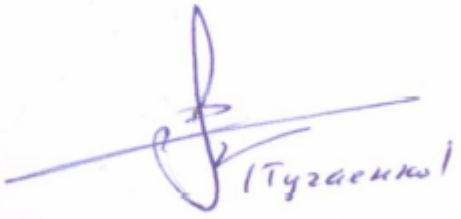


На правах рукописи



Тугаенко Вячеслав Юрьевич

Периодические структуры в электромагнитных процессах в физике высоких энергий и космической энергетике больших мощностей

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва, 2019 год

Работа выполнена в ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (г. Королёв Московской области).

Официальные оппоненты: **Сигов Александр Сергеевич**,
академик РАН, доктор физико-математических наук,
профессор, Президент МИРЭА - Российского
технологического университета

Резунков Юрий Александрович,
доктор технических наук, профессор, начальник
лаборатории научно-исследовательского института
оптико-электронного приборостроения, профессор
Санкт-Петербургского НИУ ИТМО

Ребров Сергей Григорьевич,
доктор технических наук, начальник отдела
Исследовательского центра имени М.В. Келдыша

Сысоев Валентин Константинович,
доктор технических наук, начальник отдела Научно-
производственного объединения имени С.А. Лавочкина

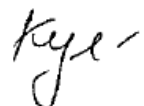
Защита состоится «27» ноября 2019 года в 14 часов 30 минут
на заседании диссертационного совета МИФИ.01.03 федерального
государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте
<http://ods.mephi.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просьба отправлять по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МИФИ.01.03,
кандидат физико-математических наук

 Куликов Е.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В конце восьмидесятых годов было показано экспериментально и теоретически, что взаимодействие заряженных частиц и γ -квантов с энергиями в десятки и сотни ГэВ с ориентированными кристаллами обладает многими необычными свойствами. Теоретическое описание наблюдаемых изменений в сечениях основных электродинамических процессов потребовало применения квантовой электродинамики в сильных полях, превосходящих критическую величину $E_0 = (m^2 c^3)/(e\hbar) = 1,32 \cdot 10^{16}$ вольт/см.

Такое поле на комптоновской длине волны электрона производит работу равную массе покоя электрона. В природе экстремально сильные поля могут реализовываться вблизи пульсаров и "черных дыр". Оказалось, что при прохождении заряженных частиц и γ -квантов вдоль осей монокристаллов также могут реализовываться условия сильных полей. Это новое научное направление интенсивно исследовалось на ускорителях ЦЕРН, Ботавия, ИФВЭ, ФИАН. Нашей научной группой (ФИАН, МИФИ, РКК «Энергия») был получен ряд новых научных результатов в этой области, часть из которых вошла в представляемую диссертационную работу. Эта область исследований представляет интерес не только с точки зрения проверки положений квантовой электродинамики в экстремальных условиях, но и дает возможность в лабораторных условиях воспроизводить параметры полей, характерные для астрофизических объектов, представляющих интерес для современной науки.

Новые знания об особенностях развития электромагнитных каскадов в ориентированных средах, включая прозрачные кристаллы, используемые для спектрометрии излучения, могут послужить базой для разработки перспективных методов измерения γ -спектров астрофизических источников в области десятков и сотен ГэВ, в которой по современным представлениям спектр многих источников может изменяться из-за возможного присутствия темной материи.

Исследования по применению периодических структур для беспроводной передачи энергии лазерным ИК излучением между космическими аппаратами важны для быстро развивающейся космической энергетики больших мощностей. Космические энергоустановки в настоящее время уже обеспечивают мощность в десятки киловатт, на МКС достигнут уровень в сотни кВт, а новые идущие проекты могут привести и к большим мощностям на борту космического аппарата. До настоящего времени каждый космический аппарат обеспечивал свои энергетические нужды собственной энергоустановкой, но с появлением космических аппаратов-электростанций скорее всего будет экономически эффективней передавать энергию с помощью беспроводных технологий на летающие на разных орбитах космические буксиры, промышленные установки, работающие в невесомости и прочим потребителям электрической энергии. Это положение делает задачу развития новых технологий беспроводной передачи энергии между КА практически востребованной на современном этапе развития космонавтики.

Цели работы.

- Экспериментальное исследование взаимодействия электронных и гамма пучков высокой энергии (десятки ГэВ) с ориентированными монокристаллами с большим удельным весом (вольфрам, гадолиний-галлиевый гранат, вольфрамат) для научно-технического обоснования метода направленной спектрометрии для внеатмосферной астрофизики;
- Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств полупроводниковых структур для задач беспроводной передачи электрической энергии лазерным инфракрасным излучением и создание физических основ технологии дистанционного энергоснабжения автономных летательных аппаратов на Земле и в космосе.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

- Комплексное изучение физических свойств периодических структур с большим эффективным зарядом ядра на электронных и гамма пучках в диапазоне энергий от 0,5 МэВ до 27 ГэВ;
- Экспериментальные исследования квантовых электродинамических эффектов в сильных электромагнитных полях;
- Экспериментальные исследования развития электромагнитных ливней в прозрачных тяжелых спектрометрических монокристаллах;
- Разработка основных положений и физических основ технологии дистанционного энергоснабжения лазерным инфракрасным излучением;
- Комплексные исследования и разработка экспериментальных методов формирования узких лазерных инфракрасных пучков для систем дистанционного энергоснабжения и их наведения для передачи энергии и информации.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- Впервые проведен комплекс работ по обоснованию возможности применения периодических структур с большим эффективным зарядом ядра в исследованиях влияния сильных полей на сечения основных электродинамических процессов при взаимодействии гамма-квантов, электронов и позитронов с конденсированным веществом при энергиях от сотен МэВ до 10 ГэВ;
- Впервые разработаны и применены в экспериментальных исследованиях методики ориентирования монокристаллических мишеней, включая мишени с толщиной в несколько радиационных единиц, на пучках «меченых» фотонов на электронном синхротроне С25-Р(г. Троицк) и экспериментальной установке «Каскад» в Институте физики высоких энергий (Протвино);
- Впервые исследованы эффекты ускоренного развития электромагнитных ливней в прозрачных тяжелых спектрометрических монокристаллах и показано, что и в сложно устроенных кристаллических решетках периодические структуры способствуют эффективному дроблению энергии первичной частицы и ливень развивается на более коротких расстояниях, чем в разориентированном кристалле;

- Впервые проведены систематические исследования по разработке экспериментальных методов изучения физических характеристик полупроводниковых структур фотоэлектрического преобразования и устройств на их основе, разрабатываемых для создаваемой технологии дистанционного энергоснабжения лазерным инфракрасным излучением.

Практическая значимость работы. Исследования влияния периодических структур с большим эффективным зарядом ядра на сечения основных электродинамических процессов взаимодействия гамма-квантов, электронов и позитронов с конденсированным веществом представляют интерес не только с точки зрения проверки положений квантовой электродинамики в экстремальных условиях, но и дают возможность в лабораторных условиях воспроизводить параметры полей, характерных для астрофизических объектов, представляющих интерес для современной науки.

Новые знания, полученные при выполнении диссертационного исследования, об особенностях развития электромагнитных каскадов в ориентированных средах, включая прозрачные кристаллы, используемые для спектрометрии излучения, могут послужить базой для разработки новых методов измерения γ -спектров астрофизических источников в области десятков и сотен ГэВ, в которой по современным представлениям спектр многих источников может изменяться из-за возможного присутствия темной материи.

Разрабатываемая автором технология дистанционного энергоснабжения космических аппаратов и беспилотных летательных аппаратов лазерным инфракрасным излучением может найти широкое применение для реализации постоянных мониторинговых программ в интересах большого круга заказчиков, использующих стремительно растущий рынок БПЛА.

На защиту выносятся:

1. Результаты комплексного изучения физических свойств периодических структур с большим эффективным зарядом ядра на электронных и гамма пучках электронного синхротрона ФИАН, протонного синхротрона ИФВЭ, линейного ускорителя ХФТИ, гамма-дифрактометра ПИЯФ и результаты экспериментальных работ по изучению квантовых электродинамических эффектов в сильных электромагнитных полях. Разработка методов ориентирования монокристаллических мишеней, включая мишени с толщиной в несколько радиационных единиц, на пучках «меченых» фотонов.

2. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия электронных и гамма-пучков высокой энергии с монокристаллами, экспериментальное обнаружение и результаты исследования ускоренного развития электромагнитных ливней в прозрачных тяжелых спектрометрических монокристаллах. Разработка предложений по использованию обнаруженных явлений ускоренного развития электромагнитных каскадов в высокоэнергичной спектрометрии гамма-излучения от астрофизических гамма-источников.

3. Результаты разработки основных положений и физических основ технологии дистанционного энергоснабжения лазерным инфракрасным

излучением, основанной на проведенных работах по созданию и исследованию полупроводниковых высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей для различных диапазонов длин волн монохроматического излучения высокой плотности.

4. Результаты комплексных исследований и разработки экспериментальных методов формирования узких лазерных инфракрасных пучков для систем дистанционного энергоснабжения и их наведения для передачи энергии и информации.

Апробация работы.

Основные результаты работы были представлены на международных и всероссийских конференциях: International Symposium SPIE Photonics West 2017 (USA); The 38th PIERS (Progress In Electromagnetics Research Symposium) 2017 (Russia, St. Petersburg); Международные конференции по фотонике и информационной оптике 2016, 2017 (Россия, Москва, МИФИ); Всероссийская научно-техническая конференция «Расплетинские чтения 2016» (Россия, Москва); 18-й Международная конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение 2016, (Россия, Москва); The International Conference on Lasers, Applications and Technologies 2016 ICONO/LAT (Belarus); Международные симпозиумы "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" 2015, 2016, 2017 (Россия, г. Томск, г.Иркутск); European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2012(Germany), 2013(France), 2014(Holland), 2015(Germany) 2017(Netherlands); International Astronautical Congress 2012(Italy), 2013(China), 2014(Canada); 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2014(Russia , St Petersburg); Международные конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами 1987, 1989, 2011(Россия, Москва, МГУ); Научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН, ИТЭФ, 2011(Россия, Москва); The International High Power Laser Ablation and Directed Energy» 2011(Germany), 2014 (USA); Int. Cosm. Ray Conf., 1990(Australia, Adelaide); 1991(Ireland, Dublin), 1997(S.Africa, Durban); VII International conference on calorimetry in high energy physics, 1997(USA, University of Arizona, Tucson); Symp. "Recent adv. in high ener. astronomy 1992(France); All union workshop Problem of the use of particle channeling effects in crystals for high energy physics 1991(Russia, Protvino).

Личный вклад.

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично или в соавторстве при непосредственном участии автора. По направлению исследований связанных с созданием технологии дистанционного энергоснабжения лазерным инфракрасным излучением автор является научным руководителем исследований, представленных в настоящей работе.

Достоверность результатов.

