

На правах рукописи

Лубсандоржиев Баярто Константинович

**Фотоника в космомикрoфизических
экспериментах**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерных исследований РАН.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

профессор

Акимов Юрий Константинович

доктор физико-математических наук

Мерзон Габриэль Израилевич.

доктор физико-математических наук

Ростовцев Андрей Африканович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ””

Защита состоится «_____» _____ 2009 г.

в ____ часов ____ мин. на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01

Учреждения Российской академии наук Института ядерных исследований

РАН по адресу: 117312 Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института ядерных исследований РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

кандидат физико-математических наук

Б.А.Тулупов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Фотоника – наука об излучении, детектировании и распространении фотонов, получившая бурное развитие за последние 30 лет. Практически все элементы фотоники широко применяются в ядерно-физических экспериментах. Особенно активно элементы фотоники используются в экспериментах относительно новой области физики Astroparticle Physics или космомикрoфизики, как называют эту область у нас в стране. Элементы фотоники и фотонные методы используются в подавляющем большинстве современных космомикрoфизических экспериментов. Как правило, детекторы фотонов являются базовыми детектирующими элементами в этих экспериментах и зачастую используются в огромных количествах. Например, в подземном нейтринном эксперименте Super-Kamiokande используются более 13 тысяч крупногабаритных детекторов фотонов, в эксперименте по исследованию космических лучей ультра высоких энергий Pierre Auger Observatory - в общей сложности около 15 тысяч детекторов фотонов, а в таких будущих нейтринных экспериментах как Hyper-Kamiokande или MEMPHIS планируется использовать уже ~200 тысяч детекторов фотонов, подобных используемым в Super-Kamiokande. Практически во всех экспериментах, где применяются детекторы фотонов, используются и источники фотонов (лазеры, лазерные диоды, светодиоды, разрядные источники света и т.д.) для калибровки экспериментальных установок и тестирования как детекторов в целом, так и отдельных детекторных элементов. Разнообразные сцинтилляторы (твердотельные, жидкие и газовые, органические и неорганические) являются основой многих космомикрoфизических экспериментов. Различные оптические среды используются в космомикрoфизических экспериментах не только как детектирующие

вещества, но и как среды, в которых фотоны распространяются к детекторам фотонов.

Следует особо подчеркнуть, что использование элементов фотоники в таких экспериментах имеет свою яркую специфику. Действительно, только в космомикрoфизических экспериментах используются разнообразнейшие детекторы фотонов с размерами от 1 мм до 0,5 м в диаметре. Вряд ли можно найти какую-то другую область экспериментальной физики, где бы использовались такие гигантские объемы оптических сред. В качестве примера можно привести глубоководные и подледные нейтринные телескопы, просматривающие природные объемы воды и массивы льда $\geq 1 \text{ км}^3$, или детекторы космических лучей высоких и ультра высоких энергий, использующие всю толщу атмосферы в качестве рабочего вещества. Только в космомикрoфизических экспериментах используются источники фотонов с таким широким диапазоном амплитуд световых импульсов - от единичных фотонов до 10^{16} фотонов в импульсе при длительности импульсов от $\sim 10^{-11}$ с до 10^{-8} с. При этом, эти эксперименты охватывают колоссальный диапазон энергий – от долей эВ, как эксперименты по поиску темной материи и исследованию свойств нейтрино, до 10^{20} эВ и выше, как эксперименты по изучению космических лучей ультра высоких энергий. Сегодня можно уже с уверенностью говорить, что, как когда-то в 50-е годы прошлого века из недр активно развивавшейся в то время электроники выделилась ядерная электроника, так и в наши дни из не менее активно развивающейся фотоники зарождается новая область экспериментальной науки – ядерная фотоника.

Цель работы.

Целью данной диссертации была разработка и создание элементов фотоники для космомикрoфизических экспериментов: детекторов фотонов разного класса, различных наносекундных источников фотонов, калибровочных систем, а также всесторонние исследования этих детекторов

и источников фотонов, а также различных физических сред, в которых рождаются и распространяются фотоны.

Научная новизна и практическая ценность работы.

В диссертации приведены результаты работ по разработке и созданию целого ряда элементов фотоники для космомикрoфизических экспериментов. Всего в общей сложности в рамках выполнения диссертационной работы разработано и создано более 30 вакуумных фотодетекторов разного класса, ряд наносекундных источников света различной мощности. Разработаны калибровочные системы ряда экспериментов. Все эти разработки активно используются в ведущих космомикрoфизических экспериментах: в глубоководном нейтринном эксперименте на оз.Байкал, в черенковских экспериментах по исследованию первичного космического излучения ТУНКА и QUEST, в эксперименте по поиску двойного безнейтринного бета-распада GERDA.

Впервые разработаны и созданы крупногабаритные детекторы фотонов с полусферическим фотокатодом диаметром 37 см с временным разрешением ~ 1 нс (FWHM) и однофотоэлектронным разрешением $\sim 30\%$ (FWHM).

Впервые разработан и создан двухканальный оптический модуль для нейтринных телескопов следующего поколения.

Впервые измерена дисперсия света в глубинных водах оз.Байкал.

Впервые измерена кинетика свечения большой серии ультра ярких светоизлучающих диодов, основанных на структурах InGaN/GaN, при прохождении наносекундных импульсов тока большой амплитуды.

Впервые разработаны и созданы источники световых импульсов на базе InGaN/GaN светодиодов с числом фотонов в импульсе $10^{10} \div 10^{12}$ и с длительностями $\sim 1 \div 5$ нс (FWHM).

На защиту выносятся следующие основные положения:

Разработка и создание методологии измерения характеристик основных элементов фотоники, использующихся в космомикрoфизических

экспериментах: источников и детекторов фотонов, сред зарождения и распространения фотонов.

Результаты разработок и создания более 30 детекторов фотонов разного класса для космомикрoфизических экспериментов. Среди них: серия крупногабаритных вакуумных детекторов фотонов, ставших базовыми фотодетекторами в глубоководном нейтринном телескопе НТ-200 на озере Байкал, наледного черенковского детектора ШАЛ, черенковских детекторов ШАЛ ТУНКА и QUEST; серия классических фотоэлектронных умножителей “ФЭУ БАЙКАЛ” для использования в составе гибридных фотодетекторов.

Разработка и создание оптического модуля Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ-200

Разработка и создание глубоководного двухканального оптического модуля для нейтринных телескопов следующего поколения.

Разработка и создание серии крупногабаритных полусферических гибридных детекторов фотонов с временным разрешением ~ 1 нс (FWHM) и однофотоэлектронным разрешением 30% (FWHM).

Результаты предложенного и выполненного эксперимента по измерению дисперсии света в глубинных водах оз. Байкал в месте расположения глубоководного нейтринного эксперимента.

Разработка и создание калибровочных систем ряда космомикрoфизических экспериментов.

Разработку и создание серии наносекундных источников света для калибровочных измерений в черенковских и сцинтилляционных детекторах.

Результаты исследования факторов, влияющих на точность временных и амплитудных измерений с вакуумными фотодетекторами в космомикрoфизических экспериментах.

Вклад автора

По предложению автора и под его руководством разработаны и созданы более 30 детекторов фотонов различного типа для космомикрoфизических

экспериментов. Вклад автора был определяющим в разработке и создании серии модификаций детектора фотонов КВАЗАР-370, ставших базовыми фотодетекторами Байкальского глубоководного нейтринного эксперимента и эксперимента по исследованию первичного космического излучения ТУНКА, в проведении исследований разработанных фотодетекторов, в изучении свойств ультра ярких светоизлучающих диодов при прохождении импульсов тока большой амплитуды наносекундной длительности. Вклад автора был решающим в разработках и создании ряда наносекундных источников света различной мощности на основе таких диодов для различных космомикрoфизических экспериментов, в разработках и создании калибровочных систем экспериментов ТУНКА-25 и QUEST. Автором предложены методы исследования, отбора и тестирования фотодетекторов для различных космомикрoфизических экспериментов.

Апробация работы.

Результаты исследований докладывались на Российской и международных конференциях по космическим лучам в Москве, 1994, Дурбане, ЮАР, 1997, Гамбурге, Германия, 2001; на международных конференциях по новым тенденциям в фотодетектировании в Боне, Франция, 1999, 2005, и Акс-ле-Бане, Франция, 2008; на международных конференциях по фотодетекторам в Берлине, Германия, 1998, Париже, Франция, 2000, Эйлате, Израиль, 2006, Замке Рингберг, Германия, 2007; на международной конференции “Advanced Technology & Particle Physics” в Комо, Италия, 2001; на международных конференциях RICH2002 в Пилосе, Греция, 2002, RICH2004 в Плайя дель Кармен, Мексика, 2004, RICH2007 в Триесте, Италия, 2007; на международной конференции по нейтринным телескопам VLVnT2008 в Тулоне, Франция, 2008.

Под научным руководством автора в рамках выполнения данной диссертационной работы выполнены и защищены 3 кандидатские диссертации.

