлении относительно комнаты, как и для Hamamatsu, поскольку из-за симметричности МКП нет выделенного направления для наиболее сильного влияния магнитного поля вдоль плоскости МКП. Результаты измерений приведены на рис. 5.



а) Фотоумножители Hamamatsu R12860



б) Фотоумножители NNVT

Рис. 5 — Магнитная чувствительность крупногабаритных фотоумножителей. Изменение PDE в зависимости от величины магнитного поля.

В среднем у фотоумножителей эффективность уменьшается на $(0,9 \pm 0,2)\%$ (Hamamatsu) и $(2,1 \pm 0,6)\%$ (NNVT) при величине магнитного поля 5 мкТл и $(2,3 \pm 0,4)\%$ (Hamamatsu) и $(4,3 \pm 0,7)\%$ (NNVT) при 10 мкТл (CL=68%). Также измерялось влияние магнитного поля на неоднородность PDE. В среднем у фотоумножителей неоднородность эффективности увели-

чивается на $(46.7 \pm 11.1)\%$ (Hamamatsu) и $(0,1 \pm 0,15)\%$ (NNVT) при величине магнитного поля 5 мкТл и $(152.4 \pm 30,5)\%$ (Hamamatsu) и $(7,2 \pm 3,4)\%$ (NNVT) при 10 мкТл ($CL=68\%$).

Видно, что неоднородность PDE у ФЭУ фирмы Hamamatsu гораздо более подвержена влиянию магнитного поля. Однако из-за малости изначальной величины σ_{PDE} даже при наличии магнитного поля в детекторе ~ 5 мкТл только $\sim 1\%$ не удовлетворяют критерию $\sigma_{PDE} > 15\%$.

Полученные значения изменения PDE в зависимости от величины магнитного поля будут применены к отобранным в контейнере фотоумножителям, чтобы гарантировать $PDE > 24\%$ в детекторе при наличии остаточного магнитного поля.

В четвертой главе приведено исследование зональных распределений характеристик SiPM, полученных сканированием лазерным пучком микронного размера [3].

Наиболее распространенная конструкция SiPM — структура с пикселями, расположенными на поверхности. Несмотря на все преимущества — стандартная CMOS-технология, большой коэффициент усиления, малые мертвые времена и пр., — такая технология имеет существенный недостаток: уменьшение PDE при повышении плотности пикселей за счет уменьшения так называемого геометрического фактора — отношения фоточувствительной площади к общей площади фотодетектора. Логичное развитие привело к разработке так называемых глубинных SiPM с микроканалами (пикселями), размещенными в толще кремниевого слоя. Такая структура строится по CMOS-технологии, но с эпитаксиальным выращиваем слоем на подложке. Она позволяет существенно повысить плотность пикселей (вплоть до 40000 мм^{-2}), имея при этом эффективность PDE на уровне $(10 - 15)\%$. Авторами технологии заявляется, что эффективный геометрический фактор заполнения при этом близок к 100% [18].

Совместно с коллегами из Карлового университета (Чехия) нами был разработан метод сканирования фотосенсоров в однофотоэлектронном режиме. В исследовании использовался импульсный (1,2 нс) лазерный пучок ($\lambda = 662 \text{ нм}$), сфокусированный до микронных размеров (2,8 мкм). Минимальный шаг перемещения пучка — 1,25 мкм.

В импульсном режиме свет устанавливался на уровне 1-2 ф.э. в максимуме чувствительности SiPM (центр пикселя) для получения наилучшей статистической точности (см. главу 2) при малом числе событий $N = 5000$. Метод апробировался на поверхностно-пиксельных фотодиодах MAPD-2 [19] и продемонстрировал хорошее соответствие технологическому процессу, задающему структурные элементы: геометрический фактор, заданный технологией $\epsilon_g = 62\%$, оцененный из измерений $\epsilon_g = (58 \pm 7)\%$. На рис. 6 представлен технологический чертеж геометрической упаковки и размеры поверхностных элементов. Диод имеет чувствительную площадь $1.05 \times 1.05 \text{ мм}^2$, пиксели скошены с одного края и располагаются с шагом $d = 42 \text{ мкм}$.