В работах по исследованиям влияния периодических структур на электромагнитные процессы в физике высоких энергий тематика проведенных исследований разработана от постановки задачи по экспериментальному

обнаружению новых физических явлений значительного роста сечений электродинамических процессов в ориентированных кристаллах до проведения цикла экспериментальных исследований на крупных современных физических установках (ускорителях ИФВЭ, ФИАН, ХФТИ, ядерном реакторе ЛИЯФ) с получением завершенных научных результатов по ускоренному развитию электромагнитных каскадов в монокристаллах вольфрама и тяжелых спектрометрических монокристаллах гадолиний-галлиевого граната и вольфрамата.

По направлению работ, связанному с исследованиями по применению периодических структур для беспроводной передачи энергии лазерным ИК излучением автором предложена технология дистанционного энергоснабжения лазерным излучением космических аппаратов и беспилотных летательных аппаратов, проведен цикл работ по разработке экспериментальных методов изучения физических свойств создаваемых для данного направления исследований полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей, приемников-преобразователей лазерного излучения высокой плотности с существенно неравномерной освещенностью площади приемника, по исследованию физических характеристик создаваемых для разрабатываемой технологии интенсивных узконаправленных лазерных пучков. Проведены 14 НИОКР и инновационных проектов (Приложения Б, В) в основном под научным руководством автора по исследованиям и разработке физических основ разрабатываемой технологии и космической энергетике больших мощностей. Получены 11 патентов (Приложение Г) по теме исследования. На основании результатов, полученных при проведении исследований, проведен ряд демонстрационных экспериментов по беспроводной передаче электрической энергии лазерным излучением в турбулентной атмосфере на дистанции 1, 5 км.

Объем и структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 6-и глав и заключения, 4-х приложений и списка используемых источников, содержащего 152 наименования. Объем диссертации составляет 213 страниц, включая 75 рисунков, 9 таблиц.

Публикации.

По теме диссертации опубликованы 58 работ (Приложение А), в том числе 50 статей в журналах и сборниках, 4 патента и 31 тезиса докладов на международных и российских научно-технических конференциях.

53 публикации автора проиндексированы в одной или нескольких ведущих системах научного цитирования:

- 26 публикаций – Scopus [1-4, 7, 10, 12, 19, 21-25, 29, 34-36, 38, 39, 41, 42, 44, 55-58];
- 6 публикации – Web of Science [1-3, 7, 12, 21];
- 35 публикаций – РИНЦ [1, 3, 4, 7-12, 18-29, 31-39, 44, 55-58];
- 31 публикация в журналах, входящих в перечень ВАК [8, 9, 11, 12, 18, 20-22, 24, 25, 27, 28, 31-33, 35, 37, 39, 40, 43-53, 58];
- 3 монографии [13, 26, 30].

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проведен анализ состояния экспериментальных и теоретических исследований влияния упорядоченных структур на прохождение через них электронов и гамма-квантов высоких энергий, обоснована необходимость проведения исследований направленных на разработку экспериментальных методов изучения физических свойств полупроводниковых структур для задач беспроводной передачи электрической энергии лазерным инфракрасным излучением и создания физических основ технологии дистанционного энергоснабжения автономных летательных аппаратов на Земле и в космосе, сформулированы решаемые научные проблемы, цели исследования, приведены основные научные и практические результаты, выносимые на защиту, показана их новизна, научная и теоретическая значимость, достоверность.

В первой главе анализируются различные механизмы влияния периодических структур на электромагнитные процессы взаимодействия пучков частиц с веществом. Начиная с энергий в сотни МэВ в области формирования электромагнитного процесса участвует несколько атомов, что для кристаллических сред приводит к появлению когерентных эффектов описываемых в борновском приближении ростом эффективного заряда атомов. С ростом энергии частиц борновское приближение оказывается неприменимым и корректное описание полученных на ускорителях результатов экспериментов на пучках гамма-квантов описывается механизмом образования электрон-позитронной пары гамма-квантом в постоянном сильном поле. В представленной работе обосновывается задача расширения области исследований квантовой электродинамики в сильных полях путем применения монокристаллов с большим эффективным зарядом и сложной структурой элементарной решетки. Исследуются современные технологические возможности получения совершенных монокристаллов вольфрама, разрабатываемых для космических ядерных энергетических установок, тяжелых спектрометрических монокристаллов вольфрамата свинца и галлий гадолиниевого граната, широко используемых в экспериментальной физике. Показано, что по основному критерию – структурному совершенству выращиваемых методом Чохральского монокристаллов по обоим направлениям исследований автора возможно получение образцов необходимого качества.

В развитие работ по техническим и технологическим приложениям физики конденсированного состояния рассмотрены возможности создания фотоэлектрических преобразователей с заданными свойствами для высокоэффективного преобразования лазерного инфракрасного излучения с высокой плотностью для разрабатываемой технологии дистанционного энергоснабжения. Детально проанализированы особенности метода газофазной эпитаксии из металлорганических соединений, источниками в котором служат металлорганические соединения элементов третьей и пятой группы и гидриды элементов пятой группы. В диссертационной работе представлены результаты

исследований по направлению разработки ФЭП для технологии дистанционного энергоснабжения, приведшие к получению КПД в 60% для ФЭП площадью более 1 см^2 для лазерного излучения с $\lambda \sim 0,8 \text{ мкм}$.

Во второй главе приводятся результаты работ по исследованиям влияния периодических структур на электродинамические процессы при энергиях от сотен МэВ до десятков ГэВ.

Принципиально важным шагом в подготовке к проведению экспериментальных исследований явился цикл работ автора по обоснованию возможности использования монокристаллов с большим зарядом ядра. Монокристаллические образцы вольфрама были получены методом плавающей зоны. Исследования структурного совершенства применяемых в работах мишеней из монокристаллического вольфрама, спектрометрических кристаллов гадолиний-галлиевого граната и вольфрамата проводились на гамма-дифрактометре ЛИЯФ (Гатчина) (использовался пучок γ -квантов с энергией 412 кэВ), позволяющем изучать кристаллы тяжелых элементов и получать информацию непосредственно о функции углового распределения блоков мозаики в объеме образца. Дополнительные работы, подтверждающие возможность применения полученных экспериментальных образцов монокристаллических мишеней, были проведены на пучке электронов высокой энергии ($E_e = 900 \text{ МэВ}$) линейного ускорителя ХФТИ (Харьков).

На рисунках 1 и 2 представлены характерные результаты исследований структурного совершенства используемых монокристаллических мишеней.

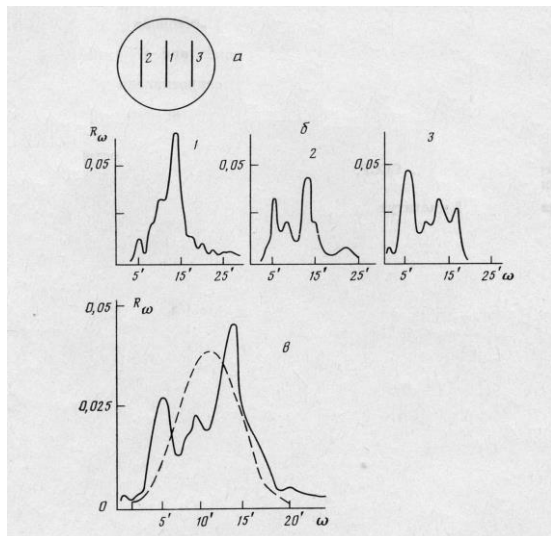


Рисунок 1. Кривые качания для вольфрамовой монокристаллической мишени. а — положение пучка на мишени; б — кривые качания в точках 1, 2, 3; в — суммарная кривая качания. R_ω — интенсивность “просвечивающего” пучка в относительных единицах; ω — угол поворота кристалла.

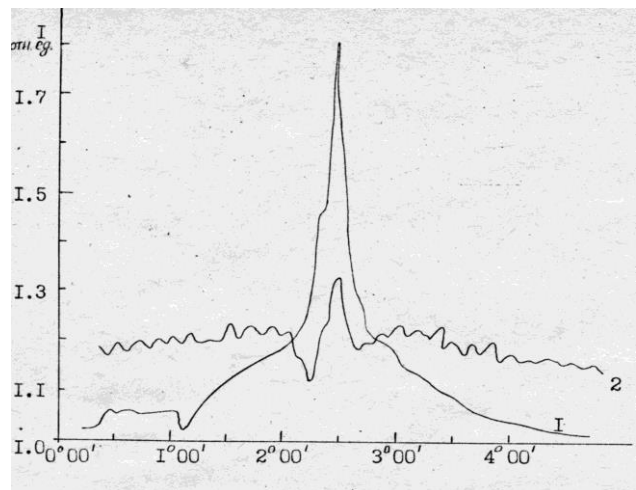


Рисунок 2. Зависимость интенсивности когерентного тормозного излучения измеренной ионизационной камерой (1) и квантометром полного поглощения (2) от угла поворота монокристалла вольфрама вокруг горизонтальной оси.

Были разработаны методы ориентирования монокристаллических мишеней на пучках электронов и «меченых» γ -квантов электронного синхротрона С25-Р (Троицк) и на системе мечения фотонов высокой энергии установки «Каскад» в Институте физики высоких энергий (Серпухов). При проведении экспериментальных исследований на пучке меченных гамма-квантов автор использовал возможности космического телескопа «Гамма-1», одним из разработчиков которого он являлся, во время калибровки технологического образца на ускорителе.

В основе разработанного способа ориентирования монокристаллических мишеней на пучках частиц применялся способ ориентации по выходу электромагнитного ливня. На рис. 3 и 4 приведены схема системы мечения фотонов высокой энергии установки «Каскад». На рис. 3 и 4 приведены схема системы мечения фотонов высокой энергии, разработанная для проведения наших исследований и ориентационные зависимости сигналов счетчиков системы, используемых для ориентирования монокристаллов на пучках.

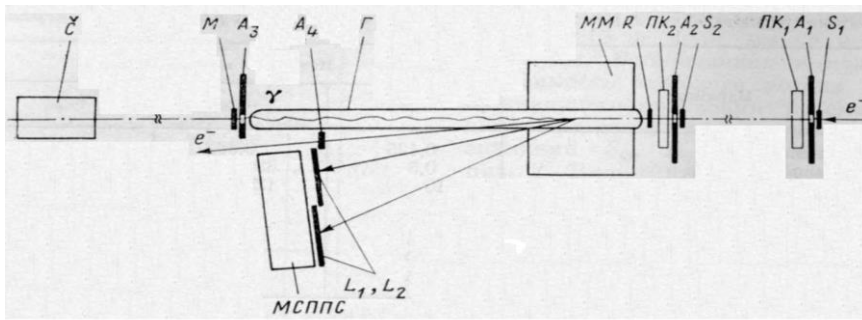


Рисунок 3. Схема системы мечения фотонов высокой энергии установки «Каскад». S_1 , S_2 , $A_1 - A_4$, L_1 , L_2 – сцинтилляционные счетчики, ПК1, ПК2 – пучковые пропорциональные камеры, Щ – черенковский спектрометр, R – радиатор, ММ – магнит мечения, Г – гелиепровод, М – мишень, МСППС – многоканальный свинцово-сцинтилляционный спектрометр полного поглощения на сместителях спектра.