Публикации. Всего по материалам диссертации опубликовано 71 статья в реферируемых журналах и 37 статей в трудах конференций.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 247 страниц текста, включая 115 рисунков и 11 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 201 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показывается, что элементы фотоники играют огромную роль в современных космофизических экспериментах и по существу формируется новая область экспериментальной науки – ядерная фотоника, объединяющая все элементы фотоники и фотонные методы, используемые в ядерно-физических экспериментах. Обсуждается актуальность, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы. Приводятся основные положения, которые выносятся на защиту, и сведения о том, как данная диссертация прошла апробацию.

В первой главе диссертации описываются крупногабаритные детекторы фотонов серии КВАЗАР, разработанные для глубоководных нейтринных экспериментов. На рис. 1 показан эскиз детектора фотонов КВАЗАР-370У, который в настоящее время является базовым фотодетектором Байкальского глубоководного нейтринного телескопа. Данный детектор фотонов является гибридным вакуумным фотодетектором, состоящим из электронно-оптического предусилителя света с полусферическим фотокатодом диаметром 37 см и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) классического типа с фотокатодом малого диаметра (~3 см). Такой подход позволяет получить прекрасные временные и амплитудные параметры всего фотодетектора в целом: разброс времени пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода составляет $1,8 \div 2,2$ нс (FWHM) и однофотоэлектронное разрешение – $70 \div 80\%$ (FWHM). Конструкция детектора фотонов КВАЗАР-370У обеспечивает его чувствительность в телесном угле $\sim 2\pi$, при этом

уровень неоднородности анодной чувствительности фотодетектора по всему чувствительному полю фотокатода не превышает 10%.

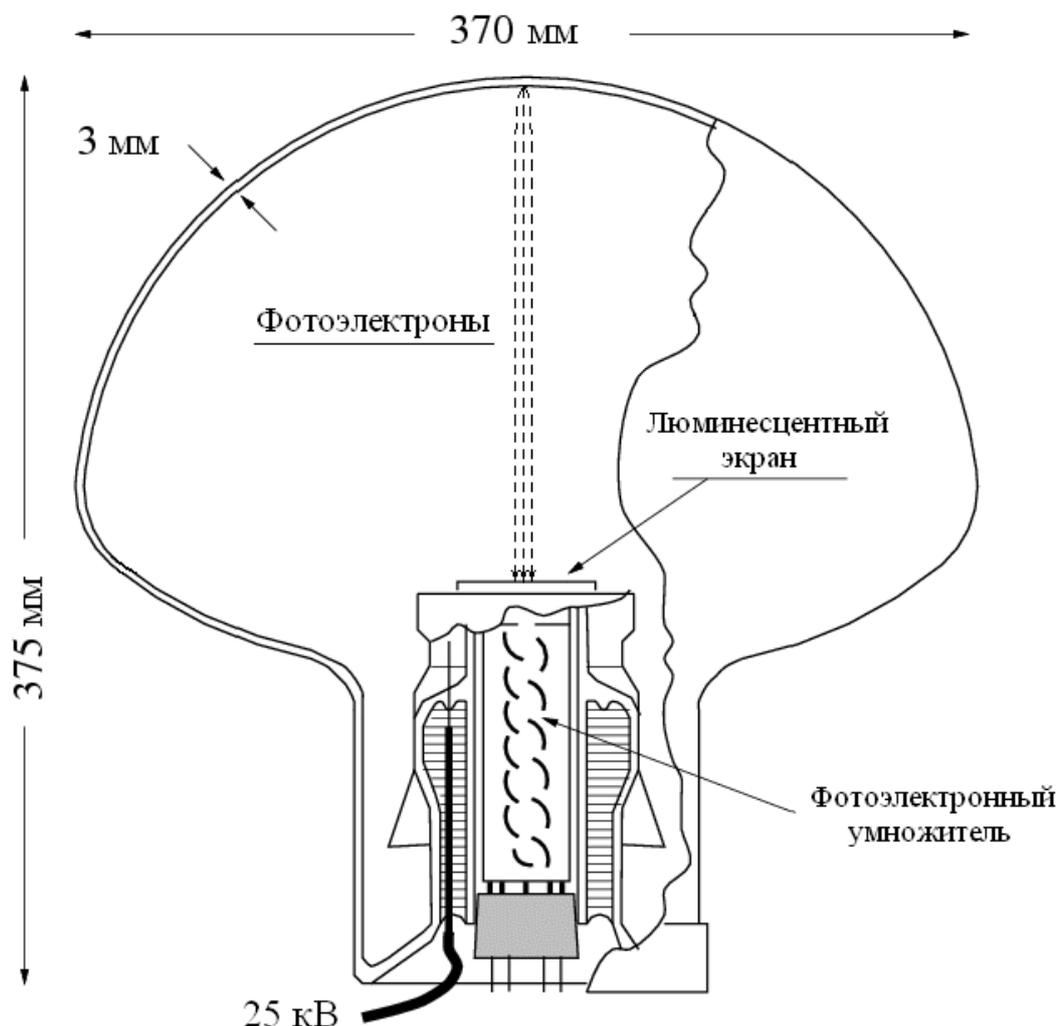


Рис. 1. Детектор фотонов КВАЗАР-370У.

На базе детектора фотонов КВАЗАР-370У в сотрудничестве с рядом отечественных предприятий и институтов был разработан и создан оптический модуль Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ-200. На рис. 2 представлен эскиз оптического модуля. Защитный стеклянный корпус модуля выполнен из боросиликатного безкалиевого стекла С-49-1. Такой глубоководный защитный корпус используется для всех глубоководных модулей нейтринного телескопа НТ-200: как оптических

модулей, так и модулей электроники. Оптический контакт детектора фотонов КВАЗАР-370У с защитной стеклянной сферой осуществляется при помощи химически чистого глицерина или оптического геля. Подготовка и сборка глубоководных модулей требует особой тщательности для обеспечения высокой надежности модулей. Разработанная и хорошо отлаженная методика позволяет подготовить и собрать глубоководный модуль нейтринного телескопа НТ-200 за ~ 20 мин. Нейтринный телескоп НТ-200 состоит из 192 оптических модулей, закрепленных на 7 гирляндах. Телескоп, расположенный в южной части оз.Байкал на расстоянии ~4 км от берега на глубине 1150 м, успешно функционирует с апреля 1998 г.

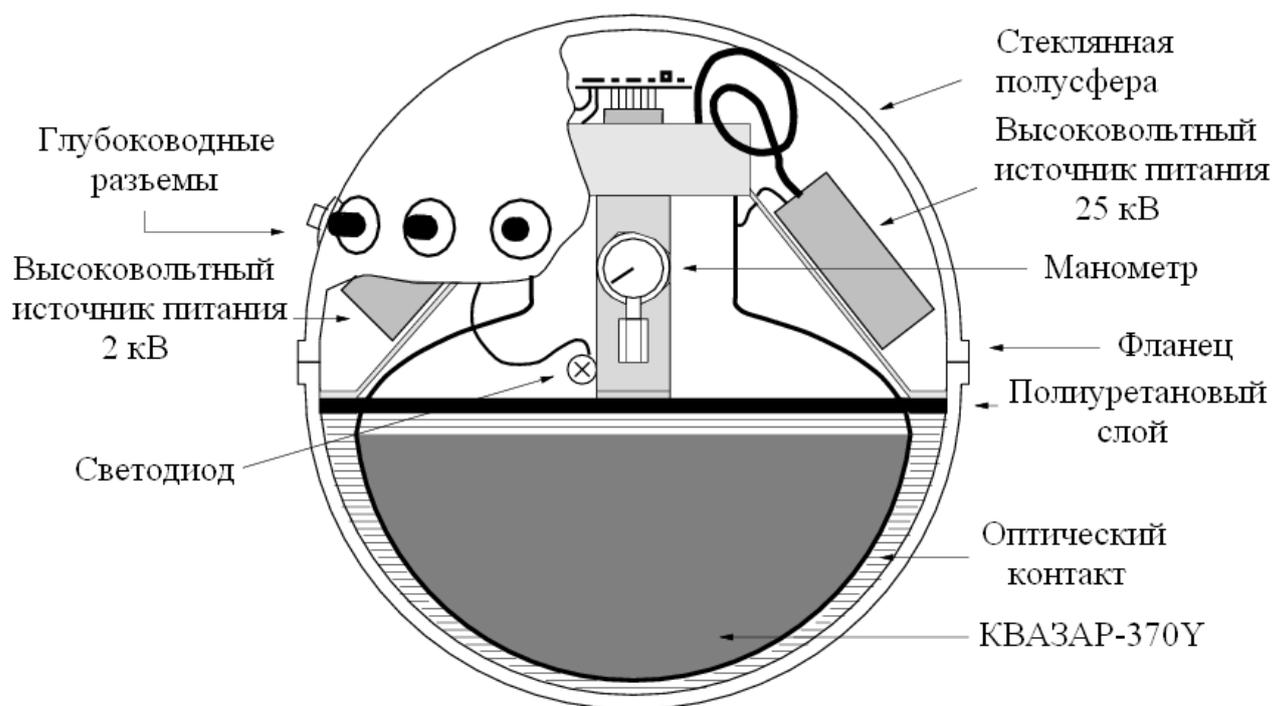


Рис. 2. Оптический модуль Байкальского нейтринного телескопа НТ-200

Руководствуясь физическими и конструкционными особенностями детектора фотонов КВАЗАР-370У, в ИЯИ РАН совместно с ОАО МЭЛЗ была разработана и создана серия фотоэлектронных умножителей “ФЭУ-Байкал-1” на базе серийного ФЭУ-115. Фотоумножители “ФЭУ-Байкал-1” имеют стеклооболочку с внешним диаметром 30 мм при минимальном рабочем