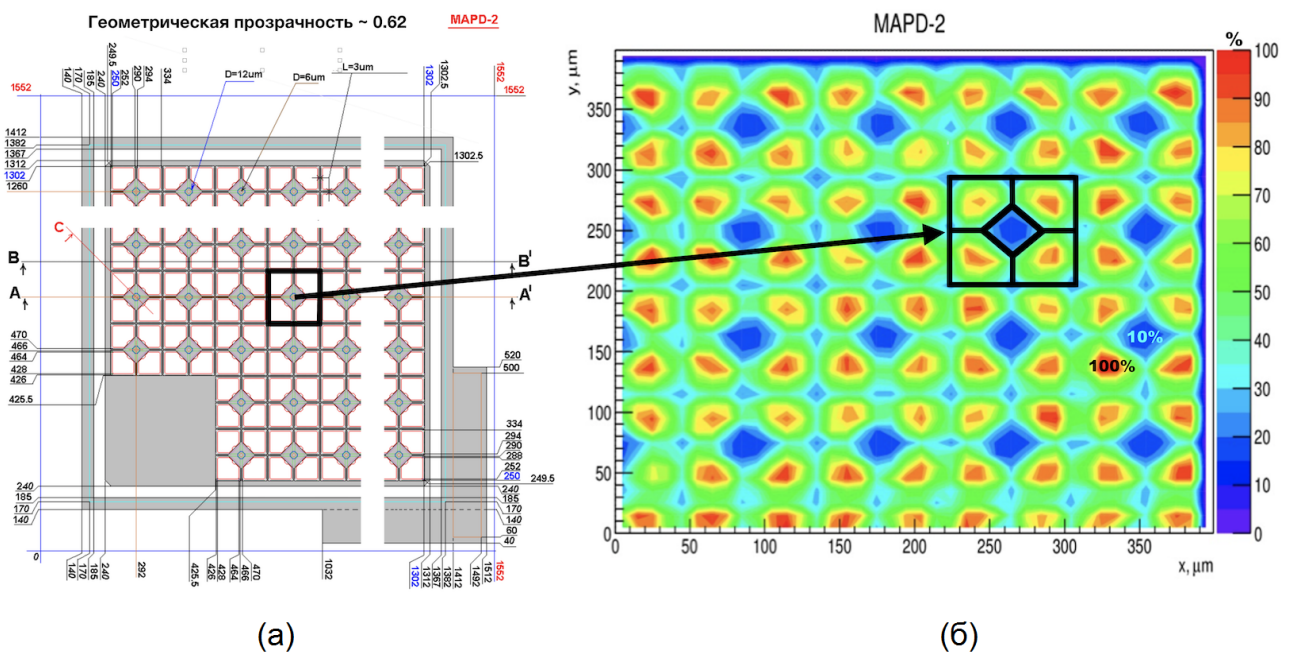
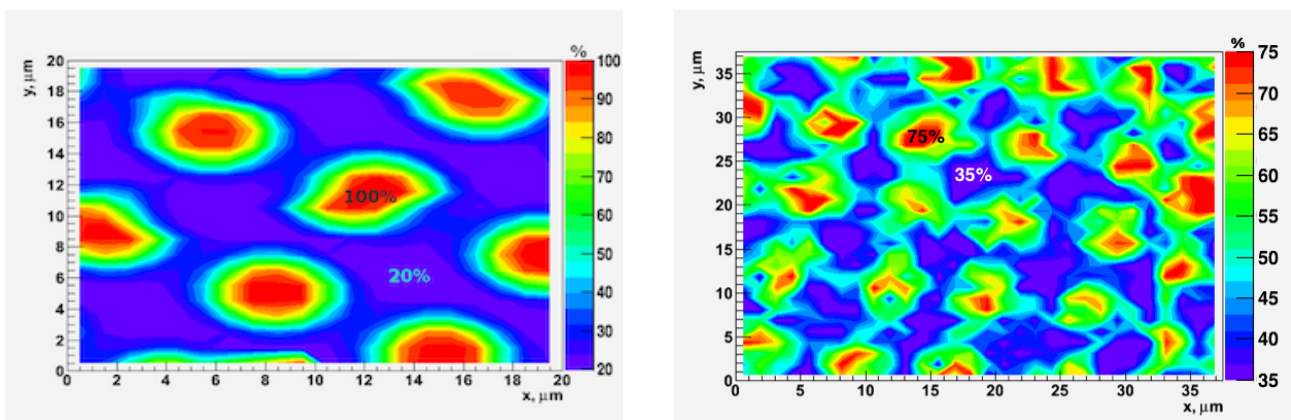


Рис. 6 — Сканирование SiPM MAPD-2: а) — технологический чертеж, б) — карта сканирования.

Мы провели исследование глубинного SiPM MAPD-3N фирмы Zecotek [19]. Фотодиод использовался без защитного эпоксидного слоя, что позволяло обеспечить лучшую фокусировку святого пятна. Размер фотодиода $3 \times 3 \text{ мм}^2$. Размер пикселя 5 мкм . Шаг между пикселями 8 мкм . Плотность — $15\,625 \text{ шт/мм}^2$. Поскольку пиксели располагаются в глубине, то фокусировку невозможно установить визуально. С этой целью нами был разработан метод сканирования фотодиода в токовом режиме: напряжение устанавливалось немного ниже пробойного $U = 90 \text{ В}$, непрерывный световой поток или большая частота при достаточно большой интенсивности света. При таком напряжении пиксели работают в линейном лавинном режиме с усилением ~ 10 .

Наилучшая фокусировка определялась наибольшей разницей изменения фототока, считываемого напрямую с фотодиода при перемещении вдоль поверхности. При попадании пучка света на пиксель фототок усиливался и давал максимальное значение, при попадании между пикселями получалось минимальное значение. Характерная величина токов устанавливалась на уровне нескольких мкА. Разработка метода фокусировки лазерного пятна в глубине производилась при помощи конфокального микроскопа Solar ТП (НИИЯФ МГУ Дубна) с установленным лазером непрерывного действия и длиной волны 440 нм. Измеренное отнормированное распределение фототоков (сканирование) при оптимальной фокусировке показано на рис. 11а.



а) В токовом режиме.

б) В импульсном режиме.

Рис. 7 — Сканирование глубинного SiPM MAPD-3N.

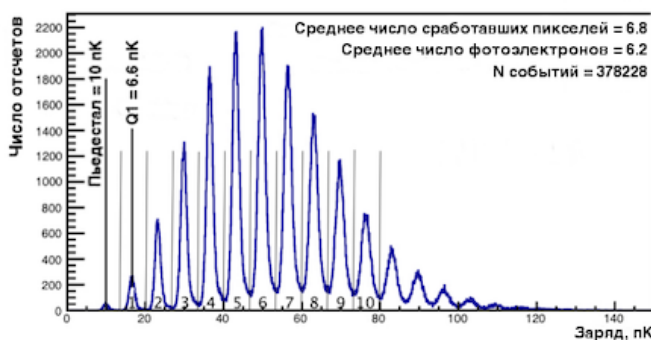
Далее диод изучался нами в импульсном режиме на лазерном пучке ($\lambda = 662$ нм) в Карловом университете рис. 11б. Хорошо видна пиксельная структура, которая говорит о неоднородности сбора электронов пикселями и, соответственно, эффективный геометрический фактор меньше 100% и получается $\epsilon_g = (65 \pm 12)\%$.

Пятая глава посвящена исследованию временных характеристик SiPM и детекторных систем на их основе. В исследовании используется современный подход применения АЦП с выборкой по времени, где из полученных осциллограмм возможно совместно извлекать амплитуду (заряд) и время прихода сигнала. В настоящей работе апробировался метод извлечения времени T по пересечению линейных аппроксимаций базовой линии $BL \cdot T$ (с дополнительным смещением C) и переднего фронта $p_1 \cdot T + p_0$ сигнала:

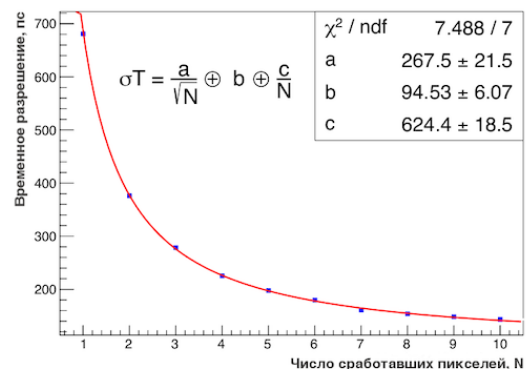
$$T = \frac{BL - p_0 - C}{21^{p_1}}. \quad (6)$$

При применении SiPM в детекторах с измерением времени пролета необходимо знать, какой вклад во временное разрешение вносит сам фотодетектор. Ключевым параметром является временное разрешение одиночных фотонов (срабатывание одиночных пикселей). Часто для таких измерений используется быстрый световой источник (пикосекундный лазер), работающий в режиме одиночных фотонов. Однако полученное временное разрешение трудно экстраполировать на большие интенсивности света, поскольку оно включает не только стохастическую компоненту a , зависящую от интенсивности света, но и линейный b и константный члены, обусловленные шумами усилителя и фотодетектора и методом экстракции времени, например, апробируемый в работе — по пересечению линейных аппроксимаций базовой линии и переднего фронта сигнала.

Автором был разработан метод [4] измерения отдельно всех компонент временного разрешения SiPM, основанный на вспышках света малой интенсивности от быстродействующего источника света. Одна из особенностей SiPM — отличное однофотонное разрешение. Совместное измерение амплитуды и времени позволяет измерить временное разрешение от срабатывания одиночных, двойных, тройных и т.д. пиксельных событий (см. рис. 8а). Таким образом можно построить зависимость временного разрешения от числа N сработавших пикселей. Аппроксимация этой зависимости (см. рис. 8б) позволяет отдельно извлечь компоненты a, b, c , определяющие временное разрешение детектора.



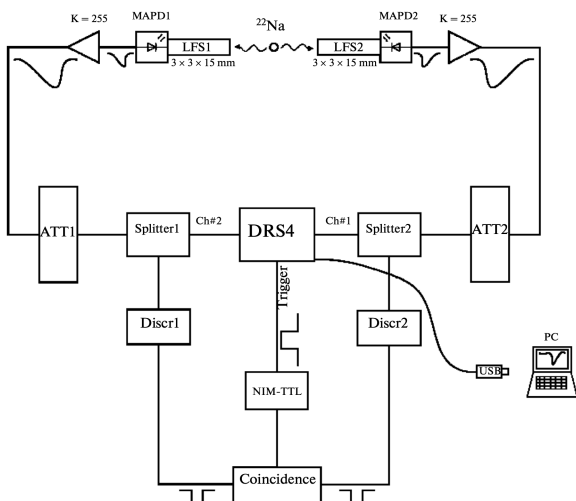
а) Выделение амплитуд, соответствующих срабатыванию n -пикселей.



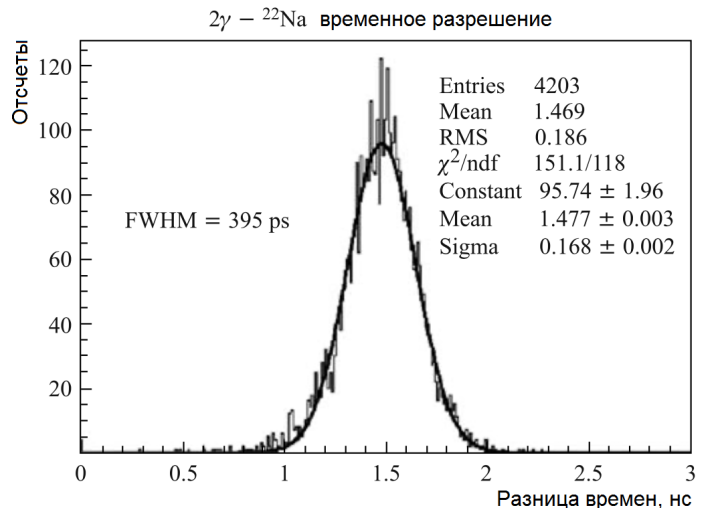
б) Экстракция отдельных компонент временного разрешения.

Рис. 8 — Измерение внутреннего временного разрешения SiPM

Метод извлечения времени методом линейной аппроксимации базовой линии и переднего фронта сигнала был использован для изучения работы глубоких SiPM MAPD-3N [20] совместно с сцинтилляционными кристаллами LFS [19] для применения во время-пролетной ПЭТ [6]. Была собрана установка рис. 9а, в которой измерялась разница времен прихода двух гамма квантов аннигиляции от источника позитронов ^{22}Na . Основная идея — это запускать считывание по совпадениям сигналов с большими амплитудами, соответствующим событиям из фотопиков, а временную отметку T брать на низком пороге C , близком к пересечению нулевой линии и переднего фронта сигнала. Триггер для записи событий на DRS4 от фотопиков формировался совпадениями от двух дискриминаторов (Discr1, Discr2). Таким образом, можно избежать считывания большого количества ненужных совпадений.



а) Блок-схема измерительной установки



б) Временное разрешение пары гамма квантов аннигиляции.

Рис. 9 — Изучение применения кристаллов LFS со считыванием глубинным SiPM для время-пролетной ПЭТ.

Полученный результат в 395 пс (ПШПВ) (см. рис. 9б) является сравнимым с временным разрешением в современных ВП-ПЭТ установках [21] и определяется, в основном, быстродействием и размером сцинтилляционного кристалла ($3 \times 3 \times 30 \text{ мм}^3$).

В настоящее время SiPM находят применение в электромагнитной калориметрии. Нами изучались прототипы модулей электромагнитного калориметра типа «Шашлык», разрабатываемые для эксперимента COMPASS (ECAL0), считываемые глубинными SiPM серии MAPD-3 — площадью

$3 \times 3 \text{ мм}^2$. Глубинные SiPM обладают большими плотностями пикселей, что обеспечивает большой динамический диапазон, необходимый для электромагнитной калориметрии: MAPD-3A - 15000 мм^{-2} (размер ячейки — 3 мкм, PDE = 15%), MAPD-3B — 40000 мм^{-2} (размер ячейки — 3 мкм, PDE = 10%), MAPD-3N — 15000 мм^{-2} (размер ячейки — 5 мкм, PDE = 30%). Важной характеристикой является способность работать в пучках с большой загрузкой частицами. У глубинных диодов из-за большого времени восстановления микропикселя ($\sim \text{мкс}$) загрузки значительно влияют на проседание амплитуды.

В работе [7] изучалось влияние загрузки пучка в условиях, имитирующих работу детектора в рамках программы DVCS эксперимента COMPASS на амплитуду глубинных SiPM. Нами использовался пучок мюонов с импульсом 190 ГэВ/с и с интенсивностью $3,4 \cdot 10^8$ частиц/сброс, сбрасываемый на полиэтиленовую мишень длиной 300 мм, которая имитирует LN_2 мишень, используемую в COMPASS. Длительность сброса 10 сек. Глубинные SiPM разных типов были установлены на прототип калориметрического модуля, описанного в [22]. На рис. 10а показано проседание отклика SiPM в пучке на светодиодные вспышки > 1000 ф.э., следующие с частотой 500 Гц. Видно, что наименьший эффект имеет MAPD-3N, у которого наименьшее время восстановления пикселя.

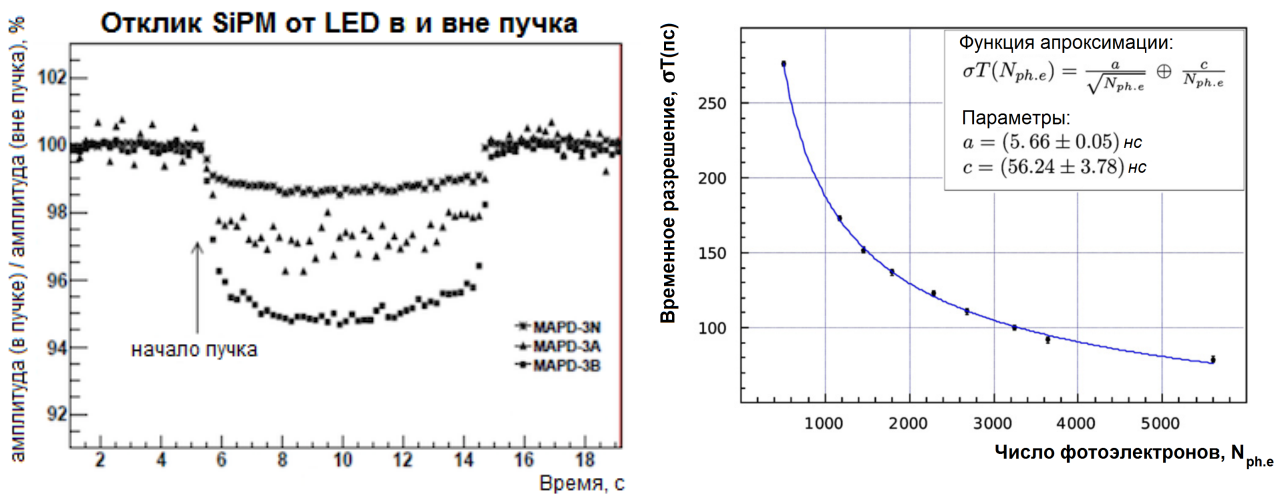


Рис. 10 — Временные характеристики прототипа модуля электромагнитного калориметра типа «Шашлык», считываемого глубинными SiPM

Этот фотодиод был выбран как наиболее подходящий для условий эксперимента COMPASS [23]. Далее изучалось временное разрешение меж-

ду двумя башнями модуля на электронном тестовом пучке T21 на ускорительном комплексе в DESY. Для уменьшения влияния время-амплитудной корреляции выбирались события примерно с одинаковыми амплитудами в обеих башнях. В анализе использовался метод Oversampling — искусственное увеличение частоты дискретизации, — и метод линейной аппроксимации базовой линии и переднего фронта сигнала. Результаты измерений приведены на рис. 10б [5]. Константный член отсутствует в аппроксимации из-за малости величины шумов. Видно, что временное разрешение достигается лучше 100 пс. Такое временное разрешение позволяет использовать калориметр для идентификации частиц по времени пролета, например, отличать нейтральные частицы — фотоны ($\sim 15X_0$) и нейтроны ($\sim 0,8\lambda_h$).

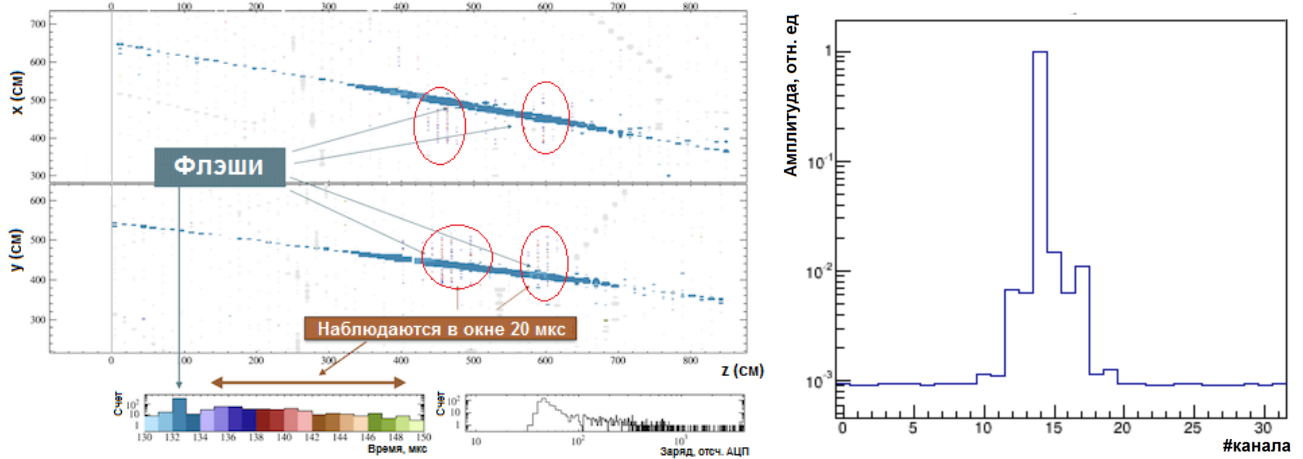
В шестой главе приведено исследование кросс-токов на плате между каналами ЛФД, используемых в эксперименте NOvA, и их влияние на работу детекторов.

Эксперимент NOvA состоит из двух детекторов — ближний и дальний. Детекторы представляют из себя высокосегментированные калориметры на основе жидкого сцинтиллятора. Конструктивно детекторы выполнены из длинных ПВХ (4 м — ближний и 16 м — дальний) трубок сечением 6×4 см, заполненных минеральным маслом с сцинтилляционными добавками. Считывание света осуществляется при помощи петель из спектросмещающих волокон, сочлененных с матрицами из 32 лавинных фотодиодов — ЛФД. Каждая матрица состоит из четырех линеек прямоугольных ЛФД по 8 штук, к каждому из которых подходят оба конца петли волокна. Всего таких матриц около 11 тысяч штук, что обеспечивает считывание ~ 340 тысяч трубок. Трубки образуют попеременно чередующиеся слои, ориентированные по горизонтали и вертикали соответственно, для 3^x -мерной реконструкции треков.

Затем сигналы с ЛФД считываются Front-End картой (FEB), на которой располагается 32-канальная специализированная интегральная схема — ASIC, усиливающая и формирующая сигналы для АЦП с необходимым мультиплексированием (2:1 — ближний, 8:1 — дальний). Далее с каждой карты FEB данные поступают на Модуль Концентрации Данных (DCM).

В ходе работы детектора в зарегистрированных событиях обнаружались структуры, вызванные срабатыванием всех 32 каналов при большом сигнале (энерговыведении) хотя бы в одном из них. Такие структуры полу-

чили название «Флэши». Первоначально предполагалось, что этот эффект вызван перекрестными наводками между каналами внутри чипа ASIC. Автором была проделана работа в Фермилаб (США) по изучению перекрестных наводок в чипе прямым инжектированием заряда [8]. Исследование показало, что кросс-ток составляет $\sim 1\%$ в ближайших соседних каналах, однако в последующих каналах кросс-токи экспоненциально затухают по мере удаления от первоначального канала.



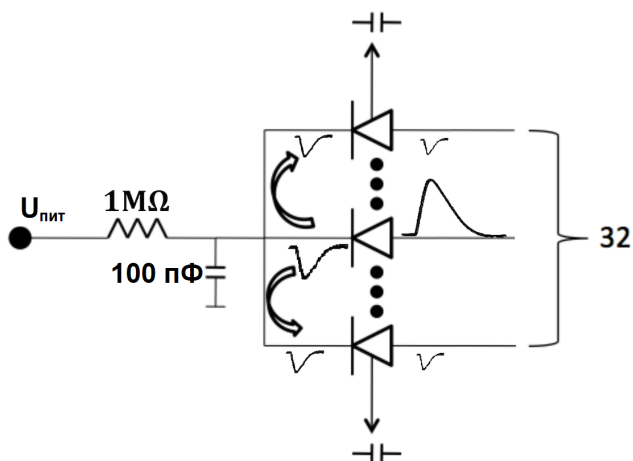
а) Монитор событий дальнего детектора NOvA.

б) Распределение кросс-токов в ASIC FEB NOvA.

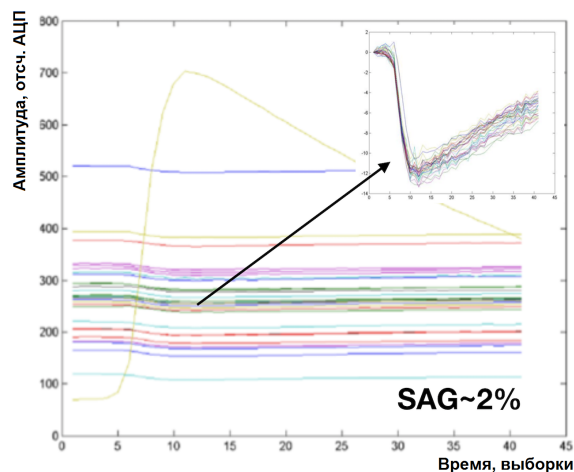
Рис. 11 — Множественные срабатывания "Флэши" в детекторе NOvA и кросс-токи в ASIC FEB NOvA.

Таким образом, эффект кросс-токов внутри ASIC не объяснял «Флэши», наблюдаемые в детекторах. Тогда автором было высказано предположение, что кросс-токи возникают на плате ЛФД из-за отсутствия гальванической развязки между каналами и малой величины блокирующей емкости 100 пФ (см. рис. 12а).

В ЛЯП ОИЯИ был подготовлен стенд на основе оригинальной электроники NOvA. При помощи генератора импульсов и светодиода формировался световой сигнал нужной формы и амплитуды, который по оптоволокну подавался на один из каналов ЛФД. Было показано, что первоначальный сигнал вызывает срабатывание остальных 31 канала с инвертированной амплитудой $\sim 2\%$ от первоначальной (см. рис. 12б). Эффект получил название «Sag» (англ. проседание). Большие амплитуды первичного сигнала приводили к срабатыванию электроники по заднему фронту от инвертированных сигналов.



а) Схематическая иллюстрация падения напряжения.



б) Отклик ЛФД и электроники на вспышку света большой интенсивности.

Рис. 12 — Падение напряжения на плате ЛФД — «Sag»-эффект: большая амплитуда в одном канале приводит к возникновению инвертированных сигналов в остальных.

Увеличение величины блокирующей емкости на плате в тестовых измерениях значительно уменьшало Sag-эффект.

Замена электроники во всем детекторе NOvA не представлялась возможным, однако этот эффект был учтен в моделировании, а повторяемость и точное соответствие Sag-сигналов первоначальному импульсу позволяют измерять с хорошей точностью амплитуду первоначального сигнала в случае, когда она превышает диапазон оцифровки АЦП.

В **заклучении** обсуждаются основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. На основе анализа фотоэлектронных пиков методом наибольшего правдоподобия получены оценки среднего числа фотоэлектронов и его стандартного отклонения по произвольному фотоэлектронному пику, в том числе с учетом шумов. Показано, что оценки являются смещенными и хорошо соответствуют результатам компьютерного моделирования.

Полученные выражения удобно использовать для оптимизации измерения параметров фотодетекторов при массовом тестировании или при проведении множественных измерений.

2. Проведено массовое изучение зональных характеристик крупногабаритных фотоумножителей для эксперимента JUNO. В результате исследовано более 2500 фотоумножителей. Показано, что неоднородность чувствительности фотокатода, превышающая требуемую (15%), наблюдается всего у 1% фотоумножителей, что является несущественным. Измерена зависимость чувствительности фотоумножителей к магнитному полю, с использованием которой будут отобраны фотоумножители, сохраняющие требуемые характеристики даже при максимальном остаточном магнитном поле Земли в детекторе JUNO.
3. Путем сканирования лазерным пучком микронного размера исследованы зональные характеристики поверхностно-пиксельных и глубинных SiPM. Этот метод показал хорошее соответствие выявленной структуры с ожидаемым из технологического процесса. Обнаружено, что для глубинных SiPM эффективный геометрический фактор составляет меньше 100% ($\lambda = 662$ нм), что говорит о влиянии геометрии пикселей на PDE фотодетектора даже для этого типа SiPM.
4. Проведены измерения внутреннего временного разрешения SiPM с использованием анализа амплитуд совместно с временным анализом по отдельным фотоэлектронным пикам, а также изучено временное разрешение при регистрации пары гамма квантов аннигиляции кристаллом LFS со считыванием глубинным SiPM для применения во время-пролетной ПЭТ.
5. Изучена возможность применения глубинных SiPM в электромагнитной калориметрии. Измерены временное разрешение и влияние на характеристики калориметра общей загрузки.
6. Изучена причина множественного срабатывания соседних каналов в детекторах NOvA. Показано, что такое поведение вызвано особенностью использованной схемы питания на 32-канальной плате ЛФД. Указанный эффект учтен в моделировании работы детекторов и позволяет измерять сигналы, превышающие динамический диапазон АЦП.

Публикации автора по теме диссертации

1. *Anfimov N., Rybnikov A., Sotnikov A.* Optimization of the light intensity for Photodetector calibration // Nucl. Instr. and Meth. — 2019. — Vol. 939. — Pp. 61–65.
2. *Anfimov N.* Large photocathode 20-inch PMT testing methods for the JUNO experiment // JINST. — 2017. — Vol. 12, no. 06. — P. C06017. — DOI: 10.1088/1748-0221/12/06/C06017. — arXiv: 1705.05012 [physics.ins-det].
3. Scanning a Silicon Photomultiplier with a Laser Beam / N. Anfimov [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2019. — Nov. — Vol. 16. — Pp. 820–825. — DOI: 10.1134/S1547477119060025.
4. *Anfimov N. V., Rybnikov A. V.* Measurement of Time-Resolution Parameters of a Silicon Photomultiplier // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2019. — Jan. — Vol. 16, no. 1. — Pp. 16–20. — DOI: 10.1134/S1547477119010047. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477119010047>.
5. Novel micropixel avalanche photodiodes (MAPD) with super high pixel density / N. Anfimov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A / ed. by T. Bergauer [et al.]. — 2011. — Vol. 628. — Pp. 369–371. — DOI: 10.1016/j.nima.2010.07.003.
6. *Anfimov N., Selyunin A.* Micropixel avalanche photodiodes and the possibility for their application in positron-emission tomography // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2012. — Dec. — Vol. 9. — DOI: 10.1134/S1547477112070023.
7. Tests of the various MAPD types at COMPASS: тех. отч. / N. Anfimov [и др.] ; COMPASS NOTE 20011-2 CERN. — Февр. 2011.
8. *Anfimov N., Samoylov O., Sotnikov A.* NOvA FEB Crosstalk measurements: тех. отч. / NOvA DocDB-11405, Fermilab. — Июнь 2014.
9. JINR stand measurements for improvements in the NOvA detector simulation chain / N. Anfimov [et al.] // JINST. — 2020. — Vol. 15, no. 06. — P. C06066. — DOI: 10.1088/1748-0221/15/06/C06066.

Список литературы

10. Methods for precise photoelectron counting with photomultipliers / R. Dossi [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2000. — Т. 451, № 3. — С. 623—637. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)00337-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00337-5). — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900200003375>.
11. *Mualet L.* Sag Measurements: тех. отч. / NOvA DocDB-13008, Fermilab. — Апр. 2015.
12. *Vinogradov S.* Evaluation of performance of silicon photomultipliers in lidar applications //. — Май 2017. — С. 102290L. — DOI: [10.1117/12.2264935](https://doi.org/10.1117/12.2264935).
13. Absolute calibration and monitoring of a spectrometric channel using a photomultiplier / E. Bellamy [и др.] // Nucl. Instr. and Meth. A. — 1994. — Т. 339. — С. 468—476. — DOI: [10.1016/0168-9002\(94\)90183-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90183-X).
14. *Neyman J.* Outline of a Theory of Statistical Estimation Based on the Classical Theory of Probability // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. — 1937. — Т. A236, № 767. — С. 333—380. — DOI: [10.1098/rsta.1937.0005](https://doi.org/10.1098/rsta.1937.0005).
15. *Feldman G. J., Cousins R. D.* A Unified approach to the classical statistical analysis of small signals // Phys. Rev. — 1998. — Т. D57. — С. 3873—3889. — DOI: [10.1103/PhysRevD.57.3873](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.57.3873). — arXiv: [physics/9711021](https://arxiv.org/abs/physics/9711021) [physics.data-an].
16. Evaluation of new large area PMT with high quantum efficiency / X.-C. Lei [и др.] // Chinese Physics C. — 2016. — Февр. — Т. 40, № 2. — С. 026002. — DOI: [10.1088/1674-1137/40/2/026002](https://doi.org/10.1088/1674-1137/40/2/026002). — URL: <https://doi.org/10.1088/1674-1137/40/2/026002>.
17. Status of the 20 inch MCP-PMT prototype development for JUNO experiment / F. Gao [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Sept. — Vol. 888. — P. 012050. — DOI: [10.1088/1742-6596/888/1/012050](https://doi.org/10.1088/1742-6596/888/1/012050).

18. Microchannel avalanche photodiode with broad linearity range / Z. Sadygov [и др.] // Technical Physics Letters. — 2010. — Июнь. — Т. 36, № 6. — С. 528—530. — DOI: 10.1134/S106378501006012X. — URL: <https://doi.org/10.1134/S106378501006012X>.
19. Zecotek Photonics inc. — URL: <http://zecotek.com>.
20. *Zecotek Photonics inc.* MAPD Whitepaper. — 2012. — URL: http://ourworkshop.ca/zecotek/wp-content/uploads/2015/08/MAPD_White_Paper_v_19__26_Jan_12_.pdf.
21. Recent developments in time-of-flight PET / S. Vandenberghe [и др.] // EJNMMI Physics. — 2016. — Февр. — Т. 3, № 1. — С. 3. — DOI: 10.1186/s40658-016-0138-3. — URL: <https://doi.org/10.1186/s40658-016-0138-3>.
22. Tests of the ECAL modules in the T9 beam at CERN PS: тех. отч. / N. Anfimov [и др.] ; COMPASS NOTE 2009-2 CERN. — Февр. 2009.
23. The design of a module of a new electromagnetic calorimeter for COMPASS II / I. Chirikov-Zorin [и др.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2014. — Май. — Т. 11. — С. 252—258. — DOI: 10.1134/S1547477114030066.