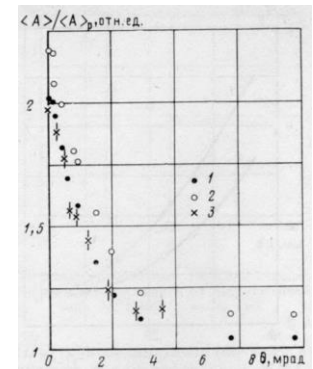


Рисунок 4. Ориентационные зависимости сигналов сцинтилляционного (1) и черенковского (2, 3) счетчиков, на электронном (1, 2) и гамма пучках (3).

В результате проведенных исследований было экспериментально показано существенное изменение процессов электромагнитного взаимодействия электронов и гамма-квантов с периодическими структурами. На рис. 5 приведена ориентационная зависимость вероятности конверсии γ -квантов с энергией 13-25 Гэв в e^+e^- пары в интервале углов $0 \div 30$ мрад относительно оси $\langle 111 \rangle$ монокристалла вольфрама толщиной 1мм. На рис. 6 приведены результаты исследований энергетической зависимости сечения рождения пар вдоль оси кристалла, подтверждающие теорию сильного поля.

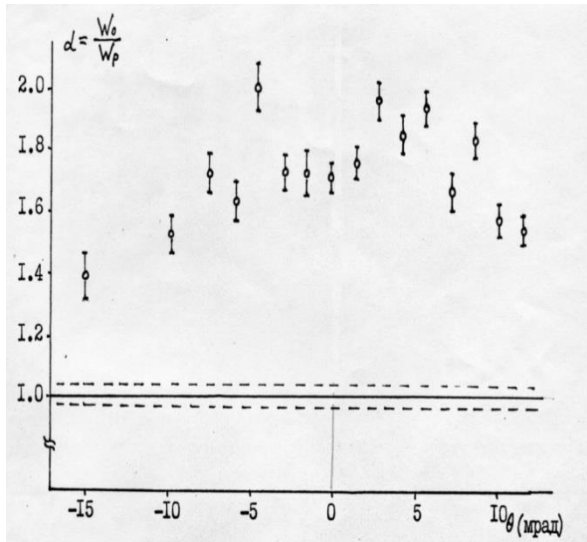


Рисунок 5. Ориентационная зависимость вероятности конверсии γ -квантов в e^+e^- пары в кристалле вольфрама толщиной 1 мм.

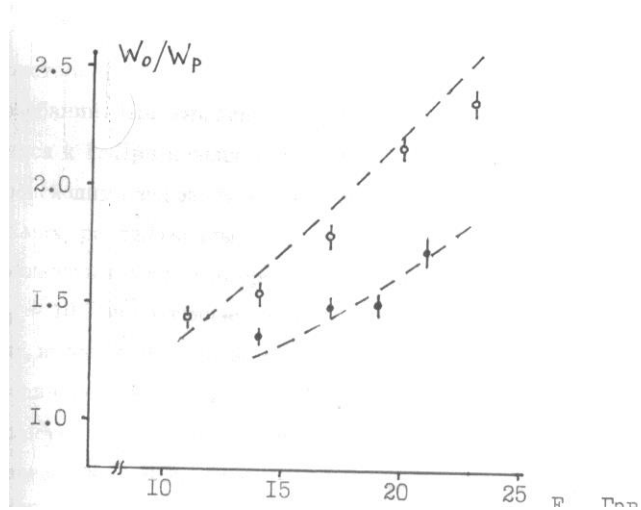


Рисунок 6. Энергетическая зависимость фоторождения пар под нулевым углом в кристалле вольфрама: точки ● при температуре 293 К; точки ○ — 77 К. Пунктирные кривые — расчетные зависимости.

Проведенные нами исследования влияния кристаллической природы вещества на электромагнитные процессы при энергиях в диапазоне от сотен МэВ до десятков ГэВ привели к обнаружению существенного изменения развития электромагнитных каскадов в упорядоченных структурах. Проводилось изучение электромагнитных ливней, инициированных электронами с энергией 28 ГэВ в ориентированных кристаллах вольфрама толщиной 0.07, 0.03, 1.0, 2.7, 5.8 и 8.4 мм, ориентированных по пучку осью $\langle 111 \rangle$ (ось с наименьшим шагом решетки $a = 2,7 \text{ \AA}$ и наибольшим потенциалом $V_0 = 417 \text{ В/см}$). Было обнаружено, что влияние кристаллической структуры на развитие электромагнитного ливня проявляется в значительном смещении максимума энергосодержания каскада в сторону начала ливня (2 рад. единицы), значительном перераспределении отношения числа γ -квантов к числу заряженных частиц. Экспериментально показано, что если электромагнитный ливень начинает развиваться в периодической среде, то его дальнейшее развитие существенно изменяется на толщинах в десятки раз больших, чем толщина кристалла. Так же было обнаружено, что при прохождении частиц вдоль кристаллографических осей образуются специфические узкие фотонные ливни. Результаты приведенных в настоящем разделе исследований послужили основой для проведения работ с прозрачными кристаллическими структурами. Основные научные результаты, представленные в главе 2, приведены в работах: [21, 25, 40, 41, 43, 45, 49-53, 58].

В третьей главе приведены результаты исследований развития электромагнитных ливней в ориентированных спектрометрических тяжелых прозрачных монокристаллах на пучках электронов и гамма-квантов с энергией от

единиц до нескольких десятков ГэВ. В работе применялись монокристаллические мишени вольфрама и галлий-гадолиниевого граната различных толщин. Разработанный нами способ ориентирования монокристаллических мишеней позволял ориентировать образцы с толщинами до 10 радиационных единиц на электронном пучке синхротрона ИФВЭ (Протвино). Показано, что и в сложно устроенных кристаллических решетках периодические структуры способствуют эффективному дроблению энергии первичной частицы и ливень развивается на более коротких расстояниях, чем в разориентированном кристалле. Энергетические потери электронного пучка в несколько десятков ГэВ в первых радиационных единицах ориентированных спектрометрических кристаллов могут в два с лишним раза превышать потери в разориентированном кристалле, а с ростом энергии частиц различие в энергопотерях станет еще более существенным. На рис. 7 представлены каскадные кривые в кристаллах граната различной толщины. Ливень, выходящий из кристалла, продолжал развиваться в составном черенковском ливневом спектрометре (СЧЛС), расположенном за кристаллами граната и вольфрамата. СЧЛС состоял из 10 независимых светоизолированных счетчиков (радиаторов) из свинцового стекла ТФ-1, имевших толщину в 1 рад. длину каждый. Для сбора оставшейся части ливня за СЧЛС был помещен черенковский спектрометр толщиной 15 рад. длин. Экспериментально было получено, что ориентация кристалла уменьшает энергию ливня, вышедшего из СЧЛС. Это уменьшение эквивалентно увеличению длины поглотителя на $\sim 2X_0$.

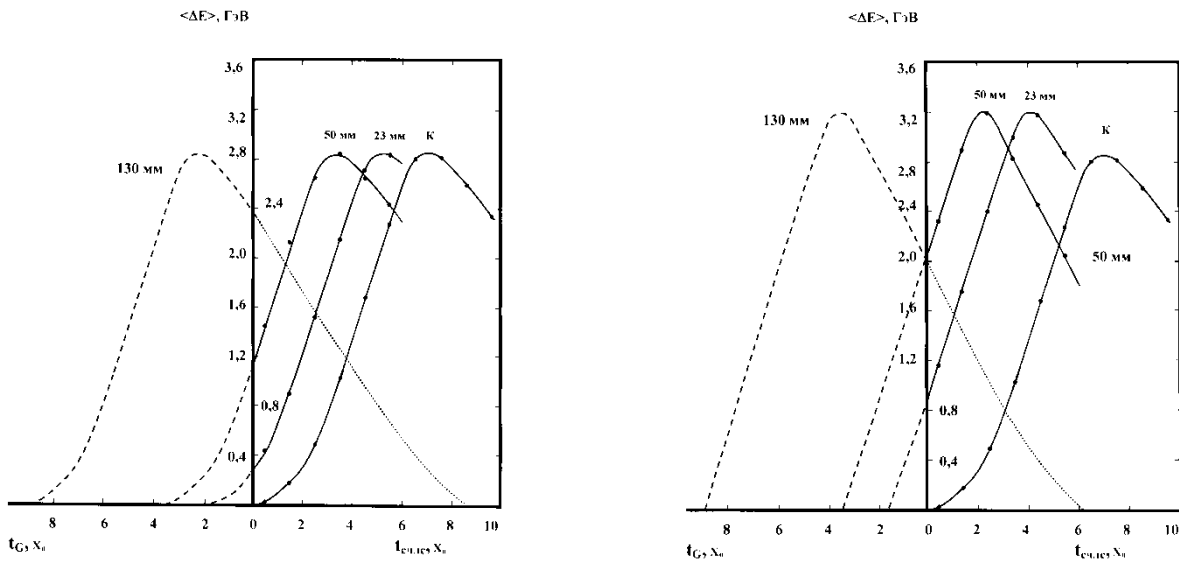


Рисунок 7. Каскадные кривые развития электромагнитного ливня в кристалле граната и СЧЛС от электронов с энергией $E_e = 26$ ГэВ при разных толщинах разориентированных (а) и ориентированных вдоль оси $\langle 111 \rangle$ (б) кристаллов граната перед спектрометром (К - калибровка (кристалл перед СЧЛС отсутствует); $\langle \Delta E \rangle$ - средняя энергия ливня, выделившаяся в каждом счетчике СЧЛС; $T=293^\circ\text{K}$).

На рисунке 8 представлена ориентационная зависимость среднего энерговыделения ливня в кристаллах граната. Значения нормированы на средние

энерговыведения (ΔE_d) в этих же, но полностью разориентированных кристаллах. Полная ширина на половине высоты представленных зависимостей составляет порядка 4 мрад и незначительно увеличивается с толщиной кристалла. В разориентированном кристалле ($\theta \gg 0$) толщиной 23 мм выделилось 1,4 ГэВ энергии первичных электронов, а при ориентации кристалла на ось ($\theta = 0$) энерговыведение увеличилось до 3,9 ГэВ. Для кристалла толщиной 50 мм эти величины равны соответственно 5,8 и 10,1 ГэВ. Таким образом, с увеличением толщины кристалла относительное энерговыведение уменьшается, что означает, что по мере развития каскада от электронов с энергией 26 ГэВ, механизм сильного поля “перестает работать” для “вторичных” частиц. С ростом энергии первичных частиц зона ускоренного развития электромагнитного ливня будет смещаться в глубину кристалла.