диаметре фотокатода 25 мм. В этой серии ФЭУ используются K_2CsSb и Na_2KCsSb фотокатоды, имеющие в диапазоне длин волн $\lambda = 400\div 450$ нм максимум спектральной чувствительности. Применение в качестве материала входного окна стекла марки УТ-88 и кристаллов MgF_2 обеспечивает область спектральной чувствительности фотокатодов этой серии ФЭУ – $150\div 700$ нм. В данных ФЭУ используются 10-, 11- и 13-каскадные ковшеобразные диодные системы с жесткими или гибкими выводами, а сами диоды изготовлены либо из сплава Al-Mg-Ti-Sr либо имеют напыленный состав $CsSb_3$. Отношение пик/долина зарядовых распределений однофотозлектронных импульсов составляет $1.3\div 1.5$. Время нарастания импульса анодного тока - ~ 2 нс. Разброс времен пролета фотоэлектронов при однофотозлектронной засветке фотокатода - ~ 1.6 нс (FWHM).

В целях улучшения параметров детектора фотонов КВАЗАР-370 были разработаны и созданы ряд его модификаций. Эти модификации связаны, в первую очередь, с использованием новых сцинтилляционных материалов в составе люминесцентного экрана детектора фотонов КВАЗАР-370. Наилучшие результаты на сегодняшний день достигаются в модификациях с сцинтилляторами YAP, SBO и LSO (КВАЗАР-370YAP, КВАЗАР-370SBO, КВАЗАР-370LSO): временное разрешение при однофотозлектронной засветке $\sim 1\div 1,2$ нс (FWHM) и однофотозлектронное разрешение $\sim 30\div 40\%$ (FWHM). Эти детекторы фотонов наиболее полно на сегодняшний день отвечают требованиям к фотодетекторам для нейтринных телескопов следующего поколения. На рис. 3а показаны зависимости разброса времен пролета фотоэлектронов при однофотозлектронной засветке фотокатода от ускоряющего напряжения для различных модификаций детектора фотонов КВАЗАР-370. Для детектора фотонов КВАЗАР-370LSO разброс времен пролета фотоэлектронов составляет ~ 1 нс (FWHM). Зарядовое распределение

многофотоэлектронных импульсов фотодетектора КВАЗАР-370LSO показано на рис. 3б. (FWHM).

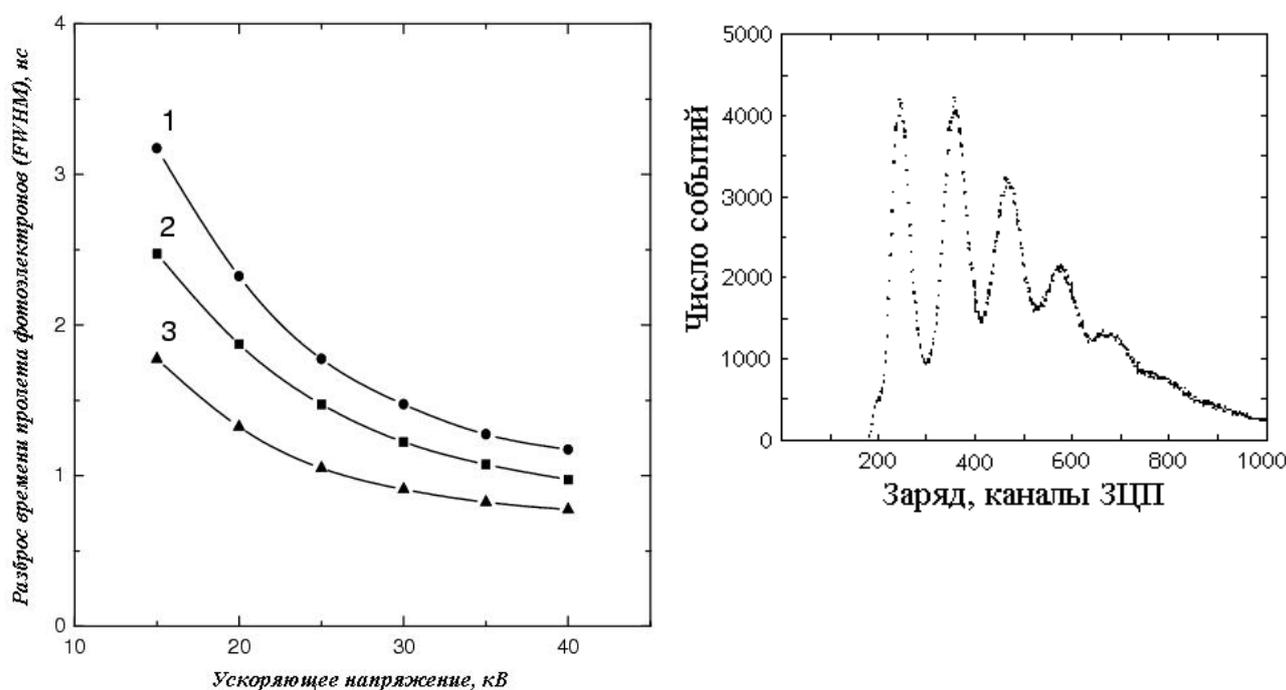


Рис. 3. а) Зависимость разброса времени пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода от ускоряющего напряжения для различных модификаций детектора фотонов КВАЗАР-370. 1 – КВАЗАР-370У; 2 – КВАЗАР-370SBO; 3 – КВАЗАР-370LSO. б) Зарядовое распределение многофотоэлектронных импульсов фотодетектора КВАЗАР-370LSO.

Еще один вид модификаций детектора фотонов КВАЗАР-370 связан с созданием крупногабаритных многоканальных фотодетекторов для нейтринных телескопов следующего поколения. Существующие проекты будущих нейтринных телескопов предполагают многократное увеличение числа базовых фотодетекторов. Таким образом, общая стоимость фотодетекторов становится одной из основных проблем в осуществлении таких проектов. Использование многоканальных фотодетекторов позволило бы не только уменьшить общую стоимость фотодетекторов, но и повысить информативность индивидуальных оптических модулей нейтринных

телескопов. Руководствуясь данными соображениями, был разработан и создан двухканальный оптический модуль, основанный на двухканальной модификации детектора фотонов КВАЗАР-370 – КВАЗАР-370-II. Основным элементом этой модификации являются двухканальные фотоэлектронные умножители серии “ФЭУ-Байкал-2”, разработанные в ИЯИ РАН совместно с ОАО МЭЛЗ для использования именно в составе двухканальных детекторов фотонов КВАЗАР-370-II.

Временное разрешение вакуумных фотодетекторов играет важную роль в космомикрорфизических экспериментах. Основными факторами, влияющими на точность временных измерений с вакуумными фотодетекторами, являются предимпульсы, задержанные импульсы и послеимпульсы. Задержанные импульсы – это те же основные импульсы, но задержанные на примерно двойное время пролета фотоэлектрона в катодной камере. В этом их принципиальное отличие от послеимпульсов. Возникновение задержанных импульсов объясняется обратным, упругим или неупругим, отражением фотоэлектронов от первого динода, фокусирующих электродов или элементов конструкции ФЭУ. Вероятность появления задержанных импульсов не превышает ~3-4%. Такие же задержанные события наблюдаются в фотоумножителях с микроканальными пластинами (ФЭУ-МКП) и гибридных вакуумных фотодетекторах. В детекторах фотонов КВАЗАР-370 предимпульсы практически отсутствуют, а вклад задержанных импульсов и послеимпульсов существенно подавлен в силу конструктивных особенностей детектора.

Таким образом, детекторы фотонов КВАЗАР-370 обладают временными и амплитудными характеристиками, сравнимыми с параметрами лучших малогабаритных ФЭУ. Практически отсутствуют предимпульсы, а вероятности появления задержанных импульсов и послеимпульсов существенно подавлены по сравнению с ФЭУ классического типа. Высокая однородность анодной чувствительности этих детекторов фотонов

достигается в широком телесном угле ($\sim 2\pi$). Наконец, характеристики детекторов фотонов КВАЗАР-370 не зависят от магнитного поля Земли. Все вышперечисленное делает эти детекторы фотонов наиболее близкими к идеальному фотодетектору для гигантских нейтринных детекторов следующего поколения, активно обсуждающихся в последнее время.