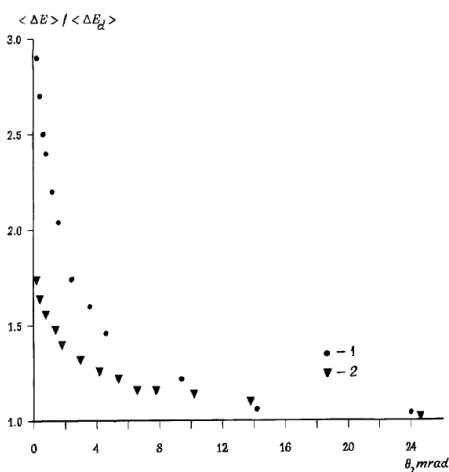


Рисунок 8 — Ориентационные зависимости энерговыведения ливней в кристаллах граната толщиной 23 мм (точки 1) и 50 мм (точки 2).

На основании обнаруженных и исследованных эффектов «ускоренного» развития электромагнитных каскадов в ориентированных средах предложен способ направленной спектрометрии в космической гамма-спектрометрии высоких энергий. Рассмотрены основные научные инструменты для проведения гамма-спектрометрических внеатмосферных исследований: телескопы "Гамма-1" советской астрофизической обсерватории «Гамма», Fermi-LAT (США), «Гамма-400» (Россия). Автор является одним из разработчиков отечественной обсерватории «Гамма» и ее основного научного инструмента - телескопа «Гамма-1» с сцинтилляционным калориметром, измеряющем спектр гамма-источников до энергий в несколько ГэВ. За время работы обсерватории был получен ряд новых научных результатов по обнаружению и исследованию высокоэнергетических солнечных вспышек с энергетическим спектром простирающимся до области в десятки ГэВ, исследованы временные и энергетические спектры пульсаров. Показано, что наиболее перспективной областью будущих исследований станут энергии гамма-квантов более 100 ГэВ несущие информацию о природе центральной области нашей галактики, возможно измерение спектров астрофизических объектов в этом диапазоне позволит получить данные о частицах «темной материи».

Исследованы возможности применения способа направленной спектрометрии для значительного улучшения энергетического разрешения: в

области энергий в десятки ГэВ относительный выигрыш в энергетическом разрешении при применении ориентированных кристаллов достигает 30-40%, а для энергий порядка 100 ГэВ энергетическое разрешение может вырасти в несколько раз и что особенно важно для космических исследований для регистрации энергии таких высоко энергетических каскадов можно применять спектрометрические кристаллы существенно меньшие по толщине, чем при реализации стандартных спектрометрических измерений (выигрыш по толщине может составить для этих энергий до 10 раз). Основные научные результаты, представленные в главе 3, приведены в работах: [20, 34-42, 44, 46-49, 51, 52, 55-57].

В четвертой главе приведены результаты исследований автора по обоснованию возможности и техническим характеристикам технологии дистанционного энергоснабжения космических аппаратов и беспилотных летательных аппаратов лазерным инфракрасным излучением. Рассмотрены мощные космические энергоустановки (150 – 600 кВт электрической мощности), разрабатываемые для различных будущих проектов связанных с межорбитальной транспортировкой грузов. Представлены результаты исследований по проектному анализу схем преобразования энергии в космических ядерных энергетических установках. Основные научные результаты получены в развитие разработок РКК «Энергия» по космической ядерной энергоустановке термоэмиссионного типа и межорбитального буксира «Геркулес» на ее основе (рис. 9). Показаны преимущества термоэмиссионных установок для космических транспортных систем и напланетных энергоустановок, особенно для лунных баз в районах полюсов спутника Земли.

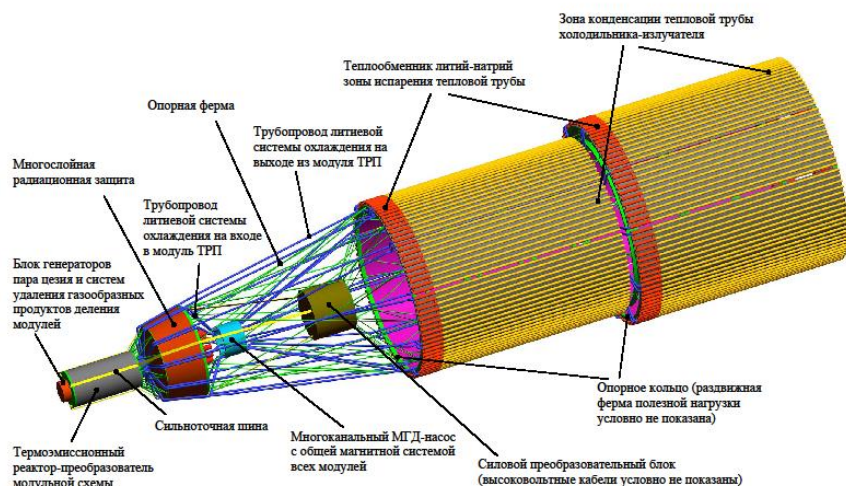
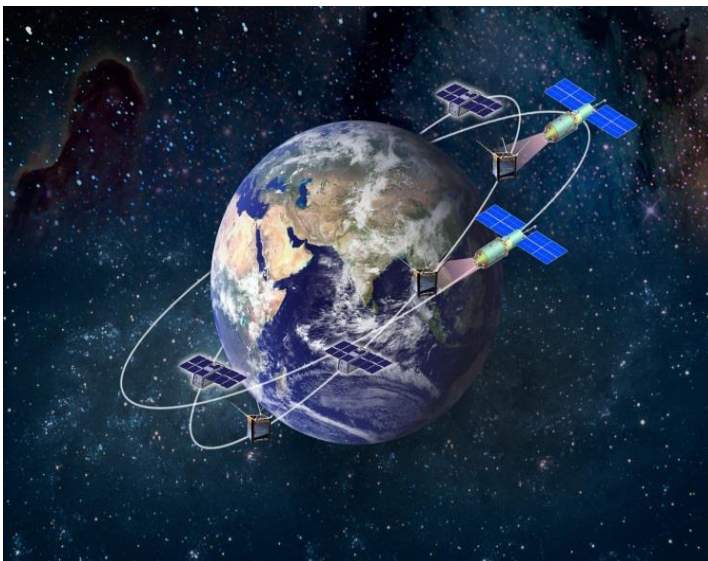


Рисунок 9. Общий вид термоэмиссионной КЯЭУ.

Проведенные под научным руководством автора исследования показали, что электрическая энергия от таких мощных космических энергоустановок может эффективно передаваться на другие космические аппараты с помощью разрабатываемой нами технологии беспроводной передачи электрической энергии лазерным ИК излучением. Исследованы технические и технологические

возможности современных диодных, оптоволоконных лазерных систем и полупроводниковых материалов для фотоэлектрического преобразования в качестве ключевых элементов технологии дистанционного энергоснабжения лазерным излучением. Предложено и обосновано применение этой технологии для использования в космических межорбитальных транспортных системах, космических технологических системах с крайне низким уровнем микрогравитации ($10^{-7} - 10^{-8}$ g), энергоснабжении малых космических аппаратов и БПЛА. На рис. 10 представлена схема орбитального построения системы дополнительного электроснабжения микроспутников (МКА) от космических аппаратов энергостанций (ЭС), расположенных на более высоких орбитах с помощью инфракрасного лазерного излучения. Результаты проведенных исследований показали, что возможно построить устойчивую систему малых спутников с дистанционным энергоснабжением лазерным ИК излучением от специального космического аппарата – электростанции, в которой большое количество (десятки) МКА периодически один раз в 2 – 3 суток будут обеспечиваться электрической энергией 2 – 3 кВт в течении времени до 30 минут для работы электроракетных двигателей, что позволит им компенсировать аэродинамическое торможение для длительной работы на низких орбитах.



Основные характеристики системы

- орбита микроспутников – 250 км, $i = 53,9^\circ$
- орбита ЭС – 350 км, $i = 51,6^\circ$
- количество ЭС – 2
- количество МКА – несколько десятков
- время существования ЭС – 10 лет
- время существования МКА – более 1 года

Характеристики МКА

- масса МКА – ≈ 50 кг;
- мидель МКА – $0,3 \text{ м}^2$;
- время существования МКА – > 1 года (без коррекций орбиты – несколько суток);
- ЭРД коррекции – 2 СПД-100 или один СПД-140;
- расход рабочего тела (ксенон) ≈ 5 кг/год.

Требования к системе БПЭЭ:

- Дальность – 100 – 300 км;
- передаваемая мощность – 2 кВт;
- Относительная скорость – $\approx 1^\circ/\text{сек}$.
- точность наведения – $0,5''$;
- длительность сеанса ≈ 30 мин;
- периодичность ≈ 3 сут.

Рисунок 10. Орбитальное построение системы энергоснабжения микроспутников и ее основные параметры.

Исследования современного состояния и перспектив получения полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей с высокой эффективностью преобразования концентрированного лазерного ИК излучения, возможностей создания диодных и оптоволоконных лазерных систем киловаттного уровня в непрерывном режиме работы с приемлемым для систем

дистанционного энергоснабжения качеством излучения показали что КПД системы может быть от 20 до 30%. Рисунок 11 иллюстрирует современные представления об эффективности беспроводной передачи энергии в космосе для инфракрасного диапазона.

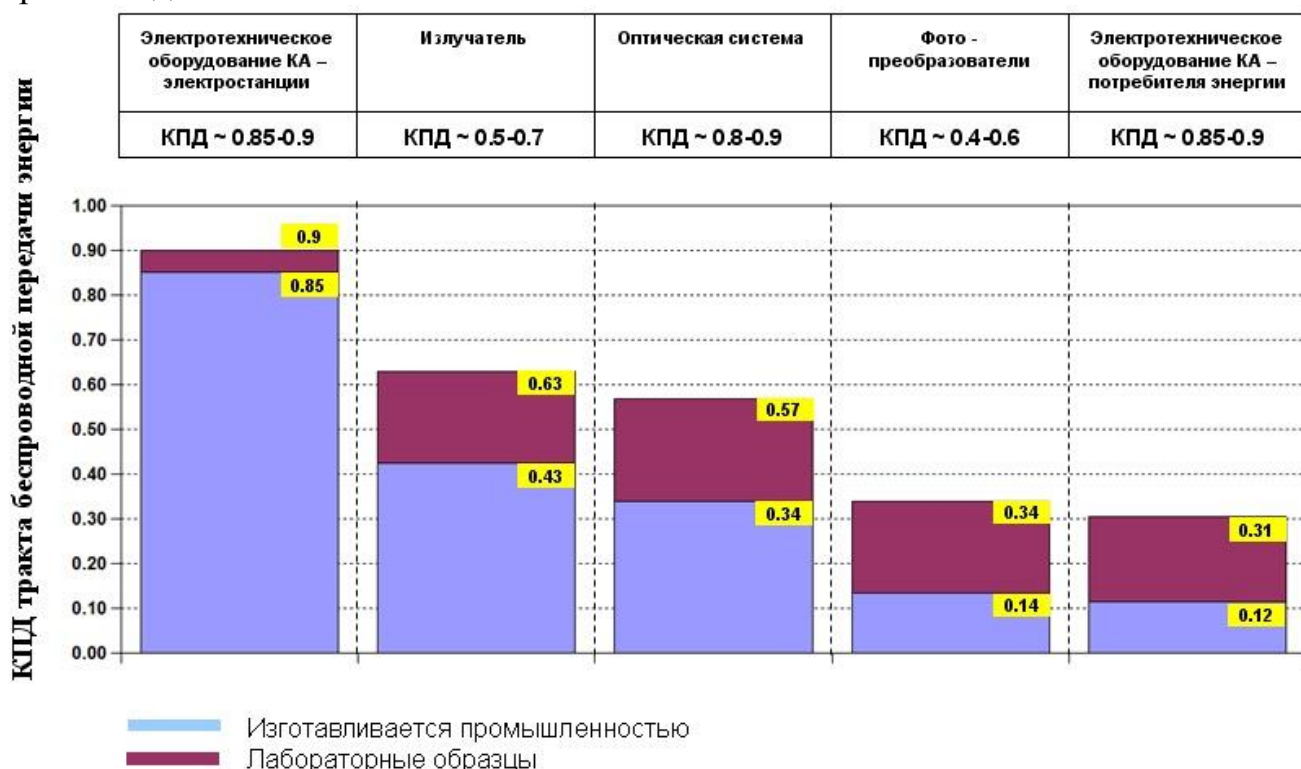


Рисунок 11. Эффективность инфракрасного канала передачи энергии в космосе.

Основные научные результаты, представленные в главе 4, приведены в работах: [5, 10, 11, 13, 15, 17, 18, 23, 24, 26-32], 1-4 Приложения Б, 1-3 Приложения В.

В пятой главе представлены результаты разработок экспериментальных методов создания узких лазерных пучков для систем беспроводной передачи электрической энергии в космосе и на земле монохроматическим ИК излучением. Для создания технологии дистанционного энергоснабжения необходимы лазерные системы с высокой эффективностью (не менее 50%), дифракционным качеством излучения, создающие в непрерывном режиме лазерные пучки киловаттной мощности. Нами было показано, что для $\lambda \sim 0,8$ мкм возможно обеспечение максимального КПД тракта, а $\lambda \sim 1$ мкм обеспечивает максимальную дальность передачи энергии. Качество излучения лазерных источников с круговой симметрией характеризуется произведением параметров пучка $BPP = (d \cdot \theta) / 4$ или коэффициентом превышения дифракционного предела $M^2 = (\pi / \lambda) \cdot BPP$ (где d – диаметр излучающей области, θ – полный угол расходимости излучения, λ – длина волны излучения). Оптическая система с апертурой D , согласованная с лазерным источником с качеством излучения BPP , на расстоянии L позволит создать пятно диаметром $D_L = (4BPP / D) \cdot L$. На рис. 12 приведены наши результаты оценок эффективности современных лазерных систем с оценками размеров лазерных

«пятен» на расстоянии 1 км, определяемых качеством излучения лазеров. Рисунок дополнен фотографиями лазерных систем, используемых нами для экспериментальных исследований.

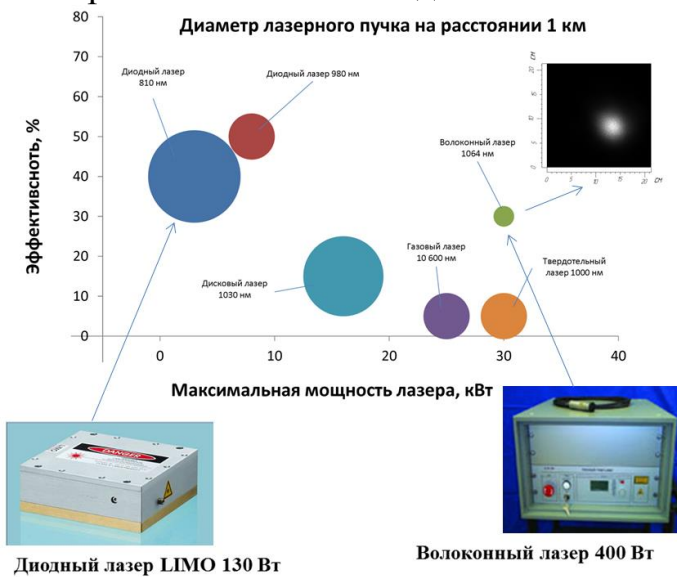


Рисунок 12. Энергетическая эффективность современных лазерных систем.

Для проведения исследований был разработан экспериментальный образец системы формирования и наведения (СФИН) лазерных пучков по схеме Ломоносова-Гершеля общий вид которого и эквивалентная схема представлены на рис. 13. В СФИН был реализован ряд функций, в том числе – фокусировка излучения и управление пространственным положением пучка по двум осям посредством смещения линзы, закрепленной на трехосевом позиционере, и одновременное использование трех источников с длинами волн 532, 808 и 1064 нм. Точность установки (перемещения) линзы смещения составляла 1 мкм, что позволяло при наведении оси иметь шаг ~ 3 мкрад (3 мм на 1 км).

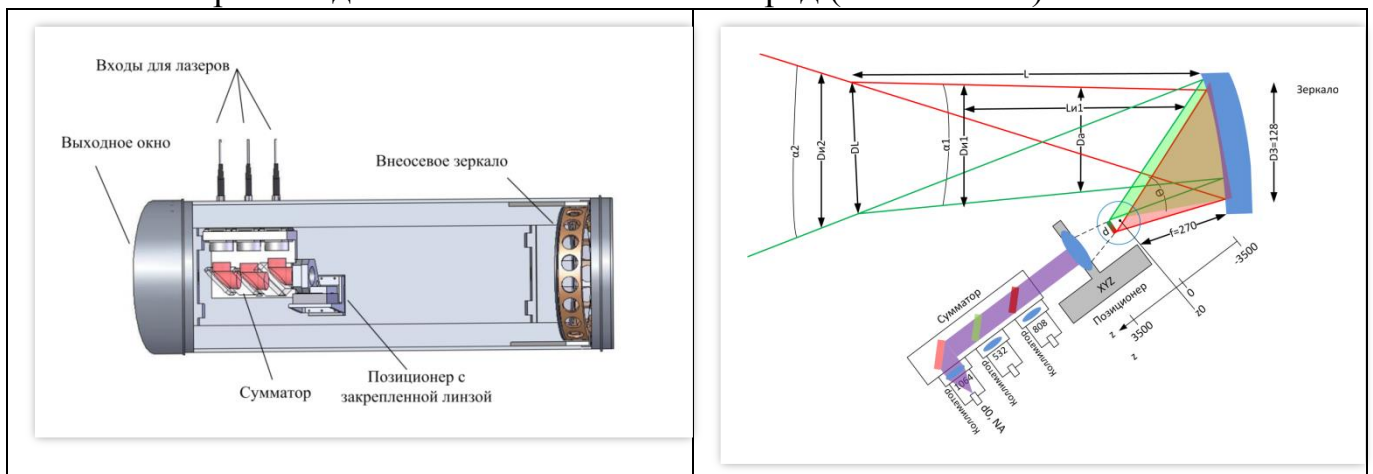


Рисунок 13. Экспериментальный образец системы формирования и наведения лазерных пучков в системе беспроводной передачи энергии. а) схема расположения оптических элементов, вид сверху. б) эквивалентная схема

Разработаны и реализованы в экспериментальных исследованиях различные методы измерения характеристик широкоапертурных (до 1-2 метров) лазерных

пучков. Показано, что погрешность измерения, например, характеристик эллипсоидального пучка может быть менее 1%. Для исследования особенностей воздействия интенсивных лазерных пучков на фотоэлектрические приемники-преобразователи после прохождения протяженных атмосферных трасс и отработки систем беспроводной передачи энергии была создана атмосферная трасса длиной 1,35 км. Основные научные результаты, представленные в главе 5, приведены в работах: [1-4, 7-9, 12, 19]; 5,7,9,11 Приложения Б.

В шестой главе приведены результаты цикла работ по исследованиям возможности создания высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей интенсивного лазерного излучения в системах дистанционного энергоснабжения на основе полупроводниковых гетероструктур. Полупроводниковые соединения типа A_3B_5 с «прямой» структурой зон являются наиболее перспективными материалами для создания таких ФЭП. Исследования проводились для двух диапазонов длин волн, определенных научным коллективом под руководством автора для технологии дистанционного энергоснабжения: $\lambda \sim 0,8$ мкм для обеспечения максимального КПД тракта и $\lambda \sim 1$ мкм, обеспечивающего максимальную дальность передачи энергии.

В результате теоретических и технологических исследований были получены полупроводниковые структуры с эффективностью фотоэлектрического преобразования более 60% для условий функционирования в системах дистанционного энергоснабжения (размеры - $1 \div 4$ см², непрерывный режим работы при плотностях освещенности $1 \div 10$ Вт/см²) для $\lambda \sim 0,8$ мкм и с эффективностью $\sim 40\%$ для $\lambda \sim 1$ мкм. Проведены экспериментальные исследования воздействия лазерного излучения на физические свойства полученных полупроводниковых структур. Разработаны подходы по созданию на основе высокоэффективных ФЭП приемников-преобразователей интенсивного лазерного излучения в условиях неравномерной освещенности с минимальными потерями (не более 10%) из-за влияния турбулентности атмосферы и аберраций оптических систем формирования лазерных пучков. Основные научные результаты, представленные в главе 6, приведены в работах: [6, 14, 16, 23, 24, 27]; 6,8,10 Приложения Б.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:

1. Проведены экспериментальные исследования влияния периодических структур на электродинамические процессы при энергиях от сотен МэВ до десятков ГэВ. Предложена и обоснована возможность применения в экспериментальных исследованиях монокристаллических вольфрамовых мишеней и тяжелых спектрометрических монокристаллов, что позволило проводить исследования существенно квантовых электродинамических процессов (эффекта «сильного» поля) на отечественных ускорителях. Предложены и реализованы методы исследования изготавливаемых монокристаллических мишеней на гамма-дифрактометре и линейном ускорителе электронов;
2. Разработаны и реализованы различные методы ориентации тяжелых кристаллических мишеней на пучках электронов и гамма-квантов;