Во второй главе представлены детекторы фотонов, разработанные для экспериментов в физике космических лучей. Для широкоугольных черенковских детекторов широких атмосферных ливней (ШАЛ) был разработан гибридный вакуумный детектор фотонов КВАЗАР-370G. Данный фотодетектор представляет собой специальную модификацию детектора фотонов КВАЗАР-370. Основным отличием этой модификации является использование нового сцинтиллятора $Y_2SiO_5:Ce+BaF_2$ в люминесцентном экране детектора фотонов и применение специализированного ФЭУ, разработанного именно для таких приложений в ИЯИ РАН совместно с ОАО МЭЛЗ. Была разработана целая серия этих ФЭУ - “ФЭУ-ТУНКА” с малым числом каскадов умножения ($6\div 8$) и с повышенным максимально допустимым постоянным анодным током (~ 250 мкА). Небольшое добавление ($\sim 2\div 3\%$ по весу) BaF_2 в сцинтиллятор $Y_2SiO_5:Ce$ приводит к значительному улучшению его радиационной и химической стойкости без существенного ухудшения его сцинтилляционных параметров.

Детектор фотонов КВАЗАР-370G стал базовым фотодетектором таких экспериментов как наледный черенковский детектор ШАЛ, созданный для изучения углового разрешения Байкальского нейтринного телескопа НТ-200, эксперименты ТУНКА-25 и QUEST для исследования первичного космического излучения в области энергий $\sim 10^{14}\div 10^{17}$ эВ. Основным элементом оптических пунктов этих экспериментов является детектор фотонов Квазар-370G, размещенный в специальном контейнере (рис. 4а). Кроме детектора фотонов Квазар-370G с высоковольтными источниками

питания в контейнере устанавливаются светодиод для амплитудной калибровки, делитель напряжения питания ФЭУ и предусилитель анодных импульсов ФЭУ. Для увеличения эффективной площади детектора фотонов используются конусные концентраторы света, изготовленные из алюминированного пластика. Все эти эксперименты работают в условиях светового фона ночного неба, приводящего к высоким значениям постоянного анодного тока детекторов фотонов. Поэтому используется активный делитель напряжения питания ФЭУ, обеспечивающий стабильность коэффициента усиления ФЭУ в широком диапазоне изменения светового фона ночного неба.

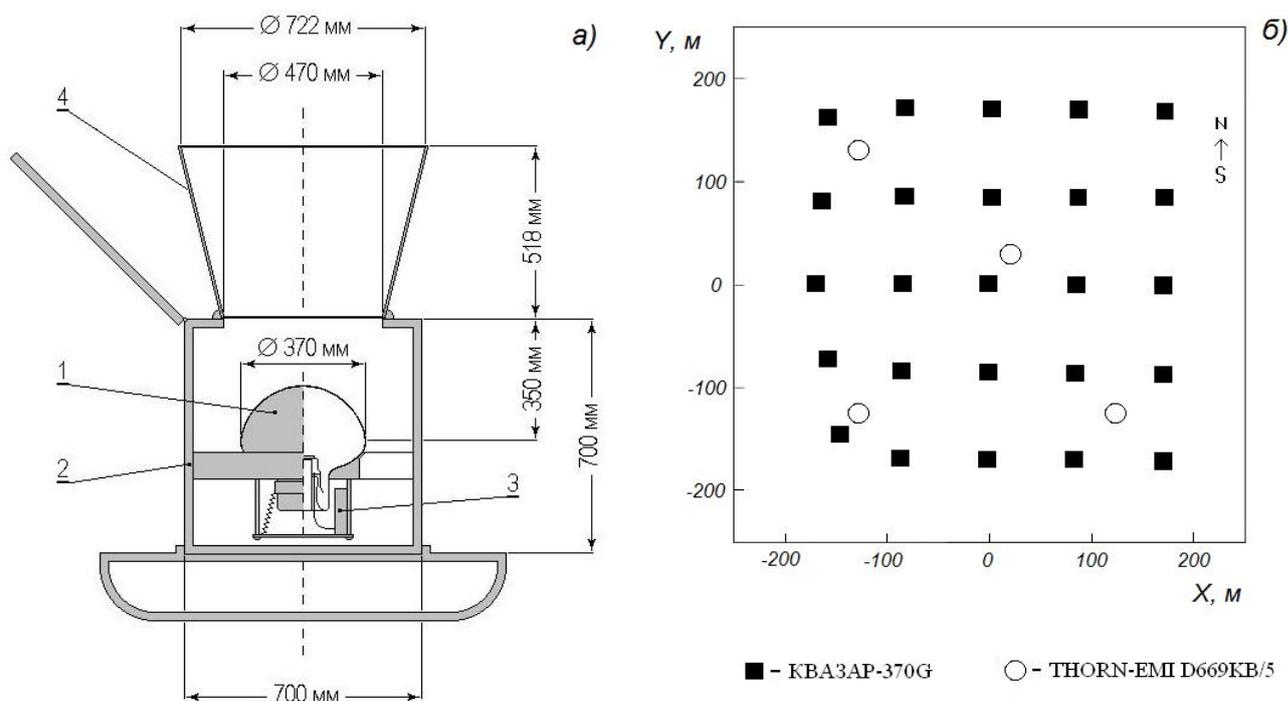


Рис. 4. Оптический модуль черенковского детектора широких атмосферных ливней на основе детектора фотонов КВАЗАР-370G (а). Схема расположения черенковского детектора широких атмосферных ливней ТУНКА-25 (б).

Детектор ТУНКА-25 расположен в Тункинской долине Республики Бурятия в 3 км от пос. Торы и в 50 км от южной оконечности оз. Байкал. Детектор состоит из 25 основных и 4 дополнительных оптических пунктов,

рис. 4б. Основные оптические пункты в детекторе ТУНКА равномерно распределены в квадрате $340 \times 340 \text{ м}^2$, расстояние между ближайшими пунктами составляет 85 м. Условием выработки триггерного сигнала установки является срабатывание любых четырех основных оптических пунктов во временном окне 1 мкс. Энергетический порог детектора - $200 \div 300 \text{ ТэВ}$. Четыре дополнительных оптических пункта созданы для регистрации формы черенковского излучения ШАЛ. Они основаны на быстрых фотоэлектронных умножителях Thorn-EMI D668 с полусферическим фотокатодом диаметром $\sim 20 \text{ см}$.

Временной отклик основных оптических пунктов и детекторной электроники определяют угловое разрешение всей установки. Исследование влияния светового фона ночного неба и его флуктуаций на временной отклик основных оптических пунктов и детекторной электронной системы показывает, что смещение временной отметки, вырабатываемой фотодетектором и электронной системой установки, и изменение их суммарного временного разрешения не превышают 0.2 нс при изменении среднего постоянного анодного тока фотодетектора в пределах $0 \div 100 \text{ мкА}$. При этом средний анодный ток фотодетекторов в установке ТУНКА составляет $\sim 30 \text{ мкА}$. Кроме этого, в эксперименте ТУНКА с применением детектора фотонов КВАЗАР-370G достигается высокая линейность при измерении амплитуд сигналов (вплоть до $5 \times 10^4 \text{ ф.э.}$), что позволяет вести исследования первичного космического излучения в диапазоне энергий $10^{14} \div 10^{17} \text{ эВ}$.

Использование детекторов фотонов КВАЗАР-370G позволяет проводить исследования первичных космических лучей в области излома их энергетического спектра. Детекторы фотонов КВАЗАР-370G это самые большие фотодетекторы, когда-либо использовавшиеся в черенковских детекторах ШАЛ, а эксперимент ТУНКА единственный эксперимент в этой

области, применяющий гибридные детекторы фотонов. Успешная эксплуатация детекторов фотонов КВАЗАР-370G в эксперименте ТУНКА на протяжении более 15 лет в довольно суровых (до -40°C в зимнее и до $+35^{\circ}\text{C}$ в летнее время) климатических условиях показывает высокие амплитудные и временные характеристики и высокую надежность этих детекторов фотонов.

Для повышения устойчивости к световому фону ночного неба и улучшения быстродействия классических ФЭУ, разработанных для детекторов широких атмосферных ливней, в настоящее время в мировой практике существует тенденция уменьшения числа каскадов умножения, как в “ФЭУ-ТУНКА”. Соответствующее пониженное усиление ФЭУ ($\sim 10^4 \div 10^5$) компенсируется использованием быстродействующих трансимпедансных усилителей с высоким коэффициентом усиления.

Разработанный для использования в камерах изображения атмосферных телескопов гамма-квантов высоких энергий быстрый координатно-чувствительный детектор фотонов КАМЕРА представляет собой гибридный вакуумный фотодетектор с прямой фокусировкой и люминесцентным экраном. Для считывания анодных импульсов данного фотодетектора возможно использование малогабаритных ФЭУ или лавинных фотодиодов. Такой подход позволяет получить довольно хорошее пространственное разрешение $\sigma \leq 1$ мм и временное разрешение на уровне временного разрешения фотодетекторов КВАЗАР. Разработанные для флуоресцентных детекторов ШАЛ фотоэлектронные умножители ФЭУ-1984U и ФЭУ-184UM характеризуются хорошей чувствительностью в ультрафиолетовой области спектра и высокой устойчивостью к световому фону ночного неба.

В третьей главе описываются излучатели фотонов, разработанные для использования в различных космофизических экспериментах. Эти источники созданы с использованием ультра ярких синих и ультрафиолетовых светодиодов на основе соединений InGaN/GaN.