3. Экспериментально показано, что если электромагнитный ливень начинает развиваться в периодической среде, то его дальнейшее развитие существенно изменяется на толщинах в десятки раз больших, чем толщина кристалла;
4. Для исследований развития электромагнитных ливней в ориентированных средах предложено использовать спектрометрические тяжелые прозрачные монокристаллы. В работе применялись монокристаллические мишени волфрамата и галлий-гадолиниевого граната различных толщин. Разработан и реализован метод ориентации таких кристаллов на электронном пучке синхротрона ИФВЭ (Протвино). Показано, что и в сложно устроенных кристаллических решетках периодические структуры способствуют эффективному дроблению энергии первичной частицы и ливень развивается на более коротких расстояниях, чем в разориентированном кристалле;
5. Экспериментально обнаружено, что энергетические потери электронного пучка в несколько десятков ГэВ в первых радиационных единицах ориентированных спектрометрических кристаллов могут в два с лишним раза превышать потери в разориентированном кристалле, а с ростом энергии частиц различие в энергопотерях станет еще более существенным. На основании обнаруженных и исследованных нами эффектов «ускоренного» развития электромагнитных каскадов в ориентированных средах предложен способ направленной спектрометрии;
6. Проведен цикл работ по космической ядерной энергетике больших мощностей. На основании анализа состояния космической солнечной энергетике с учетом достижений в разработке наногетероструктурных каскадных фотоэлектрических преобразователей и имеющегося в Российской космической индустрии задела по космическим ядерным энергоустановкам (КЯЭУ) показано, что одной из самых проработанных и перспективных космических технологий для генерации электрической энергии субмегаваттного уровня является термоэмиссионная схема реактора-преобразователя КЯЭУ. Проведенные нашей научной группой исследования показали, что электрическая энергия от таких мощных космических энергоустановок может эффективно передаваться на другие космические аппараты с помощью разрабатываемой автором технологии беспроводной передачи электрической энергии лазерным ИК излучением;
7. Исследованы технические и технологические возможности современных диодных, оптоволоконных лазерных систем и полупроводниковых материалов для фотоэлектрического преобразования в качестве ключевых элементов технологии дистанционного энергоснабжения лазерным излучением. Предложено и обосновано применение этой технологии для использования в космических межорбитальных транспортных системах, космических технологических системах с крайне низким уровнем микрогравитации, энергоснабжении малых космических аппаратов и БПЛА;
8. Разработаны экспериментальные методы создания узких лазерных пучков для систем беспроводной передачи электрической энергии в космосе и на земле монохроматическим ИК излучением. Разработаны и реализованы в экспериментальных исследованиях различные методы измерения характеристик

- широкоапертурных лазерных пучков. Показано, что погрешность измерения, например, характеристик эллипсоидального пучка может быть менее 1%;
9. Созданы системы формирования лазерных пучков для передачи энергии в турбулентной атмосфере с возможностью компенсации уходов пучка из апертуры приемников-преобразователей в зависимости от состояния турбулентности. Для отработки систем беспроводной передачи энергии создана атмосферная трасса длиной 1,35 км;
 10. Проведен цикл работ по исследованиям возможности создания высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей интенсивного лазерного излучения в системах дистанционного энергоснабжения на основе полупроводниковых гетероструктур. Полупроводниковые соединения типа A_3B_5 с «прямой» структурой зон являются наиболее перспективными материалами для создания таких ФЭП. Исследования проводились для двух диапазонов длин волн, определенных научным коллективом под руководством автора для технологии дистанционного энергоснабжения: $\lambda \sim 0,8$ мкм для обеспечения максимального КПД тракта и $\lambda \sim 1$ мкм, обеспечивающего максимальную дальность передачи энергии;
 11. В результате теоретических и технологических исследований получены полупроводниковые структуры с эффективностью фотоэлектрического преобразования более 60% для условий функционирования в системах дистанционного энергоснабжения (размеры - $1 \div 4$ см², непрерывный режим работы при плотностях освещенности $1 \div 10$ Вт/см²) для $\lambda \sim 0,8$ мкм и с эффективностью $\sim 40\%$ для $\lambda \sim 1$ мкм. Проведены экспериментальные исследования воздействия лазерного излучения на физические свойства полученных полупроводниковых структур. Разработаны подходы по созданию на основе высокоэффективных ФЭП приемников-преобразователей интенсивного лазерного излучения в условиях неравномерной освещенности с минимальными потерями (не более 10%) из-за влияния турбулентности атмосферы и аберраций оптических систем формирования лазерных пучков.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Kapranov V. V., Matsak I. S., Tugaenko V. Yu., Blank A.V., Suhareva N. A. / Atmospheric turbulence effects on the performance of the laser wireless power transfer system // SPIE Digital Library Proceedings Volume 10096, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXIX; 100961E (2017); Photonics West Conference SPIE LASE, 2017, San Francisco, California, United States. DOI: 10.1117/12.2252013. EID: 2-s2.0-85016954803. WOS:000399927800038.
2. Matsak I. S., Kapranov V. V., Tugaenko V. Yu., Sergeev E. S., Babanin E. A., Suhareva N. A. / Super narrow beam shaping system for remote power supply at long atmospheric path // SPIE Digital Library Proceedings Volume 10090, Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XIX; 100900U (2017); Photonics West Conference SPIE LASE, 2017, San Francisco, California, United States. DOI: 10.1117/12.2250752. EID: 2-s2.0-85019400537. WOS:000402429200026.
3. Babanin Eu. A., Vohnik O. M., Kapranov V. V., Suhareva N. A., Tugaenko V. Yu. / Spatial profiles of statistical moments for collimated laser beams at the end of long atmospheric path // Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1003528 (November 29, 2016); DOI:10.1117/12.2249344. EID: 2-s2.0-85007029648. WOS:000392623500080.
4. Matsak I.S., Kapranov V.V., Tugaenko V.Y., Kudryavtsev E.M. / Precise baseline correction using statistical criteria in the measurement of characteristics of laser beams // Journal of Physics: Conference Series. - 2016.- Vol. 737, no. 1.- P. 012068., DOI: 10.1088/1742-6596/737/1/012068. EID: 2-s2.0-84989862929.
5. Тугаенко В.Ю. / Поддержание орбиты микроспутников электроракетными двигателями с лазерным электроснабжением // Всероссийская научно-техническая конференция «Расплетинские чтения – 2016». Аннотированный сборник материалов конференции. ПАО «НПО «Алмаз», 2015.
6. Zayats O., Tugaenko V., Matsak I., Rumyantsev V., Khvostikov V. / Receivers for WPT by High Power Narrow Laser Beams // Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 2015, pp. 1494 - 1497, ISBN 3-936338-39-6, DOI 10.4229/EUPVSEC20152015-4CV.3.40.
7. Kapranov V.; Tugaenko V.; Marakasov D., Kudryavtsev A. / Experimental setup for investigation of narrow IR laser beam propagation along horizontal 1300m urban path // Proc. SPIE 9680, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 96801C (November 19, 2015); DOI: 10.1117/12.2205492. EID: 2-s2.0-84963541676. WOS:000366810300048.
8. Капранов В.В., Тугаенко В.Ю., Маракасов Д.А., Кудрявцев А.Н. / Горизонтальная атмосферная трасса для исследования турбулентных возмущений энергетических характеристик узконаправленных лазерных ИК пучков в городских условиях // Известия высших учебных заведений. Физика, т.58 в.№8/2, стр.172-174, 2015 г.
9. Мацак И.С., Кудрявцев Е.М., Тугаенко В.Ю. / Моделирование погрешностей измерений диаметра широкоапертурного лазерного пучка // Компьютерные исследования и моделирование, 2015, т.7, №1, с.113-124, ISSN 20176-7633.
10. Zayats O.V., Tugaenko V.Yu., Khvostikov V.P. / UAV remote power supply system by laser radiation // ICAS- 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 7-12 Sept.2014, St.Petersburg. EID: 2-s2.0-84910603287.

11. Бескровная И.А., Евдокимов Р.А., Кинаш П.М., Ковалев И.И., Тугаенко В.Ю. / Сравнительная оценка технико-экономической эффективности использования солнечных и ядерных энергетических установок в составе лунной базы // Космическая техника и технологии. 2014. № 4(7). С. 76-89.
12. Мацак И.С., Тугаенко В.Ю., Сергеев Е.С. / Метод измерения диаметра широкоапертурного пучка лазерного излучения «Измерительная техника» (Метрология) №4 стр.13-34, 2014. Matsak I.S., Tugaenko V.Y., Sergeev E.S. / A Method of Measuring the Diameter of a Wide-Aperture Beam of Laser Radiation // Measurement Techniques, 2014, Vol. 57, № 6, pp. 651-657, DOI 10.1007/s11018-014-0514-0; WoS:000343604600013; EID:2-s2.0-84925522239.
13. Капранов В.В., Тугаенко В.Ю. / Беспроводная передача электрической энергии на Земле и в космосе // Монография «Сборник научно-популярных статей – победителей конкурса РФФИ 2013 года», выпуск 17, стр.332-339.
14. Корнилов В.А., Тугаенко В.Ю. / Приёмник-преобразователь концентрированного электромагнитного излучения, патент // RU 2499327. Оpubл. 20.11.2013. Бюл. №32.
15. Корнилов В.А., Тугаенко В.Ю. / Орбитальная космическая система, патент // RU 2488527. Оpubл. 27.07.2013. Бюл. №21.
16. Заяц О.В., Корнилов В.А., Тугаенко В.Ю. / Фотоэлемент приёмника-преобразователя лазерного излучения в космосе, патент // RU 2487438. Оpubл. 10.07.2013. Бюл. №19.
17. Евдокимов Р.А., Корнилов В.А., Легостаев В.П., Лобыкин А.А., Лопота В.А., Тугаенко В.Ю. / Космическая система для производства материалов в космосе, патент // RU 2478063. Оpubл. 27.03.2013. Бюл. №9.
18. Капранов В.В., Тугаенко В.Ю. / Маркерные системы в техническом зрении для задач обнаружения объектов в атмосфере на расстояниях до 1 км //«Приборы» №10(160) 2013, ISSN 2071-7865.
19. Kapranov V.V., Evdokimov R.A., Matsak I.S., Tugaenko V.Y. / Demonstration of ISS based IR WPT system and capabilities of atmospheric researches // Proceedings of the 64rd International Astronautical Congress 2013, IAC 2013, Beijing, China, vol. 9, 2013, p. 6661-6663, EID:2-s2.0-84904680184.
20. Baskov, V.A., Kim, V.V., Luchkov, B.I., Tugaenko, V.Y., Khablo, V.A Multiplicity of charged particles in electron-induced showers developing in oriented silicon and tungsten crystals Bulletin of the Lebedev Physics Institute Volume 40, Issue 5, May 2013, Pages 109-112. DOI: 10.3103/S1068335613040052. EID: 2-s2.0-84877354248. WOS:000318731500005.
21. Baskov, V.A., Kim, V.V., Luchkov, B.I., Tugaenko, V.Y., Khablo, V.A Orientation dependences of the response of an electromagnetic spectrometer with oriented crystal converter Bulletin of the Lebedev Physics Institute 2013. DOI: 10.3103/S1068335613050011. EID: 2-s2.0-84878647578. WOS:000319768200001.
22. Baskov, V.A., Kim, V.V., Luchkov, B.I., Tugaenko, V.Y., Khablo, V.A Effect of oriented crystalline converter temperature on spectrometer response Bulletin of the Lebedev Physics Institute 2012. DOI: 10.3103/S1068335612080039. EID: 2-s2.0-84866026901.
23. Bogushevskaya V. A., Zhelnin B. V., Zayats O. V., Maslyakov Ya. N., Matsak I. S., Nikonov A. A., Tugaenko V. Yu. / Exploration of ISS transport vehicles solar arrays usage as receivers of infrared laser radiation // Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, September 2012. EID: 2-s2.0-84883528292.
24. Bogushevskaya V. A., Zhelnin B. V., Zayats O. V., Maslyakov Ya. N., Matsak I.

S., Nikonov A. A., Obrucheva Ye. V. and Tugaenko V. Yu. / An Experimental Investigation of the Feasibility of Using Silicone and Gallium Arsenide Solar Batteries on Space Vehicles for Receiving Energy of Laser Infrared Emission // ISSN 0040-6015, Thermal Engineering, 2012, Vol. 59, No. 13, pp. 975–980. DOI: 10.1134/S0040601512130034. EID: 2-s2.0-84874635221.

25. Baskov V.A., Kim V.V., Luchkov B.I., Tugaenko V.Y., Khablo V.A / Charged particle multiplicity in showers formed by gamma-rays in oriented tungsten crystal // Bulletin of the Lebedev Physics Institute 2011. DOI: 10.3103/S1068335611060029. EID: 2-s2.0-79959831426.

26. Монография «Луна – шаг к технологиям освоения Солнечной системы» (соавтор разделов 4.4, 5.4, 6.1, 6.2, 6.4), Под научной редакцией Легостаева В.П. и Лопоты В.А., М.: РКК «Энергия». 2011.

27. Богушевская В.А., Жалнин Б.В., Заяц О.В., Масляков Я.Н., Мацак И.С., Никонов А.Н., Обручева Е.В., Тугаенко В.Ю. / Экспериментальное исследование возможности использования кремниевых и арсенид-галлиевых батарей космических аппаратов для приема энергии лазерного ИК-излучения // Известия РАН. Энергетика. №2 с.10-17, 2012.

28. Грибков А.С., Евдокимов Р.А., Синявский В.В., Тугаенко В.Ю. / Повышение эффективности многоразового межорбитального электроракетного буксира при запуске полезных грузов с приэкваториальных космодромов // Известия РАН. Энергетика. №3 с.65-74, 2011.

29. Chertok B., Evdokimov R., Legostaev V., Lopota V., Sokolov B., Tugaenko V. Remote electric power transfer between spacecrafts by infrared beamed energy // AIP Conf. Proc. 1402, 489-496, 2011. DOI: 10.1063/1.3657057. EID: 2-s2.0-81855180545.

30. Тугаенко В.Ю., “Беспроводная передача энергии в космосе и из космоса” раздел монографии «Космонавтика XXI века» Под научной редакцией Б.Е. Чертока, М.: Изд. РТСофт. 2010.

31. Грибков А.С., Евдокимов Р.А., Синявский В.В., Соколов Б.А., Тугаенко В.Ю. Перспективы использования беспроводной передачи электрической энергии в космических транспортных системах // Известия РАН. Энергетика. №2 с.118-123, 2009.

32. Грибков А.С., Евдокимов Р.А., Легостаев В.П., Лопота В.А., Максимов В.А., Островский В.Г., Синявский В.В., Тугаенко В.Ю. / Электроракетный транспортный аппарат для обеспечения больших грузопотоков в космосе // Известия РАН. Энергетика. №2. с.101-111, 2009.

33. Бранец В.Н., Грибков А.С., Джафаров Г.А.,...Тугаенко В.Ю. и др. / Атомная электростанция обитаемой лунной базы // Известия РАН. Энергетика. N 3, с.15-21, 2007.

34. Baskov V.A., Bugorsky A.P., Kachanov V.A., (...), Tugaenko V.Yu., Vasil'ev A.N / Electromagnetic cascades in oriented crystals of garnet and tungstate Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics 456 (1999), p.86. EID: 2-s2.0-9944227852.

35. Baskov V.A., Bugorskiï A.P., Vasil'ev A.N., (...), Tugaenko V.Yu., Khablo V.A. / Electromagnetic showers in oriented garnet crystals // Technical Physics Letters (B), 1998. EID: 2-s2.0-0032390460.

36. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V., (...), Sergienko V.I., Tugaenko V.Yu. / Electromagnetic showers in transparent crystals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 145(1998) p.92. EID: 2-s2.0-0032475616.

37. Басков В.А., Бугорский А.П., Васильев А.Н.,...Тугаенко В.Ю. и др. / Электромагнитные ливни в ориентированных кристаллах граната // Письма в ЖТФ т.24, №11 с.60-64, 1998.

38. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V.,...Tugaenko V.Y. at all / Electromagnetic showers in aligned crystals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 122(1997) p.194-198. DOI: 10.1016/S0168-583X(96)00641-6. EID: 2-s2.0-0031077243.
39. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Сергиенко В.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А. / Гамма-телескоп с кристаллическим конвертором // ПТЭ №6, с.10-13, 1996 (Gamma-telescope with crystal converter. Instruments and Experimental Techniques). EID: 2-s2.0-27544494728.
40. Басков В.А., Говорков Б.Б., Ким В.В.,...Тугаенко В.Ю. и др. / Развитие электромагнитных ливней высокоэнергетическими электронами с энергией 8-27 ГэВ в ориентированных кристаллах вольфрама // Письма в ЖЭТФ №57, с.282-284, 1993.
41. Baskov V.A., Govorkov B.B., Kim V.V.,...Tugaenko V.Y. at all / Electromagnetic showers induced by high energy electrons in aligned tungsten crystals // Radiation effects and defects in solids, v.25, p.23-28, 1993. DOI: 10.1080/10420159308225478. EID: 2-s2.0-84973066668.
42. Baskov, V.A., Govorkov, B.B., Kim, V.V., (...), Tugaenko, V.Yu., Khablo, V.A. Application of oriented crystals in high-energy gamma and electron spectroscopy Sbornik - Kratkie Soobshcheniya po Fizike AN SSSR 1992. EID: 2-s2.0-0026918738.
43. Baier V.N., Baskov V.A., Ganenko V.B., ...Tugaenko V.Y. at all / Radiation from electrons in tungsten crystals Zh. Eksp. Teor. Fiz. 101,1351-1354 (April 1992) (V.P. JETP, 1992 г., Том 74, Вып. 4, стр. 725).
44. Басков В.А., Ганенко В.Б., Гущин В.А.,...Тугаенко В.Ю. и др. / Определение направления на гамма-источники с помощью электромагнитных ливней в ориентированных кристаллах // Приборы и техника эксперимента №5, p.52-55, 1992. Determination of γ -quanta source position by electromagnetic shower from oriented crystal // Pribory i Tekhnika Eksperimenta NEW YORK 1992. EID: 2-s2.0-0026911629.
45. Басков В.А., Говорков Б.Б., Ким В.В.,...Тугаенко В.Ю. и др. / Высокоэнергетическая адрон-электронная режекция в ориентированных кристаллах вольфрама // Письма в ЖЭТФ №56, с.233-236, 1992.
46. Leicov N.G., Akimov V.V., Volsenskaya V.P.,... Tugaenko V.Y., at all / Spectral characteristics of solar flares observed by the "Gamma-1" telescope($E > 30$ MeV) // Astronomy and astrophysics supplement ser. April 1992 Symp. "Recent adv. in high ener. astronomy France, Marh, 1992. Акимов В.В., Афанасьев В.Г., Балебанов В.М.,... Тугаенко В.Ю. и др. Особенности фазовой кривой светимости гамма-пульсара PSR 0833-45 по данным наблюдений телескопом «Гамма-1» // Письма в Астрономический журнал т.18, №4, с.315-321, 1992.
47. Акимов В.В., Афанасьев В.Г., Белоусов А.С.,... Тугаенко В.Ю. и др. Регистрация гамма-лучей высокой энергии телескопом «Гамма-1» от солнечных вспышек 26 марта и 15 июня 1991 г. // Письма в Астрономический журнал т.18, №2, с.167-172, 1992.
48. Акимов В.В., Афанасьев В.Г., Балебанов В.М.,... Тугаенко В.Ю. и др. / Наблюдение пульсара PSR 0833-45 телескопом «Гамма-1» // Письма в Астрономический журнал т.17, №6, с.501, 1991.
49. Басков В.А., Говорков Б.Б., Ганенко В.Б., ...Тугаенко В.Ю. и др. /Ориентационная зависимость развития электромагнитных ливней в кристалле вольфрама // Письма в ЖЭТФ №52, в.9, с.1082-1084, 1990
50. Басков В.А., Ганенко В.Б., Гущин В.А.,...Тугаенко В.Ю. и др. /Ориентирование монокристаллов по выходу электромагнитного ливня // ПТЭ №6, с.73-75, 1990

51. Басков В.А., Ганенко В.Б., Гушин В.А.,...Тугаенко В.Ю. и др. / Развитие электромагнитных ливней в ориентированных кристаллах вольфрама // Письма в ЖЭТФ №52, в.9, с.740-742, 1990.
52. Басков В.А., Ганенко В.Б., Гушин В.А.,...Тугаенко В.Ю. и др. /Ориентационная зависимость каскадных процессов в кристалле кремния // Письма в ЖЭТФ №50, с.395-397, 1989.
53. Байер В.Н., Басков В.А., Ганенко В.Б.,...Тугаенко В.Ю. и др. Излучение электронов с энергией 28 ГэВ в толстом кристалле вольфрама // Письма в ЖЭТФ №49, с.533-535, 1989.
54. Курбаков А.И., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю. / Гамма-дифракционное исследование структурного совершенства монокристалла вольфрама // Высокочистые вещества, №3, стр.212-213, 1988
55. Semenov Y.P., Ovchinnikov V.S., Tugaenko V.Y. / A space observatory for astrophysical explorations in the realm of gamma-ray astronomy // Space Science Review, v.49 (1988), p.107-109. DOI: 10.1007/BF00173746. EID: 2-s2.0-34249965610.
56. Tugaenko V.Y., Akimov V.V. at all / Determination of the characteristics of the gamma-ray telescope Gamma-1 // Space Science Review, v.49 (1988), p.125-138. DOI: 10.1007/BF00173748. EID: 2-s2.0-26444472214.
57. Tugaenko V.Y., Akimov V.V. at all / The gamma-ray telescope "Gamma-1" // Space Science Review, v.49 (1988), p.111-124. DOI: 10.1007/BF00173747. EID: 2-s2.0-0038259436.
58. Тугаенко В.Ю., Зверев В.Г., Лучков Б.И. /Ориентирование монокристаллической мишени на пучке «меченых» гамма-квантов // ПТЭ №2, с.188-189, 1988 (Instruments and experimental techniques New York). EID: 2-s2.0-0024096536.