Для тестовых и калибровочных измерений в космомикрорфизических экспериментах была разработана серия наносекундных источников света на основе синих ультра ярких светодиодов. На сегодняшний день существуют два типа наиболее эффективных формирователей импульсов запуска светодиодов, обеспечивающих мощные и быстрые световые импульсы. Первый из них основан на разряде конденсатора через комплементарную пару быстродействующих транзисторов. Максимальный световыход составляет $10^6 \div 10^8$ фотонов в импульсе при использовании ультра ярких ультрафиолетовых, синих и зеленых светодиодов. При этом, длительность выходных импульсов составляет $\sim 0,7 \div 2,7$ нс.

Для получения большего световыхода источников приходится использовать формирователи на лавинных транзисторах. На базе лавинных транзисторов и ультра ярких синих светодиодов удается создать источники световых импульсов с числом фотонов в импульсе 10^9 и длительностью импульса $1 \div 2$ нс. При использовании ультра ярких светодиодов NICHIA, KINGBRIGHT, G-pog и др. (например, NSPB500S, L-53NBC и GNL3014BC) с такими формирователями импульсов запуска удалось разработать мощные, стабильные источники световых импульсов наносекундной длительности с частотой повторения импульсов от одиночных импульсов и вплоть до 10 МГц. Исследования долговременной стабильности таких источников света показывают, что интенсивность и длительность световых импульсов источников практически не изменяются при полном числе импульсов источника $\sim 10^{10}$ и выше, при этом уровень флуктуаций световыходов источников не превышает 1%, рис. 5а и 5б. Температурный коэффициент изменения световыходов источников в диапазоне температур $-5 \div +50^\circ\text{C}$ составляет $\sim (0,14 \div 0,18)\% / ^\circ\text{C}$. Длительность же световых импульсов источников остается практически неизменной в этом температурном диапазоне.

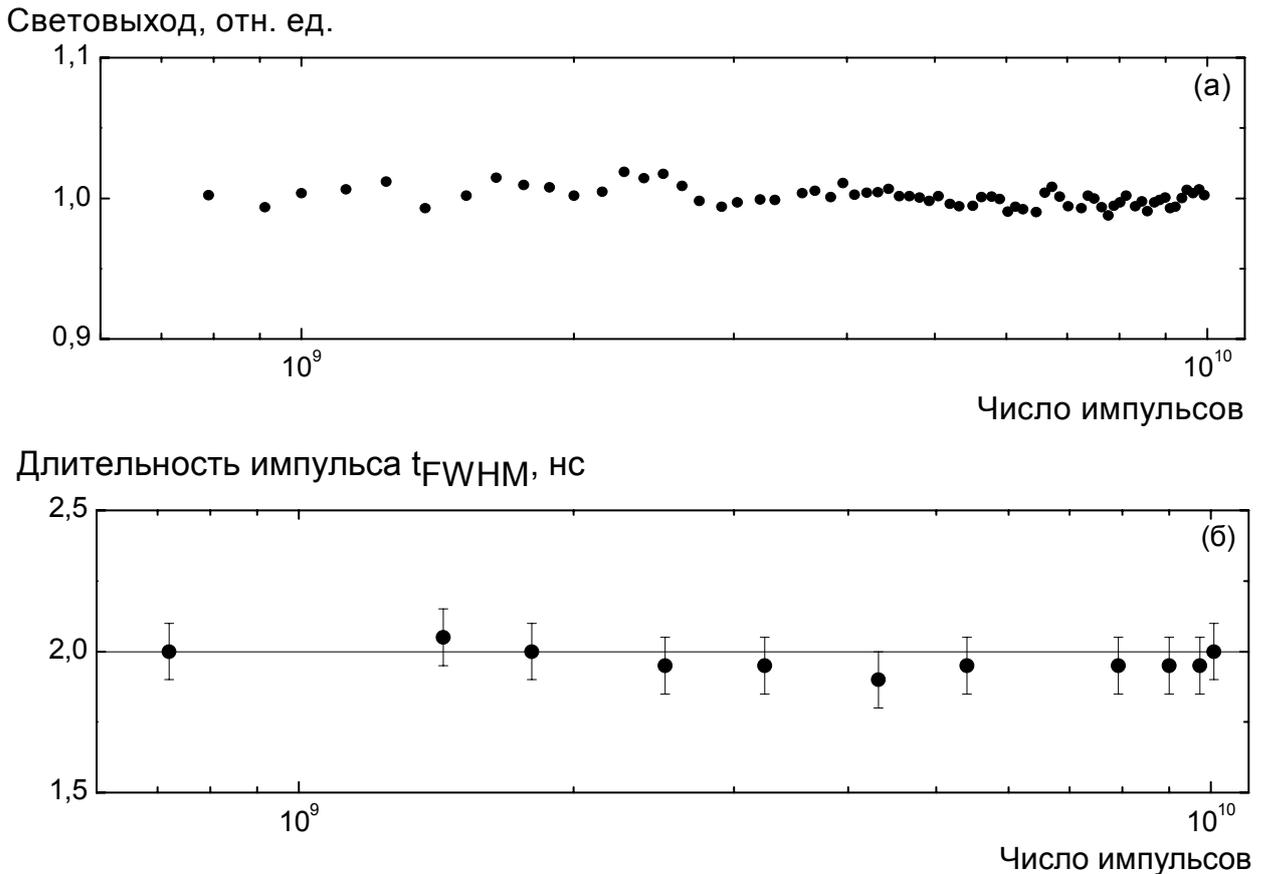


Рис. 5. Зависимости световыхода (а) и длительности импульсов (б) наносекундного источника света, основанного на лавинных транзисторах, от полного числа импульсов источника. Светодиод – ультра яркий синий светодиод NSPB300S. Амплитуда наносекундных импульсов тока через светодиод – 2,2 А.

С помощью формирователя импульсов запуска на лавинных транзисторах была исследована кинетика свечения более 1000 образцов ультра ярких синих, фиолетовых и ультрафиолетовых светодиодов различных марок при прохождении через них наносекундных импульсов тока с амплитудой $\sim 2,2$ А. Следует отметить, что при таких больших импульсных токах в спектрах излучения ультра ярких синих светодиодов появляется быстрая коротковолновая компонента, в ультрафиолетовых светодиодах - медленная длинноволновая компонента с постоянной времени высвечивания $\sim 4-5$ мкс.

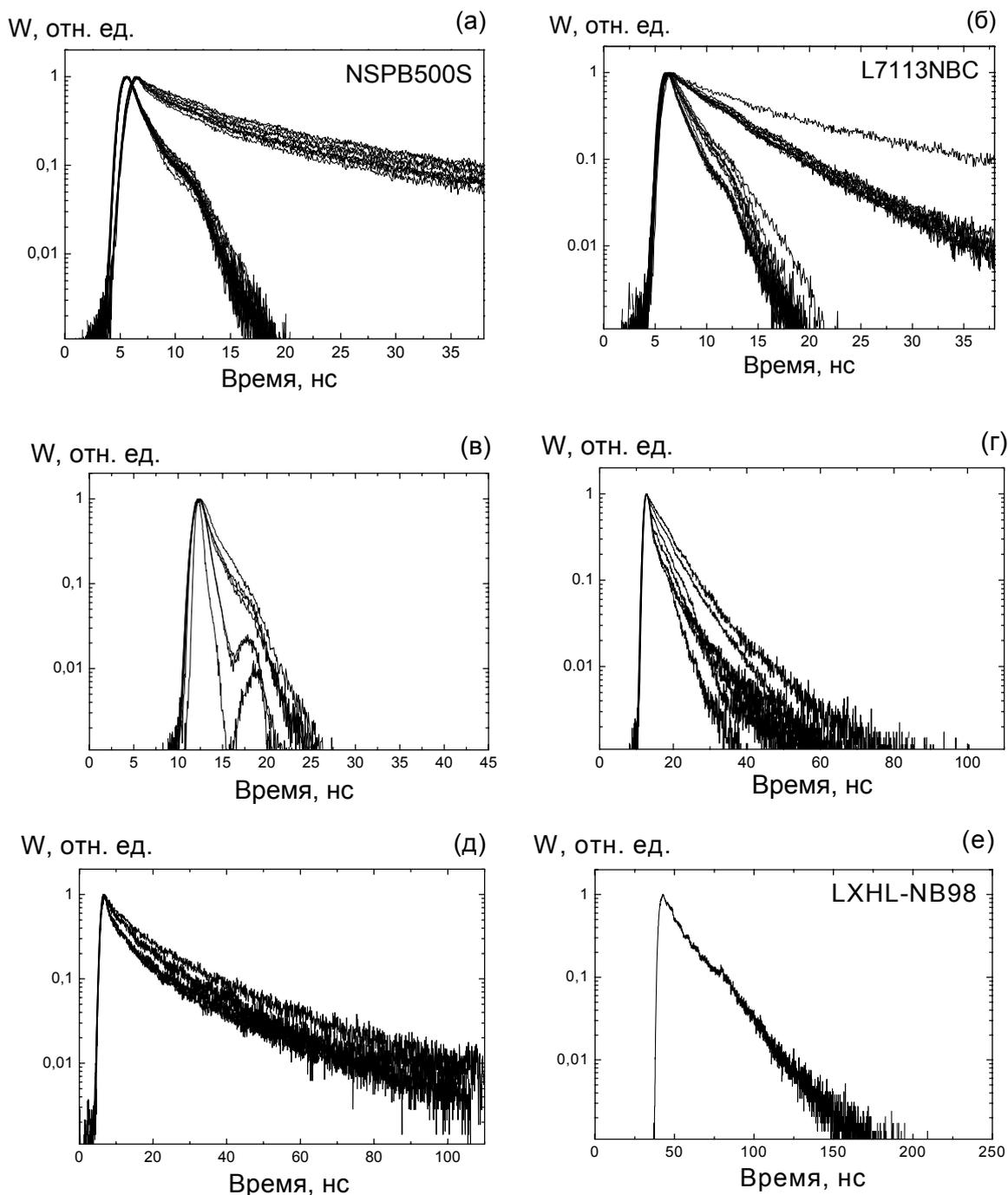


Рис. 6. Типовые формы световых импульсов наносекундных источников света, использующих различного типа ультра яркие синие светодиоды из соединений InGaN/GaN. а) NSPB500S. Светодиоды этого типа разделяются на две группы –медленную и быструю. б) L7113NBC. Светодиоды этого типа также подразделяются на медленную и быструю. в) “быстрые” светодиоды. г) “промежуточные” светодиоды. д) “медленные” светодиоды. е) светодиод высокой мощности LXHL-NB98 с яркостью ~200 кд.

На рис. ба-д показаны наиболее типичные формы световых импульсов ультра ярких синих, фиолетовых и ультрафиолетовых светодиодов. Световые

импульсы этих светодиодов имеют самые разнообразные формы. Даже среди светодиодов одной марки выделяются группы светодиодов, демонстрирующие совершенно разную кинетику свечения, например, светодиоды NSPB500S фирмы NICHIA и L-53NBC фирмы KINGBRIGHT, рис. 6а и 6б соответственно. Еще большее разнообразие кинетики свечения показывают светодиоды GNL3014BC, среди которых выделены образцы с самой быстрой кинетикой свечения: длительности световых импульсов источников на их основе составляет <1 нс при световых выходе источников $\sim 10^9$ фотонов в импульсе, при этом, медленная компонента у этих светодиодов отсутствует полностью. Все исследованные светодиоды можно разделить на три группы: “быстрые”, рис. 6в, “промежуточные”, рис. 6г, и “медленные”, рис. 6д. На рис. 6е показана форма светового импульса светодиода LXHL-NB98 высокой мощности с яркостью ~ 200 кд.

Объединение светодиодов в матрицы позволяет значительно увеличить световых выход источников света. При этом возможно два варианта – а) для каждого светодиода в матрице используется свой формирователь импульсов запуска; и б) все светодиоды матрицы запускаются от одного формирователя запуска. В обоих случаях тонкой регулировкой параметров формирователей импульсов запуска и тщательным подбором светодиодов с близкими параметрами удается достичь хорошего уровня одновременности срабатывания светодиодов матрицы. Удастся также достичь высокой степени идентичности кинетики свечения индивидуальных светодиодов матрицы. Форма светового сигнала всей матрицы практически не отличается от форм сигнала отдельных светодиодов матрицы. При использовании матриц светодиодов световых выход источников достигает $\sim 10^{10}$ и более фотонов в импульсе, при этом длительность импульсов остается такой же, как у отдельных светодиодов матрицы – $1 \div 2$ нс. Применение светодиодов высокой мощности позволяет получить источники с числом фотонов в импульсе $\sim 10^{12}$ при длительности импульса ~ 5 нс (FWHM).

Четвертая глава посвящена различным средам, в которых рождаются и распространяются фотоны – это сцинтилляторы, оптоволоконные кабели, спектросмещающие пленки и т.д..

Временное разрешение детектора фотонов КВАЗАР-370 определяется выражением:

$$W(t) \sim \exp(-(G/\tau)t), \quad (1)$$

где G - коэффициент усиления предусилителя света детектора фотонов, а τ - время высвечивания сцинтиллятора в люминесцентном экране детектора фотонов. В свою очередь, величина G – определяется соотношением:

$$G = Y(E_e) \cdot \xi \cdot \eta_e, \quad (2)$$

где $Y(E_e)$ – число фотонов, рожденных в сцинтилляторе фотоэлектроном с энергией E_e , ξ - коэффициент сбора фотонов на фотокатод ФЭУ детектора фотонов, η_e – эффективная квантовая эффективность ФЭУ. С учетом соотношений (1) и (2) работа по улучшению временного и амплитудного разрешения детектора фотонов КВАЗАР-370 была направлена на поиск сцинтилляционных материалов с возможно большим световыходом и меньшим временем высвечивания. К тому же, сцинтилляторы должны удовлетворять требованиям, возникающим из технологии производства детекторов фотонов КВАЗАР: длительные (порядка нескольких часов) нахождение при высоких температурах ($\sim 400^\circ\text{C}$) и пребывание в атмосфере паров щелочных металлов и, наконец, вакуумная совместимость. Таким требованиям отвечают только ряд неорганических сцинтилляторов.

Как было уже упомянуто выше, наилучшие результаты достигнуты с сцинтилляторами $\text{LSO}(\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce})$, $\text{YAP}(\text{YAlO}_3:\text{Ce})$ и $\text{SBO}(\text{ScBO}_3:\text{Ce})$. Самые лучшие временное и однофотоэлектронные разрешения, ~ 1 нс (FWHM) и 30% (FWHM) соответственно, достигается с монокристаллическим сцинтиллятором $\text{LSO}(\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce})$ (КВАЗАР-370LSO). Следует отметить, что весьма перспективным является сцинтиллятор SBO

(ScBO₃:Ce), обладающий достаточно высоким световыходом, временем высвечивания $\sim 27 \div 30$ нс и малым значением величины эффективного атомного номера ($Z_{\text{eff}} \sim 17$). Сцинтиллятор SBO синтезируется в виде порошкового люминофора и обладает повышенной химической устойчивостью, что делает его технологически весьма привлекательным для использования в детекторе фотонов КВАЗАР-370.

Еще одним интересным элементом фотоники являются тонкопленочные сместители спектра на полимерной основе, наносимые на фотокатоды фотодетекторов для увеличения их чувствительности к черенковскому свету. Высокая прозрачность глубинного антарктического льда и чистой воды, применяющейся в подземных черенковских детекторах, позволяет эффективно использовать такие пленки. Для оптических модулей подледного телескопа AMANDA была разработана спектросмещающая пленка на основе сополимера этилметакрилата Paraloid B72 с добавкой 5% Butyl PBD и 0.1% PPOP. Нанесение такой пленки на поверхность оптического модуля повышает чувствительность модуля к черенковскому свету на 48%.

Для натуральных испытаний образцов новых разработок фотодетекторов, детекторной электроники и для отработки новых методов детектирования была разработана и создана многоцелевая глубоководная экспериментальная гирлянда. В рамках работ с экспериментальной гирляндой был предложен, подготовлен и выполнен эксперимент по измерению дисперсии света в глубинных водах оз. Байкал в месте расположения нейтринного телескопа НТ-200. Использовались светодиодные источники света на трех длинах волн 370 нм, 470 нм и 520 нм. Длительность импульсов составляла ~ 1 нс. Число фотонов в одном импульсе - $\sim 10^8 \div 10^9$. Измеренные значения групповой скорости света составляют: $V_{\text{гр}} = (2,148 \pm 0,010) \cdot 10^8$ м/с для $\lambda = 370 \pm 6$ нм, $V_{\text{гр}} = (2,193 \pm 0,009) \cdot 10^8$ м/с для $\lambda = 470 \pm 11$ нм и $V_{\text{гр}} = (2,206 \pm 0,009) \cdot 10^8$ м/с для $\lambda = 520 \pm 17$ нм. На рис. 7а представлены расчетные кривые зависимостей

группового и фазового показателей преломления воды и экспериментальные значения группового показателя преломления, полученные из измеренных значений групповой скорости света. Как видно из рисунка, наблюдается достаточно хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных. На рис. 7б показаны зависимости временной задержки фотонов, обусловленной различием групповой и фазовой скоростей света, от расстояния до точечного источника фотонов для разных длин волн. На расстоянии ~ 100 м задержка фотонов с $\lambda=370$ нм от фотонов с $\lambda=520$ нм составляет ~ 8 нс.

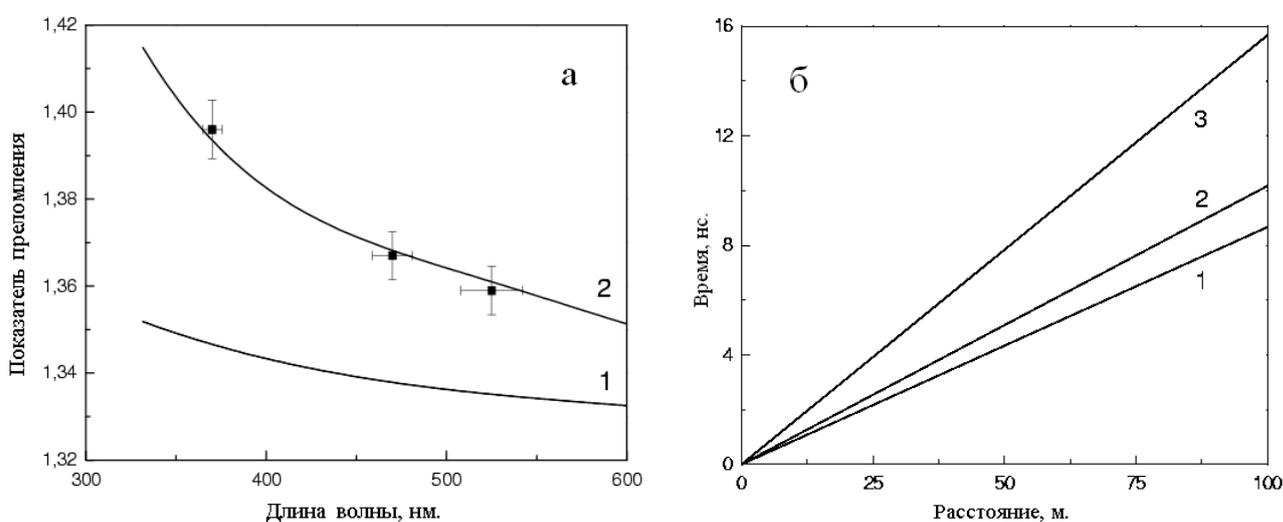


Рис. 7. а) – Зависимость группового (кривая 1) и фазового (кривая 2) показателей преломления воды от длины волны; точки – экспериментально измеренные значения группового показателя преломления глубинных вод озера Байкал в месте расположения нейтринного телескопа НТ-200. б) – Зависимость временной задержки, обусловленной различием групповой и фазовой скорости света, для фотонов разных длин волн от расстояния до точечного источника фотонов; 1 – для 520 нм; 2 – 470 нм; 3 – 370 нм.

Элементы фотоники, разработанные для использования в калибровочных системах космомикрофизических экспериментов описываются в пятой главе диссертации. Калибровочные системы экспериментов ТУНКА-25, QUEST и наледного черенковского детектора широких атмосферных ливней состоят из наносекундного источника света и пластикового оптоволоконного кабеля на основе полиметилметакрилата длиной ~ 220 м. Источник света располагается

в центральном электронном пункте детектора. В этом источнике света используется формирователь импульсов запуска на основе двух последовательно включенных лавинных транзисторов и одного ультра яркого синего светодиода. Для временной калибровки детектора каждый оптический пункт детектора последовательно засвечивается от одного и того же источника световыми импульсами длительностью $\sim 1\div 2$ нс (FWHM) через один и тот же оптоволоконный кабель. Измеряются времена срабатывания отдельных оптических пунктов, при этом триггерным сигналом является синхронизирующий импульс наносекундного источника света.

Для калибровки черенковского детектора мюонного вето эксперимента по поиску двойного безнейтринного бета-распада GERDA предложена система, состоящая из двух частей. В первой части оптические модули детектора засвечиваются от одного наносекундного источника света через систему пластиковых оптоволоконных кабелей, к каждому модулю подводится отдельный кабель. Источник света основан на быстром ультра ярком синем светодиоде. Длительность световых импульсов источника составляет $\sim 2,2$ нс, а амплитуда световых импульсов регулируется в диапазоне $0\div 10^8$ фотонов в импульсе. Во второй части системы засветка оптических модулей детектора осуществляется через воду. Для этого в объеме детектора устанавливаются 4 диффузных рассеивателя света, к которым подводятся световые импульсы от второго источника света с помощью таких же оптоволоконных кабелей, как в первой части системы. В этом случае источник света использует синий светодиод высокой мощности. Длительность световых импульсов источника – 5 нс (FWHM). Амплитуда световых импульсов соответствует $\sim 10^{12}$ фотонов в импульсе.

В заключении приводятся основные выводы диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и создана методология измерения характеристик основных элементов фотоники, использующихся в космомикрорфизических

экспериментах: источников и детекторов фотонов, физических сред, в которых рождаются и распространяются фотоны. Для этого разработана, создана и эксплуатируется серия измерительных стендов, что позволяет активно сотрудничать с промышленностью в разработках практически всех элементов фотоники для космомикрoфизических экспериментов.

2. Разработаны и созданы совместно с рядом отечественных компаний в общей сложности более 30 детекторов фотонов различных типов для космомикрoфизических экспериментов: глубоководных нейтринных экспериментов, экспериментов по исследованию первичного космического излучения, а также низкофоновых экспериментов. Среди них крупногабаритные вакуумные гибридные детекторы фотонов КВАЗАР-370У и КВАЗАР-370G, ставшие базовыми фотодетекторами в Байкальском нейтринном телескопе НТ-200 и черенковских детекторах широких атмосферных ливней ТУНКА-25 и QUEST; серия фотоэлектронных умножителей традиционного типа “ФЭУ-БАЙКАЛ-1” для использования в составе гибридных детекторов фотонов; серия двухканальных фотоэлектронных умножителей “ФЭУ-БАЙКАЛ-2” и на их основе двухканальный гибридный детектор фотонов КВАЗАР-370-II, низкофоновый гибридный детектор фотонов КВАЗАР-370L, гибридный детектор фотонов КВАЗАР-370D с кремниевым диодом в качестве умножительной системы, фотоэлектронные умножители ФЭУ-184U и ФЭУ-184UM для использования во флуоресцентных детекторах широких атмосферных ливней, быстрый гибридный координатно-чувствительный детектор фотонов КАМЕРА для атмосферных черенковских телескопов гамма-квантов высоких энергий. Изучены характеристики значительных серий выше перечисленных детекторов фотонов.

3. Разработана и создана совместно с АО ОТ КАТОД г. Новосибирска серия вакуумных гибридных детекторов фотонов с полусферическим фотокатодом диаметром 37 см (КВАЗАР-370LSO, КВАЗАР-370SBO,

КВАЗАР-370УАР) с временным разрешением $\sim 1\div 1,2$ нс (FWHM) и однофотозлектронным разрешением 30÷40% (FWHM), наиболее полно на сегодняшний день отвечающие требованиям к фотодетекторам для планирующихся проектов нейтринных экспериментов следующего поколения.

4. Разработан и создан в сотрудничестве с рядом отечественных предприятий и институтов глубоководный оптический модуль Байкальского нейтринного телескопа НТ-200 на базе детектора фотонов КВАЗАР-370У.

5. Разработан и создан двухканальный оптический модуль для глубоководных нейтринных экспериментов следующего поколения на базе двухканального детектора фотонов КВАЗАР-370-П.

6. Разработана методика проведения тестирования, исследования и эксплуатации классических фотозлектронных умножителей с относительно малым усилением, разработанных для космомикрорфизических экспериментов. Результаты исследований подтверждают обоснованность новых подходов в разработках фотозлектронных умножителей: уменьшение числа каскадов умножения и использование быстродействующих трансимпедансных предусилителей для достижения хороших временных характеристик.

7. Проведены исследования факторов, влияющих на временное и амплитудное разрешение вакуумных фотодетекторов. Изучена природа задержанных импульсов в вакуумных фотодетекторах. Показано, что задержанные импульсы обусловлены обратным, упругим и неупругим, отражением фотоэлектронов от умножительной системы или элементов конструкции и являются характерной чертой всех вакуумных фотодетекторов. Однако, в детекторах фотонов КВАЗАР-370 предимпульсы практически отсутствуют, а вклады задержанных импульсов и послеимпульсов существенно подавлены в силу конструкционных особенностей этих детекторов.

8. Проведены исследования интенсивности, кинетики свечения и долговременной стабильности параметров большой серии ультра ярких светодиодов на основе соединений InGaN/GaN при прохождении через них импульсов тока большой амплитуды наносекундной длительности. Выделены ряд типов светодиодов наиболее перспективных для использования в наносекундных мощных источниках света, предназначенных для калибровочных измерений в космофизических экспериментах.

9. Разработаны и созданы наносекундные источники света на основе ультра ярких светодиодов из соединений InGaN/GaN с числом фотонов в импульсе до 10^{12} и длительностью импульсов $\sim 0,7 \div 5$ нс (FWHM) для калибровочных и тестовых измерений в экспериментах с вакуумными фотодетекторами. Эти источники активно используются в калибровочных системах Байкальского нейтринного эксперимента, наледного черенковского детектора ШАЛ, черенковских детекторов ШАЛ ТУНКА-25 и QUEST, в эксперименте по поиску двойного безнейтринного бета-распада GERDA, в тестовых измерительных системах подземного эксперимента по исследованию мюонов космических лучей ЕММА.

10. Разработана и создана глубоководная многофункциональная комплексная экспериментальная гирлянда для проведения натурных испытаний глубоководной экспериментальной техники: детекторов и источников фотонов, систем передачи данных, элементов подводной инженерии. Предложен, подготовлен и проведен специальный эксперимент по измерению дисперсии света в глубинных водах озера Байкал с использованием этой гирлянды. Результаты эксперимента хорошо согласуются с расчетами. Показана необходимость учета дисперсии света при проектировании глубоководных нейтринных телескопов и детекторов фотонов для использования в таких экспериментах.

11. Разработаны методы повышения чувствительности оптических модулей нейтринных телескопов к черенковскому свету в воде или во льду с применением высокоэффективных спектрсмещающих пленок на полимерной основе. Показаны основные пути повышения эффективности таких пленок для увеличения чувствительности детекторов фотонов к черенковскому свету во льду или в воде.

12. Совместно с рядом отечественных и зарубежных институтов и компаний выделены и исследованы наиболее эффективные на сегодняшний день неорганические сцинтилляторы для детектирования фотоэлектронов в гибридных детекторах фотонов. Разработан ряд гибридных детекторов фотонов с люминесцентными экранами на основе таких сцинтилляторов.

13. Разработаны и созданы калибровочные системы наледного черенковского детектора ШАЛ и черенковских детекторов ШАЛ ТУНКА-25 и QUEST. Предложены методы калибровки черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA на основе мощных наносекундных светодиодных источников света, пластиковых оптоволоконных кабелей и диффузных рассеивателей света.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Безруков Л.Б., Гарус А.А., Дорошенко А.А.,, Лубсандоржиев Б.К. и др. Быстрый координатно-чувствительный фотоприемник для гамма-астрономии высокой энергии // Известия АН. Серия физическая. 1994. Т.58. N.12. С.183.
2. I.A.Belolaptikov, Bezrukov L.B., Borisovets V.A.,, B.K.Lubsandorzhev et al. The Baikal Underwater Neutrino Telescope: Design, Performance and First Results // Astroparticle Physics 1997. V.7. P.263.
3. R.I.Bagduev, L.B.Bezrukov, N.M.Budnev,, Lubsandorzhev B.K. et al. The Optical Module of the Baikal Deep Underwater Neutrino Telescope // Nucl. Instrum. and Methods. A. 1999. V.420. P.138.

4. Безруков Л.Б., Борисовец Б.А., Глуховской Б.М.,, Б.К.Лубсандоржиев и др. Фотоэлектронный умножитель для глубоководного нейтринного телескопа НТ-200 // ПТЭ. 2000. N.1. С.104.
5. В.К.Lubsandorzhev. Photodetectors of the lake Baikal Neutrino Experiment and TUNKA Air Cherenkov Array // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2000. V.442. P.368.
6. В.К.Lubsandorzhev, P.G.Pokhil, R.V.Vasiljev, A.G.Wright, Studies of Prepulses and Late Pulses in the 8" Electron Tubes Series of Photomultipliers. // Nucl. Instrum. And Meth. A. 2000. V.442. P.452.
7. Безруков Л.Б., Борисовец Б.А., Глуховской Б.М.,, Б.К.Лубсандоржиев и др. Фотоэлектронный умножитель для черенковских детекторов широких атмосферных ливней // ПТЭ. 2000. N.1. С.164.
8. Р.В.Васильев, Б.К.Лубсандоржиев, П.Г.Похил Наносекундный источник света для калибровочных измерений в сцинтилляционных и черенковских детекторах // ПТЭ. 2000. N.4. С.148.
9. Лубсандоржиев Б.К., Похил П.Г., Путилов О.А., Степаненко З.И. Фотоприемник КВАЗАР-370G для черенковских детекторов широких атмосферных ливней // ПТЭ. 2001. N.3. С.155.
10. Р.В.Васильев, О.А.Гресс, Е.Е.Корестелева,, Б.К.Лубсандоржиев и др.. Черенковский детектор широких атмосферных ливней для совместной работы с нейтринным телескопом НТ-200. // ПТЭ. 2001. N.5. С.51.
11. В.А.Балканов, Р.В.Васильев, Б.К.Лубсандоржиев и др. Однофотоэлектронные характеристики ФЭУ-184U // ПТЭ. 2001. N.5. С.98.
12. D.Paneque, A.G.Ostankov, P.Jagon,, В.К.Lubsandorzhev et al. Studies of the optical properties of new hemispherical photomultiplier tubes // IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol.48. No.4. August 2001. P.1215.
13. В.А.Балканов, С.А.Белянченко, Р.В.Васильев,, Б.К.Лубсандоржиев и др. Двухканальный фотоэлектронный умножитель "Байкал-2" // ПТЭ. 2002. N.1. С.100.

14. Р.В.Васильев, О.А.Грэсс, Е.Е.Корестелева,, Б.К.Лубсандоржиев и др. Угловое разрешение черенковского детектора широких атмосферных ливней, созданного для совместной работы с нейтринным телескопом НТ-200 // ПТЭ. 2002. N.5. С.51.
15. Б.К.Лубсандоржиев, К.К.Шпиринг, Л.А.Кузьмичев Увеличение чувствительности оптических модулей нейтринных телескопов к черенковскому свету // ПТЭ. 2002. N.6. С.13.
16. Р.В.Васильев, Б.К.Лубсандоржиев, П.Г.Похил, О.Streicher Влияние гидростатического давления на оптические параметры оптоволоконных кабелей калибровочной системы нейтринного телескопа НТ-200 // ПТЭ. 2003. N.1. С.77.
17. Б.К.Лубсандоржиев, Л.А.Кузьмичев, Р.В.Васильев. Влияние амплитуды регистрируемых сигналов на точность временных измерений в нейтринном телескопе НТ-200 // ПТЭ. 2003. N.2. С.42.
18. В.К.Lubsandorzhiiev, P.G.Pokhil, R.V.Vasiliev, Y.E.Vyatchin. Measurements of group velocity of light in the lake Baikal water // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2003. V.502. P.168.
19. Вятчин Е.Э., Лубсандоржиев Б.К. Изучение стабильности наносекундных источников света на основе синих светоизлучающих диодов из соединений InGaN и GaN. // ПТЭ. 2004. N.4. С.80
20. Лубсандоржиев Б.К., Похил П.Г. Фотокатоды для регистрации черенковского излучения в глубоководных нейтринных телескопах // ПТЭ. 2004. N.5. С.20.
21. Г.К.Гарипов, Б.А.Хренов, Б.К.Лубсандоржиев и др. Фотоэлектронные умножители в фотодетекторе орбитального детектора флуоресцентного излучения ШАЛ. // ПТЭ. 2005. N.1. С.92.
22. Lubsandorzhiiev В.К. Cherenkov neutrino detectors in the lake Baikal: Past, present and prospects // Nucl. Instrum. and Meth. A. 2005. V.553. P.282.

23. E.Koresteleva, L.Kuzmichev, V.Prosin, B.Lubsandorzhev. Primary energy measurement with EAS Cherenkov light: Experiment QUEST and CORSIKA // Intern. J. Mod. Phys. A. 2005. V.20 P.6837.
24. B.K.Lubsandorzhev, R.V.Vasiliev, Y.E.Vyatchin, R.V.Poleshuk, B.A.J.Shaibonov. Photoelectron backscattering in vacuum phototubes // Nucl. Instrum. and Meth. A. 2006. V.567. P.12.
25. Р.В.Васильев, Е.Э.Вятчин, Б.К.Лубсандоржиев, П.Г.Похил, Б.М.А.Шайбонов, Р.В.Полещук. Многоцелевая экспериментальная глубоководная гирлянда для нейтринных экспериментов на оз. Байкал // ПТЭ. 2008. №2. С.21.
26. B.K.Lubsandorzhev, V.Combettes. The quest for the ideal scintillator for hybrid photodetectors // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008. Vol.55. Issue 3. Part2. P.1333.
27. B.K.Lubsandorzhev. The quest for the ideal photodetector for the next generation deep underwater neutrino telescopes // Nucl. Instrum. and Meth. A. 2008. V.595. P.58.
28. B.K.Lubsandorzhev. Hybrid phototubes in neutrino telescopes: Experience and perspectives // Nucl. Instrum. and Meth. A. 2009. V. 602.P.201.
29. B.K.Lubsandorzhev, R.V.Poleshuk, B.A.J.Shaibonov, Y.E.Vyatchin. LED based powerful nanosecond light sources for calibration systems of deep underwater neutrino telescopes // Nucl. Instrum. and Meth. A. 2009. V.602. P.220.
30. Р.В.Васильев, О.А.Гресс, Е.Е.Коростелева,, Б.К.Лубсандоржиев и др. Измерение формы импульса черенковского излучения широких атмосферных ливней в эксперименте ТУНКА // ПТЭ. 2009. №2. С.17.
31. P.Grabmayr, J.Jochum, M.Knapp, B.K.Lubsandorzhev, F.Rittel, B.Shaibonov. The GERDA Muon Veto Cherenkov Detector // Nucl. Instrum. and Meth. A. 2009. Accepted for publication. Available on line 27 May. 2009/doi:10.116/j.nima.2009.05.115.