Перечень НИОКР, выполненных по теме диссертационной работы
по направлению разработки технологии дистанционного энергоснабжения
лазерным излучением

№ п/ п	Наименование, результаты исследований	Заказчик, грант/контракт, период выполн. работ, объем фин. (млн.руб)	Научные руководители
1	«Исследование принципов и методов дистанционной передачи энергии для космических энергетических систем» НТО: инв. П40604, РКК «Энергия», 89стр.	РФФИ Грант №08-08-13657 2008-2009 1,5	Б.А. Соколов В.Ю. Тугаенко
2	«Исследование возможностей управления волновым фронтом источников инфракрасного излучения со сложной пространственной структурой для космических энергетических систем»	РФФИ Грант № 09-08-13753 2009- 2010 2,0	Академик Б.Е. Черток
3	«Теоретическое и экспериментальное обоснование принципов построения космической межорбитальной транспортной системы на основе ядерной энергетической установки, многоразовых буксиров и технологии беспроводной передачи электрической энергии между космическими аппаратами для перспективных программ освоения космоса» НТО: инв. П40533 ч.1-5(БРК4/722-13) РКК «Энергия», 2011, 1341стр.	Минобрнауки Контракт 2009-1.1- 000-082-066 2009–2011 13,0	Академик В.П. Легостаев
4	«Теоретические и экспериментальные исследования базовых элементов технологии беспроводной передачи электрической энергии между космическими аппаратами ближним инфракрасным монохроматическим излучением» НТО: инв. П43929, РКК «Энергия», 2012, 360стр. (Проведены 11 НИР участниками НОЦ).	Минобрнауки, Соглашение №14.U02.21.0101 2012 3,0	В.Ю. Тугаенко
5	"Модернизация экспериментальной базы для научных исследований". НТО: инв. П44634, РКК «Энергия», 2013, 80 с. Разработан и создан экспериментальный образец системы формирования и наведения лазерного излучения.	Инвестиционный проект РКК «Энергия» 2012 3,0	В.Ю. Тугаенко

6	«Исследования по повышению эффективности фотоэлектрических приемников монохроматического инфракрасного излучения. Разработка и экспериментальная отработка фотоэлектрического модуля приемника-преобразователя» НТО: инв. П43629(227 с.), П44872(190с.), П44972(БРК4/1240-13) РКК «Энергия», 2013, 210стр.)	Роскосмос Договор № 61/7Ц(249-1035-2011)-1034/99-2012 2012-2013 18,0	В.П. Легостаев В.Ю. Тугаенко
7	«Экспериментальные и расчётные исследования эффективности передачи электрической энергии ИК излучением для созданных/создаваемых прототипов космических систем на расстояние 1,5 км и разработка требований для создания в Корпорации стенда испытательной трассы» Разработана и создана атмосферная 1,5 км. трасса; НТО: инв. П45862 РКК «Энергия», 2015, 130 стр.	Инвестиционный проект РКК «Энергия» 2014, 2016-2017 7,8	В.Ю. Тугаенко
8	«Мощные фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения с КПД более 60% для систем лучевой энергетики» НТО: инв. П47888 (Г-731/17) РКК «Энергия», 2017, 1160 стр.	Минобрнауки Соглашение № 14.604.21.0089 2014-2016 34,7	в ФТИ им. А.Ф. Иоффе – В.П. Хвостиков; в РКК "Энергия" - В.Ю. Тугаенко
9	«Создание прототипа оптической системы связи с пассивным передатчиком и экспериментальная проверка ее основных характеристик» НТО: инв. П47862 РКК «Энергия», 2017, 42 стр.	Грант Правительства Московской области в сферах науки, технологий, техники и инноваций за 2016 г. Договор №91/08-16 от 01.08.2016 1,5	В.Ю. Тугаенко
10	«Разработка и исследование моделей построения высокоэффективных матричных приемников-преобразователей ИК-излучения с учётом флуктуаций распределения яркости в энергетическом пятне»	Грант РФФИ № 15-08-07484 2016 - 2017 0,9	О.В. Заяц
11	«Комплексное исследование механизмов создания предельно узких пучков монохроматического излучения из космоса на Землю для беспроводной передачи электрической энергии и изучения атмосферы» Промежуточные отчеты по проекту представлены в электронном виде в системе «Грант-экспресс») РКК «Энергия». М: 2015 (45 листов); 2016 (48 листов)	Грант РФФИ № 15-08-07484 2015 – 2017 1,35	В.Ю. Тугаенко

**Перечень НИОКР, выполненных по теме диссертационной работы по
космической энергетике больших мощностей под руководством В.Ю. Тугаенко**

№ п/ п	Наименование, результаты исследований	Заказчик, грант/контракт, период выполн. работ
1	НИР «Анализ проблем создания бортовых космических ядерных энергетических систем и разработка предложений по проектному облику ядерных электроракетных двигательных установок домегаваттного уровня для задач обеспечения грузопотока на межпланетных трассах. Анализ транспортных схем для реализации кластеров программ на разных этапах освоения Луны» НТО «Анализ и обобщение имеющегося в России задела по космическим ядерным энергетическим установкам большой мощности. Анализ проблем создания бортовых космических ядерных энергетических систем домегаваттного уровня», инв.№ П42808, РКК «Энергия». НТО «Разработка предложений по проектному облику ядерных электроракетных двигательных установок (ЯЭРДУ) до мегаваттного уровня для задач обеспечения грузопотока на межпланетных трассах», № ГР 01200965535 – инв.№ П43101 РКК «Энергия», 167 стр. НТО «Анализ различных транспортных схем для реализации кластеров программ на разных этапах освоения Луны», инв.№ П40959 РКК «Энергия»	ФГУП ЦНИИмаш (в рамках ГК № 851-2118/11 от 01.04.2011 по НИР «Магистраль (Гарантия)» 2011
2	НИР «КС-Транспорт-РКК», СЧ НИР «Магистраль» (Задел-Матрица) НТО «Обоснование проектного облика перспективных космических платформ на базе ЯЭУ электрической мощностью 150 и 500 кВт с улучшенными энергоресурсными и массогабаритными характеристиками. Разработка предложений по целевому применению транспортно-энергетического модуля с ЯЭУ мегаваттного класса», инв. № П44992 РКК «Энергия», 459 стр.	ФГУП ЦНИИмаш (Договор № 67/4ПО-2013/(249-1035-2011)-1205/250-2013) 2013
3	СЧ НИР «Магистраль» (Облик-ПК - Луна - Энергообеспечение РКК-2014) НИР «Разработка технических требований к ЯЭУ автономного энергетического модуля лунного базирования (лунной атомной электростанции)». Предложения в проект ТТЗ на ОКР по разработке автономного энергетического модуля лунного базирования (лунной атомной электростанции)» НТО «Разработка технических требований к ЯЭУ автономного энергетического модуля лунного базирования (лунной атомной электростанции)», инв.№ П45762, РКК «Энергия». 81 стр. НТО «Предложения в проект ТТЗ на ОКР по разработке автономного энергетического модуля лунного базирования (лунной атомной электро-станции)» инв.№ П46668, РКК «Энергия». 206 стр.	ФГУП ЦНИИмаш (Договор № 104/4ПО-2014/(165-1312-2014)-1312/289-2-14) 2014-2015

Список патентов по теме диссертации

№ п/п	№ патента и дата публикации	Название изобретения	Автор(ы)	Суть изобретения и результаты (кратко)
1	№ 2478063. 27.03.2013	Космическая система для производства материалов в космосе	Корнилов В.А., Тугаенко В.Ю., Лопота В.А., Легостаев В.П., Евдокимов Р.А., Лобыкин А.А.	Изобретение основано на предложении передавать энергию лучом лазера с одного КА на другой КА (технологический модуль) для снижения величины микроускорений на борту технологического модуля.
2	№ 2487438. 10.07.2013	Фотоэлемент приёмника-преобразователя лазерного излучения в космосе	Корнилов В.А., Тугаенко В.Ю., Заяц О.В.	Изобретение позволяет увеличить КПД и удельные значения фототока ФЭП за счёт генерации носителей заряда практически во всем объеме фотоактивной области.
3	№ 2488527 27.07.2013	Орбитальная космическая система	Корнилов В.А., Тугаенко В.Ю.	Изобретение позволяет создать условия по квазистатическим микроускорениям на борту КА не хуже $10^{-7} - 10^{-8} g$.
4	№ 2499327. 20.11.2013	Приёмник-преобразователь концентрированного ЭМ излучения	Корнилов В.А., Тугаенко В.Ю.	Предложена конструкция приёмника-преобразователя концентрированного ЭМИ с системой конических оболочек размещаемых на его поверхности под определёнными углами.
5	№ 150172. 10.02.2015.	Установка для контроля параметров фотоэлектрических преобразователей	Тугаенко В.Ю., Заяц О.В., Корнилов В.А., Мацак И.С., Никитина Т.А., Разуваев А.Е., Савельев В.В.	Предложена конструкция лабораторной установки для автоматизированного контроля фотоэлементов (ФЭ), фотоэлектрических модулей (ФЭМ) и фотоэлектрических приёмников-преобразователей (ФПП) на их основе при различных условиях их освещения лазерным излучением.
6	№ 2566370 27.10.2015	Космический приёмник-преобразователь лазерного излучения	Корнилов В.А., Тугаенко В.Ю., Мацак И.С.	Предложена конструкция всенаправленного приёмника-преобразователя лазерного излучения.
7	№ 2594953 20.08.2016	Приёмник-преобразователь лазерного излучения	Корнилов В.А., Тугаенко В.Ю.	Цель изобретения - минимизировать схемные потери при коммутации ФЭ и фотоэлектрических модулей, в условиях неравномерной интенсивности лазерного излучения.

8	№ 2593821 10.08.2016	Фотоэлемент приём-ника-преобразователя лазерного излучения	Корнилов В.А., Тугаенко В.Ю.	Предложена конструкция защитного оптического покрытия ФЭ.
9	№ 2624976 11.07.2017	Способ определения характ. оптического канала передачи информационного сигнала	Корнилов В.А., Овчинников Д.С., Разуваев А.Е., Тугаенко В.Ю.	Изобретение посвящено решению задачи осуществления лазерной связи с КА при прохождении оптического излучения через плазменный слой, образующийся при абляционном охлаждении корпуса возвращаемого КА на этапе входа его в атмосферу Земли.
10	№ 2630190 05.09.2017	Всенаправленный ПП лазерного излучения.(2 вар.)	Корнилов В.А., Капранов В.В., Тугаенко В.Ю.	Предложены конструкции всенаправленного ПП.
11	№ 2630738 22.12.2017	Приёмник-преобразователь лазерного излучения	Корнилов В.А., Мацак И.С., Разуваев А.Е., Тугаенко В.Ю.	Предложено техническое решение по способу коммутации ФЭ конструктивно объединённых в фотоэлектрические модули (ФЭМ) размещённые на приёмной плоскости ПП, причём ФЭ в ФЭМ электрически изолированы.
12	№ 2663121 07.08.2018	Оптическая система формирования и наведения лазерного излучения	Корнилов В.А., Мацак И.С., Сергеев Е.С., Тугаенко В.Ю.	Предложена компактная оптическая система формирования и наведения (СФИН) лазерного излучения, эффективно собирающая единичные лазерные пучки различных источников с оптоволоконным выводом и формирующая малорасходящийся суммарный пучок лучей.

Подписано в печать 17.07.2019. Формат 210×148
Тираж 100 экз. Заказ № 7482-19
Отпечатано с готового оригинала
в типографии ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва»