

Научная статья

УДК 531/534; 535; 537; 538.9

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-83-104

Отдел прикладной физики физического факультета

Александр Евгеньевич Зарвин¹, Евгений Николаевич Галашов²,
Борис Семенович Ездin³, Николай Геннадьевич Коробейщиков⁴,
Петр Григорьевич Пасько⁵, Александр Сергеевич Яскин⁶

¹⁻⁶ Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹zarvin@phys.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1973-5088>

²cwo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7764-6158>

³bse@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4563-9265>

⁴korobei@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1047-4894>

⁵pgpasko@ngs.ru,

⁶yas@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5366>

Аннотация

В работе рассмотрены история, этапы становления и развития отдела прикладной физики физического факультета НГУ. Описана структура отдела, решенные и решаемые в настоящее время научные задачи, рассмотрены результаты научной, педагогической и инновационной деятельности основных подразделений отдела.

Ключевые слова

лаборатория, отдел, история развития, установки, прикладная физика

Для цитирования

Зарвин А. Е., Галашов Е. Н., Ездin Б. С., Коробейщиков Н. Г., Пасько П. Г., Яскин А. С. Отдел прикладной физики физического факультета // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 83–104. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-83-104

Department of Applied Physics of the Faculty of Physics

Alexandr E. Zarvin¹, Evgenii N. Galashov²,
Boris S. Ezdin³, Nikolay G. Korobeishchikov⁴,
Petr G. Pasko⁵, Alexander S. Yaskin⁶

¹⁻⁶ Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹zarvin@phys.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1973-5088>

²cwo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7764-6158>

³bse@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4563-9265>

⁴korobei@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1047-4894>

⁵pasko@ngs.ru,

⁶yas@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5366>

Abstract

The paper considers the history, stages of formation and development of the Department of Applied Physics of the Faculty of Physics of NSU. The structure of the department, solved and currently solved scientific tasks are described. The results of scientific, pedagogical and innovative activities of the main divisions of the department are considered.

Keywords

laboratory, department, development history, installations, applied physics

For citation

Zarvin A. E., Galashov E. N., Ezdin B. S., Korobeishchikov N. G., Pasko P. G., Yaskin A. S. Department of Applied Physics of the Faculty of Physics. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 83–104 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-83-104

Отдел прикладной физики

Отдел прикладной физики (ОПФ) (первоначально – лаборатория прикладной физики) образован в 1972 г., в настоящее время является старейшим научным подразделением в Новосибирском государственном университете и вплотную приблизился к пятидесятилетнему юбилею со дня основания. Длительное время лаборатория, а после включения в ее состав лаборатории термогидродинамики дисперсных систем и лаборатории квантовой электроники преобразованная в отдел прикладной физики, входила в состав научно-исследовательского сектора (НИС), позднее – научно-исследовательской части (НИЧ) НГУ. После реформирования НИЧ НГУ, в 2016 г. на основании решения Ученого совета НГУ Отдел вошел в состав физического факультета НГУ.

Первым заведующим лабораторией прикладной физики был А. А. Бузуков. Затем, с 1975 по 1982 г., лабораторию возглавлял Е. И. Синайко. С 1983 г. заведующим лабораторией, а затем отделом является А. Е. Зарвин. В начальный период отдел не имел собственной экспериментальной базы, размещался на площадях Института теплофизики СО РАН. Сотрудники отдела вели работы в составе коллективов отдельных лабораторий базовых институтов, которыми, помимо Института теплофизики, были также Институт теоретической и прикладной механики, Институт гидродинамики и Институт ядерной физики.

Собственная экспериментальная база отдела складывалась в три этапа. На первом, в 1984–1987 гг., за счет внебюджетных средств, полученных при выполнении НИОКР по договорам с различными организациями, силами сотрудников отдела была создана научно-исследовательская база отдела в цокольном этаже здания Новосибирского политехникума (в дальнейшем – Высшего колледжа информатики НГУ). Сформированные на этих площадях научные направления, результаты деятельности научного коллектива ОПФ в период с 1988 по 2005 г. детально описаны в [1]. В этот же период учебные мастерские ВКИ были подчинены на паритетных основах главному инженеру НГУ и заведующему ОПФ, значительно реконструирована

ны и модернизированы. Это дало возможность эффективно использовать их для обеспечения потребностей не только научных работ, но и учебного процесса НГУ, в первую очередь физического факультета. В частности, за счет части оборудования и силами сотрудников ОПФ были оснащены два лабораторных практикума (молекулярный и оптический) для действующего в тот период времени технического факультета ВКИ. Занятия в практикумах вели также сотрудники ОПФ.

На втором этапе, в 2007–2009 гг., за счет средств Приоритетного национального проекта «Образование» («Поддержка вузов, внедряющих инновационные образовательные программы» (2007–2008) и федеральной целевой программы «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008–2010 гг.» была в значительной мере модернизирована экспериментальная база ОПФ, созданы крупные комплексы ЛЭМПУС-2 (лазерно-электронно-молекулярно-пучковый универсальный стенд), ПХМ (плазменно-химический модуль), а также диагностические стенды Контроля оптической однородности и степени монодоменности в кристаллах, Контроля контраста электрооптических модуляторов, другие диагностические приборы и научное оборудование. Были сформированы две новые экспериментальные площадки ОПФ: в главном корпусе НГУ, и в полностью реконструированном корпусе Пристройке к ВКИ НГУ, в котором помимо лабораторий ОПФ разместились лаборатории АТИЦ НГУ, медицинского факультета, а также вновь реконструированные механические мастерские НГУ (в последующем закрыты и переоборудованы в учебную мастерскую ВКИ).

Наконец, на третьем этапе, в период 2009–2013 гг., в рамках программы развития университетов, в отношении которых устанавливается категория Национальный исследовательский университет, бюджетное финансирование по которой сопровождалось внебюджетным софинансированием за счет хозяйственных договоров, была завершена программа развития структуры ОПФ. На базе бывших учебных классов военной кафедры НГУ, реконструированных и перестроенных силами и за счет средств ОПФ ФФ, был сформирован новый технологический участок отдела – участок роста кристаллов, оснащенный рядом экспериментальных стендов, в том числе Установка поликристаллического синтеза функциональных материалов в контролируемой атмосфере при контролируемой температуре, Установка для изготовления оптической нанокерамики из люминесцентных материалов, Установка для синтеза нанопорошков с контролируемыми размерами частиц.

Уже имеющиеся экспериментальные площадки отдела были дополнительно оснащены новыми экспериментальными стендами и оборудованием. В частности, был создан вакуумный стенд КЛИУС для ионно-кластерной обработки поверхности материалов, Гипербарический стенд для конверсии углеводородов и получения кремниевых и углеродный нанопорошков и др.

К сожалению, в последующие годы целенаправленной программы модернизации экспериментальной базы ОПФ в рамках НГУ осуществить не удалось. Программа повышения международной конкурентоспособности и стимулирования научно-исследовательской деятельности (ТОП-100) в НГУ была ориентирована на иные цели, отдела коснулась минимально и только в рамках премиальных выплат по итогам года. Поэтому за последние 8 лет обновление экспериментальной базы и приобретение приборов носило локальный, частный характер.

В конечном итоге структура ОПФ была сформирована в составе лабораторий акусто- и электрооптики, ионно-кластерных технологий, конверсионных технологий, молекулярной кинетики, низкотемпературной плазмы, синтеза функциональных материалов, а также Центра коллективного пользования приборами и оборудованием «Прикладная физика». В рамках тематик научных коллективов отдела получены результаты, имеющие как чисто научный, так и прикладной характер, регулярно представляющиеся в отчетах о выполнении НИОКР, в реферируемых научных журналах, на республиканских и международных научных конференциях и семинарах. Основной целью проводимых исследований является изучение процессов и разработка методов и технологий для последующего внедрения в хозяйственную деятельность страны.

Ниже будут рассмотрены результаты научной, педагогической и инновационной деятельности основных подразделений отдела.

Лаборатория акусто- и электрооптики

Лаборатория была сформирована и на протяжении свыше 20 лет возглавлялась П. Г. Пасько [2–4] (ныне на пенсии). В настоящее время руководит лабораторией кандидат физико-математических наук А. В. Горчаков. Основными задачами лаборатории сегодня являются развитие инструментальных методик диагностики и контроля характеристик оптических элементов из различных нелинейных монокристаллов. Работы проводятся с монокристаллами трибората лития (LiB_3O_5 , LBO), калий титанил фосфата (KTiOPO_4 , KTP), бета-борат бария ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, ВВО) и др., которые широко используются для управления лазерным излучением: изменение частоты, модуляции и т. д. Лаборатория активно сотрудничает с производителями оптических приборов – ООО «Кристаллы Сибири» и ЗАО «Сибирский монокристалл – ЭКСМА».

В лаборатории созданы и отлажены следующие специализированные измерительные стенды.

– Стенд контроля оптической однородности и степени монодоменности, предназначен для измерения ключевых параметров нелинейных монокристаллов: оптическая однородность (точность измерения искажения плоского волнового фронта световой волны – до $\lambda/10$ на апертуре кристаллической заготовки размером 50×50 мм), наведенная двуосность, определение границ монодоменных областей (разрешение не менее 500 мкм), малоугловое рассеяние и др.

– Стенд контроля контраста оптических элементов и электрооптических модуляторов. Стенд позволяет проводить измерения значений контраста модуляторов в диапазоне 1–2000 с точностью 5 %, картографирование величины контраста при апертуре кристалла до 25×25 мм², выполнять измерения в диапазоне температур от 2 до 60 °С при импульсных управляющих напряжениях до 10 кВ или постоянных управляющих напряжениях до 4 кВ на длинах волн 532 и 1064 нм для лазерных пучков диаметром от 200 мкм до 20 мм.

– Стенд по изучению монодоменизации кристаллов предназначен для коррекции доменной структуры в выращенных кристаллах KTP с помощью импульсов электрического тока управляемой формы при температурах вблизи точки Кюри.

Кроме этого, в лаборатории разрабатываются новые методы диагностики характеристик нелинейных монокристаллов. В частности, недавно был разработан и отлажен метод неразрушающего контроля качества поверхности оптических материалов. Метод, основанный на измерении угловой зависимости коэффициента отражения плоскополяризованной лазерной волны и определения положения угла квази-Брюстера, позволяет оперативно без использования сложного измерительного оборудования контролировать качество поверхности и приповерхностного слоя в оптических элементах [5]. В развитии данного метода в настоящее время в лаборатории проводятся работы по созданию метода определения абсолютных величин физических параметров: толщины и показателя преломления приповерхностного поврежденного слоя, объемного показателя преломления материала с учетом приповерхностного слоя [6–8].

Лаборатория ионно-кластерных технологий

Заведующий лабораторией – кандидат физико-математических наук Н. Г. Коробейщиков. Основное направление работ – фундаментальные и прикладные исследования с газоструйными ионно-кластерными пучками (*gas cluster ion beam*, GCIB). Благодаря возможности независимо управлять размерами кластеров и ускоряющим потенциалом, ионно-кластерные пучки обладают набором уникальных физических характеристик. Это позволяет успешно использовать их для диагностики (ВИМС) и малоинвазивной модификации (сглаживание до субнано-

метровой шероховатости, формирование самоупорядоченных наноструктур и др.) поверхностей различных материалов [9–10].

Работы проводятся на экспериментальном стенде КЛИУС, разработанном и созданном сотрудниками ОПФ (рис. 1). Стенд оборудован высоковакуумной откачной системой суммарной производительностью до 9000 л/с. Характеристики стенда соответствуют лучшему мировому уровню и позволяют в непрерывном режиме формировать пучки кластерных ионов с интенсивностью до 10^{15} кл. ион/($\text{см}^2 \times \text{с}$) кинетической энергией E до 30 кэВ и током до 50 мкА.



Рис. 1. Общий вид стенда КЛИУС со стороны рабочих люков и со стороны вводов
Fig. 1. General view of the CLIUS stand from the side of working hatches and from the side of inlets

Разработан и отлажен новый способ диагностики пучков нейтральных кластеров, основанный на измерении поперечного профиля полной интенсивности пучка и позволяющий определить основные параметры: средний размер кластеров N (атом/кластер), соотношение мономерной и кластерной компонент пучка, плотность потока кластеров (кластер/($\text{см}^2 \times \text{с}$)) [11–12]. Распределение кластерных ионов по размеру определяется с помощью оригинальной времяпролетной системы [13].

В настоящее время работы направлены на разработку фундаментальных основ ионно-кластерного метода создания совершенных оптических поверхностей (сверхгладких с минимальным поврежденным слоем) для нелинейных монокристаллов. Известно, что современные технологии обработки позволяют получать поверхности с субнанометровой остаточной шероховатостью для многих оптических материалов. Однако в готовых элементах неизбежно присутствует приповерхностный поврежденный слой (*subsurface damage*, SSD) толщиной десятки или сотни нм, который, как правило, определяет основные характеристики оптических приборов: срок службы, порог лазерного повреждения (*laser induce damage threshold*, LIDT), стабильность работы и т. д. Предполагается, что кластерная бомбардировка поверхности нелинейных кристаллов позволит минимизировать SSD-слой при минимальном нарушении структуры материала и тем самым улучшить функциональные характеристики оптических приборов.

В ходе проведенных работ доказано, что обработка кластерными ионами в комбинированных режимах позволяет сглаживать поверхности материалов в широком диапазоне пространственных частот шероховатости $\nu = 0,2 \div 100 \text{ мкм}^{-1}$, т. е. сглаживать неровности с латеральными размерами до 5 мкм [14]. Высокоэнергетичный режим с удельной энергией $E/N \sim 100 \text{ эВ/атом}$ в кластере обеспечивает высокую эффективность обработки (скорость распыления мишени достигает 5 нм/мин), сопоставимую с классическим ионным пучком. Обработка при $E/N \leq 10 \text{ эВ/атом}$ обеспечивает суперфинишное сглаживание. Показано, что коэффициенты распыления поверхности несепарированным по размерам кластеров ионно-кластерным пучком обобщаются в виде нелинейной зависимости от удельной энергии E/N как при нормальном, так и при наклонном падении кластеров [15]. Установлено, что обработка кластерами приводит к гораздо меньшему нарушению морфологии приповерхностного слоя

мишени по сравнению с мономерным ионным пучком. Обнаружено, что кластерная бомбардировка насыщенных водой поверхностей гигроскопических монокристаллов сопровождается эффектом блистеринга, приводящего к формированию гигантских аномальных кратеров диаметром до 600 мкм, что на два порядка превышает диаметр ударных кластерных кратеров [16]. С использованием РФЭС-измерений выявлено преимущественное распыление кислорода и, в меньшей степени, бора, а также увеличение концентрации катионов лития при бомбардировке поверхности кристаллов LBO кластерами аргона. Доказано, что химические и физические повреждения приповерхностного слоя после бомбардировки кластерами намного меньше, чем повреждения от пучка одноатомных ионов [17].

Лаборатория молекулярной кинетики

Лаборатория молекулярной кинетики (ЛМК) функционирует практически с первого года прихода в отдел А. Е. Зарвина. Поэтому деятельность лаборатории за период до 2006 г. достаточно подробно охарактеризована в статье [18]. Основное научное направление деятельности лаборатории – динамика разреженных газов. В разные периоды в научных исследованиях, проводимых лабораторией, принимали активное участие научные сотрудники: Виктор Жумагазыевич Мадирбаев, Николай Геннадьевич Коробейщиков (в настоящее время возглавляет новое научное направление – лабораторию ионно-кластерных технологий отдела), Валерик Сергеевич Айрапетян (ныне профессор, заведующий кафедрой Сибирского государственного университета геосистем и технологий), Георгий Георгиевич Гартвич (в настоящее время на пенсии), Борис Семенович Ездин (возглавляет сейчас новое научное направление – лабораторию конверсионных технологий отдела), Александр Сергеевич Яскин (возглавляет теперь Центр коллективного пользования «Прикладная физика» при ОПФ), а также ряд молодых сотрудников отдела. Инженерный блок отдела бессменно возглавляет ведущий электроник Валерий Владимирович Каляда. Руководителем лаборатории бессменно остается А. Е. Зарвин.

Как было отмечено выше, в период 2007–2013 гг. экспериментальное оборудование ЛМК пополнилось не только за счет модификации экспериментального вакуумного стенда ЛЭМПУС-1 [19], путем его оснащения современным вакуумным откачным оборудованием, новыми вакуумными секциями генератора молекулярного пучка и новыми средствами диагностики (рис. 2), но и двумя новыми универсальными экспериментальными вакуумными установками: ЛЭМПУС-2 [20] и Плазмохимический модуль (ПХМ) [21]. Оборудование этих установок включает в том числе современные приборы измерения и контроля давления и вакуума, средства регулирования и подачи газов и газовых смесей. Для инициирования плазмохимических реакций в потоках имеются электронно-лучевые системы с плазменным и накаливаемым катодами с токами до 500 мА и энергией электронов до 60 кэВ с собственной дифференцированной системой высоковакуумной откачки, системы, иницирующие разные типы разряда, а также ионный источник с замкнутым дрейфом электронов.

ПХМ представляет собой несколько соединенных вакуумных объемов, откачиваемых мощным форвакуумным винтовым безмасляным насосом высокой производительности со скоростью откачки до 30 000 л/мин при давлении 1 торр, что позволяет поддерживать большие расходы рабочих газов (рис. 3). Установка предназначена для исследования газозафазных плазмохимических реакций и разработки плазмохимических технологий, в том числе технологии конверсии природного и попутного нефтяного газов.

Созданная и эксплуатируемая сотрудниками ЛМК установка ЛЭМПУС-2 (рис. 4) в настоящее время является одним из лучших малогабаритных газодинамических стендов с непрерывными и импульсными газовыми источниками, скоростью откачки до 0,2 г/с, безмасляным вакуумом, электронно- и молекулярно-пучковым оборудованием, масс-спектрометрией и другими системами, обеспечивающими исследования в сверхзвуковых потоках разреженных газов.

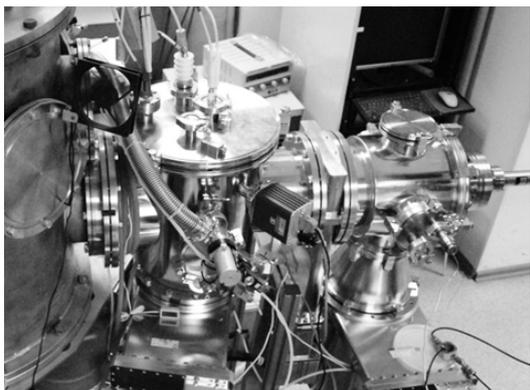


Рис. 2. Модернизированный стенд ЛЭМПУС-1
Fig. 2. Modernized stand LEMPUS-1

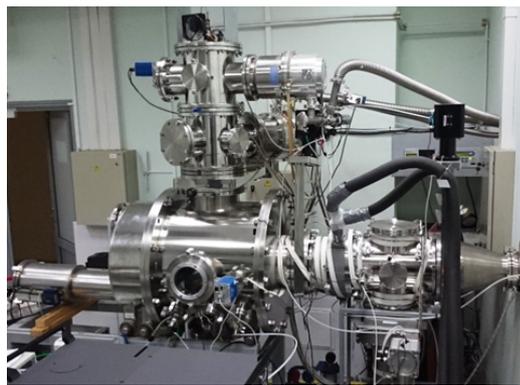


Рис. 3. Плазмохимический модуль
Fig. 3. Plasma chemical module

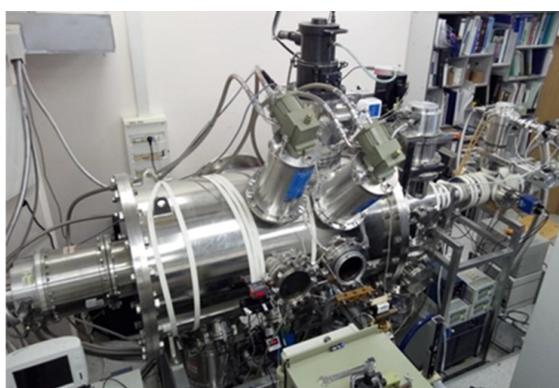
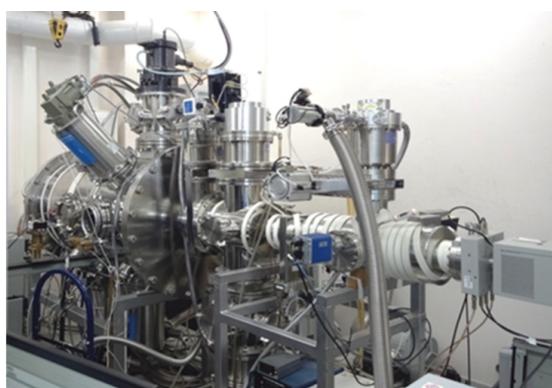


Рис. 4. Универсальная установка ЛЭМПУС-2 (вид справа и слева сверху)
Fig. 4. Universal installation LEMPUS-2 (right and left top views)

Основными задачами, решаемыми сотрудниками лаборатории в последние годы, помимо прикладных исследований в интересах аэрокосмической отрасли [22–23] и нефтегазовой промышленности [24–27], являются фундаментальные исследования процессов кластерообразования в сверхзвуковых потоках разреженных газов [28–32]. В частности, впервые обнаружен и идентифицирован эффект формирования спутной кластерной струи вокруг традиционной сверхзвуковой струи [33–34], исследован механизм инверсной накачки определенных уровней атомарного аргона в конденсирующихся потоках смесей [35], исследован механизм истечения жидкости через отверстие малого диаметра в вакуум [36].

Лаборатория конверсионных технологий

Основное направление – исследование физико-технических аспектов газофазного синтеза при адиабатическом сжатии газов. Научным руководителем лаборатории является кандидат физико-математических наук Б. С. Ездин. Исследуются синтез кристаллических и аморфных нанопорошков кремния и углерода из газовой фазы при пиролизе исходных прекурсоров [37–40], процессы окислительной конверсии попутного нефтяного газа (ПНГ) [41; 42], рассматриваются вопросы получения водорода пиролизом метана и его гомологов.

Работы проводятся на экспериментальном стенде Гипербар, разработанном и созданном сотрудниками ОПФ совместно с фирмами – разработчиками нестандартного научного оборудования. Стенд Гипербар – циклический химический реактор сжатия (ЦХРС) – представляет собой тепловую машину, в которой при сжатии газообразных прекурсоров происходят хими-

ческие реакции преобразования веществ, а при расширении реакторного объема (движения поршня в сторону нижней мертвой точки) – замораживание (закалка) химических преобразований, препятствующая обратным химическим реакциям. Процесс можно назвать проточным вследствие переработки реагентов и поступления в реакторный объем следующей порции в течение одного цикла сжатия – разрежения. Продукты пиролиза накапливаются приемной системой. Метод выгодно отличается от существующих простотой применяемого оборудования, хорошей конструктивной проработкой тепловых машин, высокой производительностью метода и малой ресурсной емкостью (материалоемкость, небольшие габариты и вес). Так, теоретически, циклический химический реактор сжатия (ЦХРС) объемом 1 л позволяет перерабатывать при частоте 30 Гц за час работы 10,8 м³ исходного сырья, с возможностью широкого масштабирования по объему реактора и по количеству камер сжатия-разрежения на одной установке.

Исследования необходимы для получения точных количественных параметров технологических процессов для синтеза нанопорошков с заданными размерами и формой. Данные о предпочтительной конструкции реакционной камеры могут быть использованы в ОКР при разработке промышленных установок. Проводятся исследования свойств порошков [43; 44] для их внедрения в разные технологические цепочки. Так, очень важным свойством наноразмерного кремния и слоев на его основе является возможность генерации в них фотолюминесценции за счет кислорода в синглетном состоянии на их поверхностях, что находит применение в биосенсорных устройствах в клинической диагностике в качестве детектирующих меток и слоев. Использование технического графена в виде малых присадок в водных суспензиях с целью вытеснения остаточной нефти из микропор нефтегазового пласта позволяет увеличить нефтеотдачу вследствие возникновения на границе раздела нефть – вода переходной области с низким поверхностным натяжением. Слои из частиц кремния размером ~100 нм могут быть использованы в качестве антиотражающих покрытий за счет генерации в них магнитных и электрических резонансов при взаимодействии со светом. Их применение может повысить эффективность различных фотоэлектронных преобразователей, таких как солнечные батареи и фотодетекторы.

На данный момент ни в научной, ни в патентной литературе нет упоминаний о синтезе частиц кремния и углерода при циклическом сжатии газовой фазы кремний-углеродородного состава. Это направление является новым и практически мало изученным. Данная технология может иметь развитие как альтернативный метод получения наноразмерного углерода, кремния и других порошков, таких как карбиды и нитриды, т. е. которые обычно получают, используя газообразные и жидкие прекурсоры.

Ведутся работы по изучению возможности расширения круга исходных прекурсоров, и при их наличии проводятся пробные эксперименты. Приоритетными являются газовые составы, создающие минимальную экологическую опасность.

В лаборатории создан задел по изучению газофазного синтеза нанокристаллического кремния и углерода при пиролизе моносилана и легких углеводородов. Были получены образцы нанопорошков и исследованы их свойства с использованием микроскопии высокого разрешения, рентгенофазового анализа и КР-спектроскопии. Развитие технологии изготовления порошков будет сопровождаться разработкой методов осаждения их на поверхности как в виде пористых слоев, так и в виде сплошных пленок посредством изготовления и нанесения суспензий. В дальнейшем предполагается расширение экспериментальных исследований с целью получения характеристик, требуемых для оценки возможности их практического использования, ориентированного на применения, перечисленные выше. Будут проводиться модельные расчеты газофазных реакций с использованием программных пакетов. Реализация программы исследований может привести к разработке в ОПФ НГУ сравнительно простого эффективного метода синтеза порошков в промышленно значимых объемах для различных технологических применений.

Лаборатория низкотемпературной плазмы

Сверхзвуковая струя газа или газовой смеси, истекающая из звукового или сверхзвукового сопла в разреженную среду, является чрезвычайно интересным объектом для исследователей по ряду причин. Во-первых, формирующаяся струя, как правило, защищена от внешней среды боковыми и замыкающей ударными волнами, что позволяет изучать процессы, происходящие именно в исследуемом газе или смеси газов, без внешних воздействий. Во-вторых, вследствие резкого расширения газа по мере его движения от сопла, последовательно происходит замораживание колебательных, вращательных и даже поступательных степеней свободы молекул, что позволяет исследовать релаксационные процессы и энергообмен между отдельными степенями свободы молекул. В-третьих, в струе достаточно легко создать условия кластерообразования, причем можно варьировать достигаемый средний размер кластеров от димеров до тысячемеров. Наконец, в-четвертых, воздействие на частицы струи тем или иным разрядом позволяет инициировать столкновения между нейтральными, возбужденными и ионизованными частицами с образованием новых структур.

Задачи исследования взаимодействия сверхзвуковых потоков разреженных газов с электронной и ионной плазмой, которые регулярно возникают при использовании диагностических электронных пучков в исследованиях, проводимых лабораторией молекулярной кинетики, после приема в отдел доктора физико-математических наук С. В. Автаевой получили свою направленность и перспективное развитие по традиционной тематике, в которой С. В. Автаева является известным специалистом (моделирование физических и химических процессов в искровом, дуговом, диэлектрическом барьерном разряде [45–49]), а также по тематикам, связанным с газодинамическими исследованиями в потоках разреженных газов (исследование сверхзвуковых газовых струй, возбуждаемых искровым разрядом [50], развитие метода электронно-пучковой диагностики для измерения вращательной температуры в сверхзвуковых потоках разреженных газов [51–52]).

В последние годы, после перехода руководителя направления в Институт лазерной физики СО РАН, исследования были продолжены под руководством А. Е. Зарвина по направлению инициации плазмохимических реакций в сверхзвуковых потоках разреженных газов в условиях развитой конденсации. Эксперименты, начатые на плазмохимическом модуле, продолжены на универсальном газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2.

Отлажена схема ионизации сверхзвуковой струи на разных стадиях ее расширения с помощью хорошо сфокусированного электронного пучка сравнительно высокой энергии (порядка 10 кэВ) с последующим транспортом ионизованных частиц через скиммер и коллимирующую диафрагму на детектор масс-спектрометра при выключенном собственном ионизаторе [53]. Сравнение данных, полученных при ионизации и в отсутствие ионизации сверхзвуковой струи, позволяет изучать роль ионизованных частиц в процессе сверхзвукового расширения и столкновительного энергообмена.

Исследована [54] возможность формирования в сверхзвуковом потоке кластеров, содержащих в определенных пропорциях молекулы легких углеводородов и атомы газа-носителя (аргона, гелия) с последующей инициацией кластеризованного потока электронным ударом. Установлено, что инициация кластеризованного потока с помощью электронного пучка может вызвать электрон-стимулированную конденсацию, при которой ионизованные частицы становятся зародышами кластеров, вследствие чего количество кластеров и доля конденсата возрастают, а также электронную сшивку молекул в кластере, при которой за счет взаимодействия с электронным пучком из кластера выбиваются атомы водорода, а остающиеся радикалы связываются в устойчивые молекулы более тяжелых углеводородов.

Исследована возможность образования ионов протонированного аргона в кластеризованных потоках. Появление протонированных димеров и тримеров аргона, вероятно, происходит в результате взаимодействия кластерного иона с молекулой водорода $\text{Ar}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{Ar}_2\text{H}^+ + \text{H}$

и $\text{Ar}_3^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{Ar}_3\text{H}^+ + \text{H}$. Образование дигидрокатиона аргона ArH_2^+ оказалось неожиданным и, вероятно, связано с продолжением процесса конденсации с участием сталкивающихся ионов аргона и молекул водорода до их попадания в скиммер [55].

Лаборатория синтеза функциональных материалов

ЛСФМ ОПФ ФФ НГУ организована в 2013 г. Руководит лабораторией научный сотрудник Евгений Николаевич Галашов. Лаборатория специализируется на разработках технологий синтеза функциональных материалов (монокристаллов, керамики, стекол и композитов), а также аппаратуры для их осуществления. В период с 2013 по 2017 г. были разработаны технологии:

- синтез новых люминофоров (красные, желтые, зеленые), возбуждаемые коммерческими светодиодами на основе GaN для ламп с расширенным (солнечным) спектром освещения. Новые люминофоры представлены как в виде традиционных порошковых смесей для нанесения на синие светодиоды GaN в среде силикона, так и в виде пластин монокристаллических, стеклокристаллических и органокристаллических. По результатам исследований по данной тематике опубликовано 3 статьи в реферируемых журналах и получено 3 патента РФ. Заключен ряд хозяйственных договоров с промышленными партнерами;

- синтез теплоотводов для СВЧ-электроники на основе композитов Cu, Ag / алмаз [56]. Для смачивания алмазной матрицы была разработана высокоэффективная технология покрытия алмазов карбидами WC, MoC, SiC. По результатам исследований по данной тематике опубликовано 6 статей, заключен ряд договоров с предприятиями РОСТЕХа.



Рис. 5. Люминофор НГУ белого свечения
Fig. 5. NSU phosphor of white luminescence

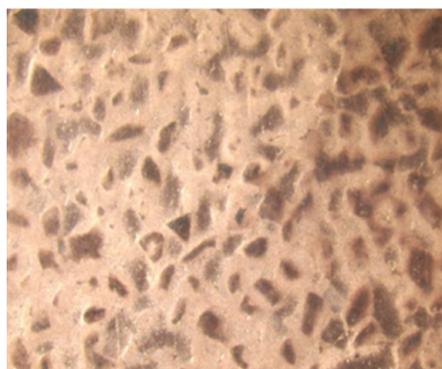
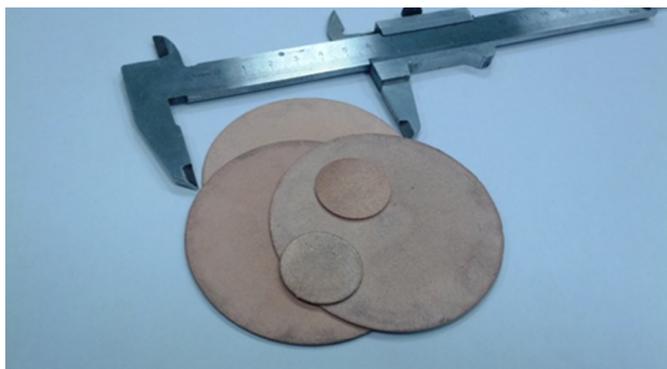


Рис. 6. Теплоотводящие подложки Cu/WC/алмаз и их поверхность
Fig. 6. Heat-sinking Cu/WC/diamond substrates and their surfaces

С 2014 г. лаборатория ведет разработку технологии выращивания широкого спектра совершенных монокристаллов низкоградиентным методом Чохральского и аппаратуры для его осуществления. Суть технологии – создать особые условия в ростовой ячейке (температурные градиенты в расплаве менее 1 °С, подавление испарения расплава и проч.), при которых фронт

кристаллизации формируется по слоевому механизму с образованием атомно-гладкой грани. В результате выращенные кристаллы практически не содержат дефектов, что существенно улучшает их функциональные свойства.

Были получены кристаллы CdWO_4 для X-ray сканеров и интроскопов, ZnWO_4 и ZnMoO_4 для научных экспериментов по поиску темной материи, TeO_2 акустооптических устройств, KTiOPO_4 и LiNbO_3 для лазерных применений.



Рис. 7. Кристалл CdWO_4 , выращенный низкоградиентным методом Чохральского
Fig. 7. CdWO_4 crystal grown by low-gradient Czochralskii method

В рамках коллаборации с римским Институтом ядерной физики (INFN, Rome) для эксперимента по поиску нейтрино в подземной лаборатории Гран Сассо (проект *Lucifer*) была разработана технология получения радиоизотопно-чистых монокристаллов ZnSe .

В рамках совместных работ с Институтом ядерной физики им Г. И. Будкера по поиску новых детекторных материалов для калориметрии была разработана технология выращивания монокристаллов твердых растворов $(\text{Zn,Cd})(\text{W,MoO})\text{O}_4$ [59], допированных редкоземельными металлами Eu, Ce, Pr. По результатам исследований было опубликовано 12 статей в реферируемых журналах и зарегистрировано 3 Ноу-Хау. В 2021 г. технология выращивания совершенных кристаллов CdWO_4 для X-ray сканеров и интроскопов вошла в 100 лучших мировых технологий для трансфера в Китай.

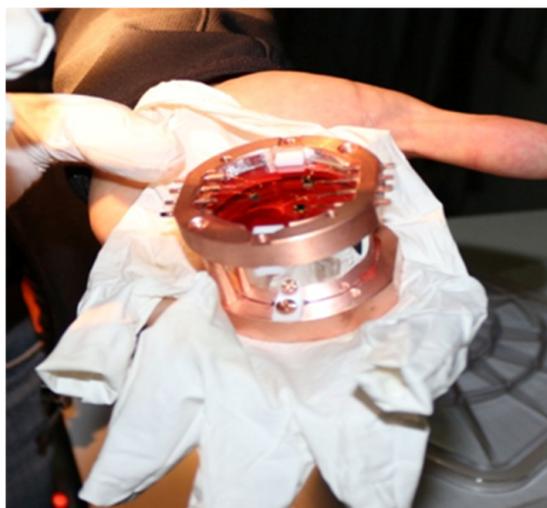


Рис. 8. Кристалл ZnSe и детектор нейтрино на его основе
Fig. 8. ZnSe crystal and neutrino detector based on it



Рис. 9. Сертификат о вхождении технологии НГУ в 100 лучших мировых технологий для трансфера в Китай

Fig. 9. Certificate of entry of NSU technology into the 100 best world technologies for transfer to China

Лаборатория имеет все необходимое оборудование для синтеза функциональных материалов:

- установку выращивания кристаллов низкоградиентным методом Чохральского;
- установку для выращивания кристаллов методом Бриджмена;
- установку для выращивания кристаллов методом Бриджмена под давлением 150 атм;
- установку для выращивания кристаллов методом вращающегося контейнера;
- установку гидротермального синтеза;
- муфельные печи для синтеза с температурой до 1200 и 1700 °С;
- изостатический пресс АР-6 с температурой до 2000 °С и давлением до 2000 атм;
- обрабатывающее оборудование Struer.

Центр коллективного пользования приборами и оборудованием «Прикладная физика»

Центр коллективного пользования приборами и оборудованием «Прикладная физика» НГУ (ЦКП ПФ) по виду деятельности является центром коллективного пользования научно-исследовательского профиля. Создан в составе Отдела прикладной физики физического факультета НГУ (ОПФФФ) в 2014 г. в целях развития инновационной структуры университета. В 2016 г. ЦКП ПФ НГУ (рег. номер 443969) зарегистрирован на портале «Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации – центры коллективного пользования научным оборудованием и уникальные научные установки» (<https://ckp-rf.ru/>).

Цели ЦКП ПФ НГУ

- Выполнение фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ ОПФФФ НГУ.
- Оказание услуг по широкому спектру аналитических исследований и высокотехнологичных процессов и операций в интересах научных и производственных организаций Новосибирской области.

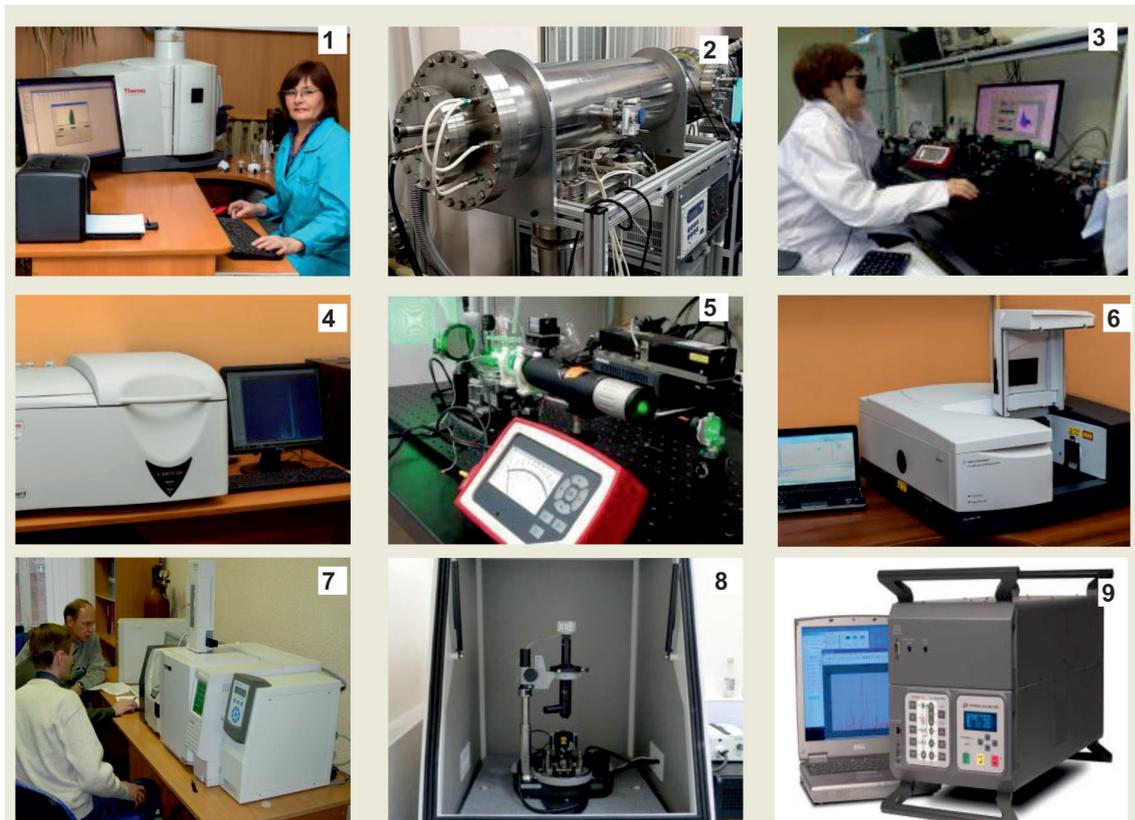


Рис. 10. Примеры оборудования ЦКП «Прикладная физика» НГУ: 1 – атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой iCAP-6200DUO; 2 – времяпролетный масс-спектрометр RTOF-300; 3 – стенд контроля оптической однородности и степени монокристаллическости в кристаллах КТР, ВВО, RTP; 4 – рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный спектрометр ARLQuant’X; 5 – стенд контроля контраста электрооптических модуляторов; 6 – ИК-Фурье спектрометр Cary600FTIR; 7 – хроматомасс-спектрометр GCMS-P2010Plus; 8 – атомно-силовой микроскоп NanoЛаборатория ИНТЕГРА Прима; 9 – универсальный газовый анализатор UGA-200

Fig. 10. Examples of equipment of the Applied Physics Center of NSU: 1 – atomic emission spectrometer with inductively coupled plasma iCAP-6200DUO; 2 – time-of-flight mass spectrometer RTOF-300; 3 – stand for control of optical homogeneity and degree of monodomain in KTP, BBO, RTP crystals; 4 – X-ray fluorescence energy dispersive spectrometer ARLQuant’X; 5 – stand for contrast control of electro-optical modulators; 6 – FTIR spectrometer Cary600FTIR; 7 – chromatomass spectrometer GCMS-P2010Plus; 8 – atomic force microscope NanoLab INTEGRA Prima; 9 – universal gas analyzer UGA-200

– Обучение студентов, аспирантов и подготовку высококвалифицированных научных кадров.

– Инициацию совместных научных и научно-технических проектов научных организаций и предприятий НСО с привлечением высококвалифицированного персонала Отдела прикладной физики НГУ.

– Обеспечение высокоэффективного использования уникального оборудования Отдела прикладной физики, развитие услуг ЦКП ПФ НГУ.

Назначение ЦКП ПФ НГУ

ЦКП ПФ оказывает услуги и выполняет работы для вузов, институтов СО РАН, других научных учреждений и предприятий различной формы собственности:

– по динамике разреженных газов, физической и химической кинетике, физическому моделированию газодинамических процессов в вакууме;

- плазмохимии, физике низкотемпературной неидеальной плазмы и ее применениям в энергетике и экологически чистых технологиях;
- кристаллохимии, новым материалам и химическим продуктам, материалам для микро- и наноэлектроники, технологиям получения функциональных материалов и химических продуктов;
- разнообразным применениям электронных, ионных и молекулярных пучков, масс-спектрометрии, кластерным электронно-ионно-плазменным технологиям;
- акусто- и электрооптике, новым материалам для микро- и наноэлектроники.

Балансовая стоимость оборудования ЦКП стоимостью свыше миллиона рублей, зарегистрированного на портале СКР-RF, составляет 70,3 млн рублей.

Научное руководство ЦКП ПФ НГУ осуществляет заведующий ОПФ кандидат физико-математических наук А. Е. Зарвин, организационное руководство текущей деятельностью – директор ЦКП ПФ, кандидат технических наук А. С. Яскин.

За время деятельности центра по заявкам на оказание услуг ЦКП ПФ НГУ организациям Новосибирска выполнено 22 договора. Общий объем выполненных работ (оказанных услуг, в том числе в интересах третьих лиц) ЦКП ПФ с момента организации по 2020 г. составил 32,6 млн рублей.

Заказчиками услуг являются как институты СО РАН, так и иные организации и фирмы: Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Институт катализа им. Г. К. Борескова, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе, Институт автоматики и электрометрии, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения; ПАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С. П. Королева», ООО «Центр Технологий Лантан», ООО «Кристаллы Сибири», ЗАО «Сибирский монокристалл – ЭКСМА», ООО «Международный научный центр по теплофизике и энергетике» и др.

Список литературы

1. **Зарвин А. Е., Коробейщиков Н. Г., Мадирбаев В. Ж., Пасько П. Г., Попов Ю. Н.** Отдел прикладной физики научно-исследовательской части // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2006. Т. 1, вып. 1. С. 117–124.
2. **Никитенко В. А., Стаюхин С. Г., Пасько П. Г., Кузьмина И. П.** Факторы, влияющие на лазерные характеристики оксида цинка // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: Сб. тр. III Белорусско-Российского семинара. Минск, 2000. С. 41–43.
3. **Пасько П. Г., Повх И. В., Алексеева Л. В., Строганов В. И.** Анизотропное отражение света в кристаллах парателлурита // Нелинейная оптика: Сб. тр. Хабаровск, 2000. С. 69–72.
4. **Пасько П. Г., Повх И. В., Алексеева Л. В., Строганов В. И.** Расчет углов при четырехлучевом отражении // Нелинейная оптика: Сб. тр. Хабаровск, 2000. С. 92–98.
5. **Горчаков А. В., Коробейщиков Н. Г., Николаев И. В., Федюхин Л. А.** Способ неразрушающего контроля качества приповерхностного слоя оптических материалов. Патент РФ № 2703830 от 29.03.2019 г.
6. **Федюхин Л. А., Горчаков А. В., Колосовский Е. А.** Инварианты коэффициента отражения // Оптика и спектроскопия. 2020. Вып. 2. С. 266–271.
7. **Федюхин Л. А., Горчаков А. В.** Обратная задача теории отражения для трехслойных структур // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020. Т. 158, № 5(11). С. 792–799.
8. **Федюхин Л. А., Горчаков А. В., Коробейщиков Н. Г., Николаев И. В.** Прецизионное измерение оптических характеристик приповерхностного слоя твердых тел // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 114, вып. 5. С. 304–310.
9. **Yamada I., Matsuo J., Toyoda N., Aoki T., Seki T.** Progress and applications of cluster ion beam technology // Curr. Opin. Solid State Mater. 2015. Vol. 19. P. 12–18.

10. **Иешкин А. Е., Толстогузов А. Б., Коробейщиков Н. Г., Пеленович В. О., Черныш В. С.** Газодинамические источники кластерных ионов для решения фундаментальных и прикладных задач // Успехи физических наук. 2021 (принято к публикации).
11. **Korobeishchikov N. G., Roenko M. A., Tarantsev G. I.** Mean gas cluster size determination from cluster beam cross-section // Journal of Cluster Science. 2017. Vol. 28, iss. 5. P. 2529-2547.
12. **Коробейщиков Н. Г., Роеико М. А.** Способ определения размеров газовых кластеров в сверхзвуковом потоке. Патент РФ № 2633290 от 15.04.2016.
13. **Korobeishchikov N. G., Kalyada V. V., Skovorodko P. A., Shmakov A. A., Khodakov M. D., Shulschenko G. I., Voskoboynikov R. V., Zarvin A. E.** Features of formation of gas cluster ion beams // Vacuum. 2015. Vol. 119, № 9. P. 256–263.
14. **Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Roenko M. A.** Effect of argon cluster ion beam on fused silica surface morphology // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2019. Vol. 438. P. 1–5.
15. **Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Roenko M. A., Atuchin V. V.** Precise sputtering of silicon dioxide by argon cluster ion beams // Applied Physics A. 2018. Vol. 124, iss. 12. P. 833.
16. **Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Roenko M. A., Yakovlev V. V., Fu D. J., Tolstogousov A.** Anomalous sputtering of the lithium triborate single crystal surface by argon cluster ions // Vacuum. 2020. Vol. 179. P. 109555.
17. **Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Atuchin V. V., Prosvirin I. P., Tolstogousov A., Peleponovich V., Fu D. J.** Borate nonlinear optical single crystal surface finishing by argon cluster ion sputtering // Surfaces and Interfaces. 2021. Vol. 27. P. 101520.
18. **Зарвин А. Е., Коробейщиков Н. Г., Мадирбаев В. Ж., Пасько П. Г., Попов Ю. Н.** Отдел прикладной физики научно-исследовательской части // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2006. Т. 1, вып. 1. С. 117–124.
19. **Зарвин А. Е., Каляда В. В., Коробейщиков Н. Г., Ходаков М. Д., Шмаков А. А.** Модифицированная установка для газодинамических исследований и технологических разработок // ПТЭ. 2016. № 2. С. 127–134. DOI 10.1134/S0020441216010176
20. **Zarvin A. E., Kalyada V. V., Madirbaev V. Zh., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Yaskin A. S., Khudozhitkov V. E., Gimelshein S. F.** Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. Vol. 45, iss. 5. P. 819–827. DOI 10.1109/TPS.2017.2682901
21. **Зарвин А. Е., Каляда В. В., Яскин А. С., Ходаков М. Д., Коробейщиков Н. Г., Художитков В. Э., Мадирбаев В. Ж., Ездин Б. С.** Экспериментальная установка для плазмохимических исследований // ПТЭ. 2016. № 6. С. 50–56. DOI 10.1134/S0020441216060117
22. **Zarvin A. E., Krylov A. N., Yaskin A. S., Antipova M. S., Kalyada V. V., Gerasimov Y. I., Dubrovin K. A. and Khudozhitkov V. E.** Laboratory simulation for single and block supersonic jets // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1677. P. 012160. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012160
23. **Zarvin A. E., Yaskin A. S., Dubrovin K. A., Kalyada V. V.** Visualization of low-density gas-dynamic objects in full-scale processes modelling on small experimental plants // Vacuum. 2021. Vol. 191. P. 110409. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110409>.
24. **Мадирбаев В. Ж., Зарвин А. Е., Коробейщиков Н. Г.** Влияние конденсации на состав импульсной сверхзвуковой струи природного газа, активируемой пучком электронов // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2008. Т. 3, вып. 2. С. 34–39.
25. **Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Kalyada V. V.** Jet plasma-chemical reactor for the conversion of methane: the use of clustering // Advances in Materials Physics and Chemistry. 2012. No. 2. P. 146–149. doi:10.4236/ampc.2012.24B038
26. **Zarvin A. E., Khodakov M. D., Kalyada V. V., Korobeishchikov N. G.** On the possibility to repay of associated gas torches by using plasma-chemical conversion of methane // 21-th

- International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC 21). 4–9 August 2013. Cairns, Australia. Proceedings. P. 155. URL: <http://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc21/ID155.pdf>.
27. **Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Dubrovin K. A., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Plasma chemical reactions initiation in supersonic jets by a high-voltage electron beam // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1683. P. 032008. doi:10.1088/1742-6596/1683/3/032008
 28. **Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G., Kalyada V. V., Madirbaev V. Zh.** Formation of mixed clusters in a pulsed helium-oxygen-isoprene supersonic jet // *Eur. Phys. J. D.* 2008. Vol. 49, № 1. P. 101–110. DOI 10.1140/epjd/e2008-00146-7
 29. **Зарвин А. Е., Каляда В. В., Художитков В. Э.** Особенности регистрации кластеров в сверхзвуковых недорасширенных струях методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии // *Теплофизика и аэромеханика.* 2017. Т. 24, № 5. С. 691–702. DOI 10.1109/TPS.2017.2682901
 30. **Зарвин А. Е., Яскин А. С., Каляда В. В.** Влияние конденсации на размеры сильно недорасширенных струй при истечении в разреженное затопленное пространство // *Журнал ПМТФ.* 2018. Т. 59, № 1. С. 99–106. DOI 10.1134/S002189441801011X
 31. **Chinenov S. T., Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Mass spectrometric study of gas clusters by a high-voltage electron beam // *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. Vol. 1105. P. 012113. DOI 10.1088/1742-6596/1105/1/012113
 32. **Яскин А. С., Каляда В. В., Зарвин А. Е., Чиненов С. Т.** Метод эффективного сканирования сверхзвуковых струй разреженных газов // *Приборы и техника эксперимента.* 2020. № 3. С. 152–157. DOI 10.1134/S0020441220030185
 33. **Дубровин К. А., Зарвин А. Е., Каляда В. В., Художитков В. Э., Яскин А. С.** Исследование структуры потока на малогабаритном газодинамическом комплексе: идентификация вторичного потока при истечении кластированной сверхзвуковой струи в разреженное пространство // *Журнал ПМТФ.* 2018. Т. 59, № 5. С. 48–58. DOI 10.1134/S0021894418050061
 34. **Дубровин К. А., Зарвин А. Е., Каляда В. В., Яскин А. С.** Причины свечения аномального вторичного потока в сверхзвуковых кластированных струях, возбужденных высоковольтным электронным пучком // *Письма в ЖТФ.* 2020. Т. 46, вып. 7. С. 32–35. DOI 10.1134/S1063785020040057
 35. **Zarvin A. E., Madirbaev V. Z., Dubrovin K. A., Kalyada V. V.** On the mechanism of ionic-cluster excitation of argon levels in molecular gas mixtures // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10214-2>.
 36. **Яскин А. С., Зарвин А. Е., Каляда В. В., Дубровин К. А.** Особенности истечения в вакууммикроструйневязкой жидкости // *Письма в журнал технической физики.* 2021. Т. 47, вып. 21. С. 47–50. DOI 10.21883/PJTF.2021.21.51630.18846
 37. **Ezdin B. S., Kalyada V. V., Yatsenko D. A., Ischenko A. V., Volodin V. A., Shklyayev A. A.** Synthesis of Si nanoparticle chains and nanowhiskers by the monosilane decomposition in an adiabatic process during cyclic compression // *Powder Technology.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.09.032>.
 38. **Ezdin B., Pakharukov Yu., Kalyada V., Shabiev F., Zarvin A., Yatsenko D., Safargaliev R., Ichshenko A., Volodin V.** The novel method of synthesis of nanostructured materials for the enhancing recovery in oil displacement technologies // *Catalysis Today.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.09.024>
 39. **Ezdin B. S., Yatsenko D. A., Kalyada V. V., Ichshenko A. B., Zarvin A. E., Nikiforov A. A., Snytnikov P. V.** Pyrolysis of a mixture of monosilane and alkanes in a compression reactor to produce nanodispersed silicon carbide // *Chemical Engineering Journal.* 2020. Vol. 381. No. 122642. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122642>.
 40. **Ezdin B., Yatsenko D., Kalyada V., Zarvin A., Ichshenko A., Nikiforov A., Snytnikov P.** Data on the structure, chemical state of silicon carbide synthesized by adiabatic cyclic compres-

- sion in a chemical reactor // Data in brief. 2020. Vol. 28. P. 104868. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104868>
41. **Ezdin B. S., Zarvin A. E., Yaskin A. S., Kalyada V. V. and Kononov S. A.** Fast cyclic compression installation for conversion of light hydrocarbons // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Vol. 52, № 1-2. P. 26–28. DOI 10.1007/s10556-016-0141-5
 42. **Ездин Б. С., Никифоров А. А., Куприков М. Ю.** Химический реактор сжатия. Патент РФ № 2640079.
 43. **Pakharukov Y. V., Shabiev F. K., Safargaliev R. F., Ezdin B. S., Zarvin A. E. and Kalyada V. V.** Thermocapillary waves formation at the interface of hydrocarbons and graphene-like nanofluids // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1677. P. 012145. doi:10.1088/1742-6596/1677/1/012145
 44. **Pakharukov Yu. V., Shabiev E. K., Safargaliev R. F., Simonov A. S., Ezdin B. S., Zarvin A. E. and Kalyada V. V.** The use of nanoparticles to displace oil from a porous medium // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1683. P. 022082. doi:10.1088/1742-6596/1683/2/022082
 45. **Avtaeva S. V.** About formation of secondary current pulses in dielectric barrier discharges in Xe-Cl₂ mixtures // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. Vol. 42(1). P. 229-234.
 46. **Avtaeva S. V.** Time-dependent characteristics of the dielectric barrier discharge in Xe-Cl₂ mixture and kinetics of the XeCl* molecules // Eur. Phys. J. D. 2014. Vol. 68(4). P. 68-90.
 47. **Avtaeva S. V.** Modelling of physical and chemical processes in the dielectric barrier discharge in chlorine // Nonequilibrium processes in physics and Chemistry. Vol. 1. Plasma, Clusters, and Atmosphere / Ed. by A. M. Starik and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 143–151.
 48. **Avtaeva S. V.** On electron attachment effect on characteristics of the DBD in chlorine and its mixtures with xenon // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 927. P. 012006. doi:10.1088/1742-6596/927/1/012006
 49. **Avtaeva S., Gorokhovskiy V., Obrusnik A., Zembower Z.** Composition of high current arc plasma in Ar-H₂ mixture at moderate pressures // Газоразрядная плазма и ее применение: Сб. тезисов XIII Междунар. конф., 5–7 сентября 2017 г. Новосибирск, 2017.
 50. **Avtaeva S. V., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Yaskin A. S., Chinenov S. T.** Spark discharge excited supersonic gas jets // Nonequilibrium processes in physics and Chemistry. Vol. 1. Plasma, Clusters, and Atmosphere / Ed. by A. M. Starik and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 232–240.
 51. **Avtaeva S. V., Yakovleva T. S., Kalyada V. V. and Zarvin A. E.** The electron beam diagnostic of the clustered supersonic nitrogen jets // J. Phys. Conf. Ser. 2017. Vol. 927. P. 012005. doi:10.1088/1742-6596/927/1/012005.
 52. **Яковлева Т. С., Автаева С. В., Каляда В. В., Зарвин А. Е.** Измерение вращательной температуры азота в кластированной сверхзвуковой струе // Вакуумная наука и техника: Материалы XXIV Научно-технической конф. с участием зарубежных специалистов / Под ред. д.т.н., проф. С. Б. Нестерова, 16–23 сентября 2017, г. Судак. М.: Новелла. 2017. С. 96–100.
 53. **Chinenov S. T., Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Mass spectrometric study of gas clusters by a high-voltage electron beam // J. Phys. Conf. Ser. 2018. Vol. 1105. P. 012113. DOI 10.1088/1742-6596/1105/1/012113
 54. **Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Dubrovin K. A., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Plasma chemical reactions initiation in supersonic jets by a high-voltage electron beam // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1683. P. 032008. DOI 10.1088/1742-6596/1683/3/032008/
 55. **Khudozhitkov V. E. and Kalyada V. V.** Registration of protoned argon and helium in a clustered gas flow of argon-hydrogen and helium-hydrogen mixtures // AIP Conf. Proceedings. 2021. Vol. 2351. P. 040003. <https://doi.org/10.1063/5.0052014>
 56. **Ukhina A. V., Dudina D. V., Esikov M. A., Galashov E. N., Bokhonov B. B.** The influence of morphology and composition of metal–carbide coatings deposited on the diamond surface on the properties of copper–diamond composites // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 401. P. 126272.

57. **Galashov E. N., Matvienko D. V., Moskovskiy V. A., Sikach B. I., Shwartz B. A.** Scintillation properties of $(\text{Zn}_{0.9}\text{Pb}_{0.1})(\text{W}_{0.9}\text{Mo}_{0.1})\text{O}_4$ and $(\text{Zn}_{0.9}\text{Cd}_{0.1})(\text{W}_{0.9}\text{Mo}_{0.1})\text{O}_4$ mixed crystals // *Journal of Instrumentation*. 2020. Vol. 15(7). P. C07028.
58. **Galashov E. N., Mandrik Y. M., Atuchin V. V., Gavrilova T. A., Korolkov I. V., Yelissev A. P., Xia Z.** Synthesis of $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ phosphor in the $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--Al metal--CeO}_2$ Ternary system // *Journal of Materials Science*. 2017. Vol. 52(22). P. 13033–13039.
59. **Galashov E. N., Atuchin V. V., Pokrovsky L. D., Bekenev V. L., Khyzhun O. Y., Borovlev Yu. A., Kozhukhov A. S., Zhdankov V. N.** Low thermal gradient Czochralsky growth of large MWO_4 ($\text{M} = \text{Zn, Cd}$) crystals, and microstructural and electronic properties of the (010) cleaved surfaces // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2017. Vol. 19, № 1–2. P. 86–90.

References

1. **Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G., Madirbaev V. Zh., Pasko P. G., Popov Y. N.** Department of Applied Physics of the research unit // *Vestn. of Novosibirsk. Novosibirsk State Univ. Series: Physics*. 2006. Vol. 1, no. 1. P. 117–124.
2. **Nikitenko V. A., Stayukhin S. G., Pasko P. G. G., Kuzmina I. P.** Factors influencing the laser characteristics of zinc oxide // *Semiconductor lasers and systems based on them: Proceedings of the III Belarusian-Russian Seminar*. Minsk, 2000. P. 41–43.
3. **Pasko P. G., Povkh I. V., Alexeeva L. V., Stroganov V. I.** Anisotropic reflection of light in paratellurite crystals // *Nonlinear Optics: Collected Works Khabarovsk*, 2000. P. 69–72.
4. **Pasko P. G., Povkh I. V., Alekseeva L. V., Stroganov V. I.** Calculation of angles at four-beam reflection // *Nonlinear Optics: Collection of Proc. Khabarovsk*, 2000. P. 92–98.
5. **Gorchakov A. V., Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Fedyukhin L. A.** Method of nondestructive quality control of the near-surface layer of optical materials. Patent of the Russian Federation № 2703830 from 29.03.2019.
6. **Fedyukhin L. A., Gorchakov A. V., Kolosovsky E. A.** Reflection coefficient invariants // *Optics and Spectroscopy*. 2020. Vol. 2. P. 266–271.
7. **Fedyukhin L. A., Gorchakov A. V.** Inverse problem of the reflection theory for three-layer structures // *Journal of Experimental and Theoretical Physics. V. Inverse problem of the reflection theory for three-layer structures* // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2020. Vol. 158, № 5(11). P. 792–799.
8. **Fedyukhin L. A., Gorchakov A. V., Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V.** Precision measurement of optical characteristics of the near-surface layer of solids // *Letters in ZhETF*. 2021. Vol. 114, no. 5. P. 304–310.
9. **Yamada I., Matsuo J., Toyoda N., Aoki T., Seki T.** Progress and applications of cluster ion beam technology // *Curr. Opin. Solid State Mater.* 2015. Vol. 19. P. 12–18.
10. **Ieshkin A. E., Tolstoguzov A. B., Korobeishchikov N. G., Pelenovich V. O., Chernysh V. C.** Gas-dynamic sources of cluster ions for solving fundamental and applied problems // *Uspekhi physicheskikh nauk*. 2021 (accepted for publication).
11. **Korobeishchikov N. G., Roenko M. A., Tarantsev G. I.** Mean gas cluster size determination from cluster beam cross-section // *Journal of Cluster Science*. 2017. Vol. 28, iss. 5. P. 2529–2547.
12. **Korobeishchikov N. G., Roenko M. A.** Method for determining the size of gas clusters in supersonic flow. Patent of the Russian Federation № 2633290 from 15.04.2016.
13. **Korobeishchikov N. G., Kalyada V. V., Skovorodko P. A., Shmakov A. A., Khodakov M. D., Shulschenko G. I., Voskoboynikov R. V., Zarvin A. E.** Features of formation of gas cluster ion beams // *Vacuum*. 2015. Vol. 119, № 9. P. 256–263.
14. **Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Roenko M. A.** Effect of argon cluster ion beam on fused silica surface morphology // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2019. Vol. 438. P. 1–5.

15. **Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Roenko M. A., Atuchin V. V.** Precise sputtering of silicon dioxide by argon cluster ion beams // *Applied Physics A*. 2018. Vol. 124, iss. 12. P. 833.
16. **Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Roenko M. A., Yakovlev V. V., Fu D. J., Tolstogou-zov A.** Anomalous sputtering of the lithium triborate single crystal surface by argon cluster ions // *Vacuum*. 2020. Vol. 179. P. 109555.
17. **Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Atuchin V. V., Prosvirin I. P., Tolstogou-zov A., Pelenovich V., Fu D. J.** Borate nonlinear optical single crystal surface finishing by argon cluster ion sputtering // *Surfaces and Interfaces*. 2021. Vol. 27. P. 101520.
18. **Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G., Madirbaev V. Zh., Pasko P. G., Popov Yu. N.** Department of Applied Physics of the research unit // *Vestn. Novosibirsk State Univ. Series: Physics*. 2006. Vol. 1, iss. 1. P. 117–124.
19. **Zarvin A. E., Kalyada V. V., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Shmakov A. A.** Modified installation for gas dynamic research and technological developments // *PTE*. 2016. № 2. P. 127-134. DOI 10.1134/S0020441216010176
20. **Zarvin A. E., Kalyada V. V., Madirbaev V. Zh., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Yaskin A. S., Khudozhitkov V. E., Gimelshein S. F.** Condensable supersonic jet facility for analyzes of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45, iss. 5. P. 819-827. DOI 10.1109/TPS.2017.2682901
21. **Zarvin A. E., Kalyada V. V., Yaskin A. S., Khodakov M. D., Korobeishchikov N. G., Khudozhitkov V. E., Madirbaev V. Zh., Ezdin B. S.** Experimental setup for plasma chemical studies // *PTE*. 2016. № 6. P. 50–56. DOI 10.1134/S0020441216060117
22. **Zarvin A. E., Krylov A. N., Yaskin A. S., Antipova M. S., Kalyada V. V., Gerasimov Y. I., Dubrovin K. A. and Khudozhitkov V. E.** Laboratory simulation for single and block supersonic jets // *J. Phys. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1677. P. 012160. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012160
23. **Zarvin A. E., Yaskin A. S., Dubrovin K. A., Kalyada V. V.** Visualization of low-density gas-dynamic objects in full-scale processes modelling on small experimental plants // *Vacuum*. 2021. Vol. 191. P. 110409. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110409>.
24. **Madirbaev V. Zh., Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G.** Effect of condensation on the composition of a pulsed supersonic natural gas jet activated by an electron beam // *Vestnik. Novosibirsk State Univ. Series: Physics*. 2008. Vol. 3, iss. 2. C. 34–39.
25. **Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Kalyada V. V.** Jet plasma-chemical reactor for the conversion of methane: the use of clustering // *Advances in Materials Physics and Chemistry*. 2012. No. 2. P. 146–149. DOI:10.4236/ampc.2012.24B038.
26. **Zarvin A. E., Khodakov M. D., Kalyada V. V., Korobeishchikov N. G.** On the possibility to repay of associated gas torches by using plasma-chemical conversion of methane // 21-th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC 21). August 4-9, 2013. Cairns, Australia. Proceedings. P. 155. URL: <http://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc21/ID155.pdf>.
27. **Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Dubrovin K. A., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Plasma chemical reactions initiation in supersonic jets by a high-voltage electron beam // *J. Phys. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1683. P. 032008. DOI10.1088/1742-6596/1683/3/032008
28. **Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G., Kalyada V. V., Madirbaev V. Zh.** Formation of mixed clusters in a pulsed helium-oxygen-isoprene supersonic jet // *Eur. Phys. J. D*. 2008. Vol. 49, № 1. P. 101–110. DOI 10.1140/epjd/e2008-00146-7
29. **Zarvin A. E. E., Kalyada V. V., Khudozhitkov V. E.** Peculiarities of cluster registration in supersonic under-expanded jets by molecular beam mass spectrometry // *Teplofizika i aeromechanika*. 2017. Vol. 24, № 5. P. 691–702. DOI 10.1109/TPS.2017.2682901
30. **Zarvin A. E., Yaskin A. S., Kalyada V. V.** The influence of condensation on the size of strongly under-expanded jets during the flow into a rarefied flooded space // *Journal of PMTF*. 2018. Vol. 59, № 1. P. 99–106. DOI 10.1134/S002189441801011X

31. **Chinenov S. T., Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Mass spectrometric study of gas clusters by a high-voltage electron beam // *J. Phys. Phys. Conf. Ser.* 2018. Vol. 1105. P. 012113. DOI 10.1088/1742-6596/1105/1/012113
32. **Yaskin A. S., Kalyada V. V., Zarvin A. E., Chinenov S. T.** Method of effective scanning of supersonic jets of rarefied gases // *Instrumentation and Technique of Experiment.* 2020. № 3. P. 152–157. DOI 10.1134/S0020441220030185
33. **Dubrovnikov K. A., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Khudozhitkov V. E., Yaskin A. S.** Study of the flow structure on a small-size gas-dynamic complex: identification of the secondary flow at the expiration of a clustered supersonic jet in rarefied space // *Journal of PMTF.* 2018. Vol. 59, № 5. P. 48–58. DOI 10.1134/S0021894418050061
34. **Dubrovnikov K. A., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Yaskin A. C.** Causes of anomalous secondary flux glow in supersonic clustered jets excited by a high-voltage electron beam // *Letters in ZhTF.* 2020. Vol. 46, iss. 7. P. 32–35. DOI 10.1134/S1063785020040057
35. **Zarvin A. E., Madirbaev V. Z., Dubrovnikov K. A., Kalyada V. V.** On the mechanism of ionic-cluster excitation of argon levels in molecular gas mixtures // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10214-2>.
36. **Yaskin A. S., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Dubrovnikov K. A.** Peculiarities of flow into vacuum of microjets of a non-viscous liquid // *Letters to the Journal of Technical Physics.* 2021. Vol. 47, iss. 21. P. 47–50. DOI 10.21883/PJTF.2021.21.51630.18846
37. **Ezdin B. S., Kalyada V. V., Yatsenko D. A., Ischenko A. V., Volodin V. A., Shklyayev A. A.** Synthesis of Si nanoparticle chains and nanowhiskers by the monosilane decomposition in an adiabatic process during cyclic compression // *Powder Technology.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.09.032>.
38. **Ezdin B., Pakharukov Yu., Kalyada V., Shabiev F., Zarvin A., Yatsenko D., Safargaliev R., Ichshenko A., Volodin V.** The novel method of synthesis of nanostructured materials for the enhancing recovery in oil displacement technologies // *Catalysis Today.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.09.024>
39. **Ezdin B. S., Yatsenko D. A., Kalyada V. V., Ichshenko A. B., Zarvin A. E., Nikiforov A. A., Snytnikov P. V.** Pyrolysis of a mixture of monosilane and alkanes in a compression reactor to produce nanodispersed silicon carbide // *Chemical Engineering Journal.* 2020. Vol. 381, no. 122642. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122642>.
40. **Ezdin B., Yatsenko D., Kalyada V., Zarvin A., Ichshenko A., Nikiforov A., Snytnikov P.** Data on the structure, chemical state of silicon carbide synthesized by adiabatic cyclic compression in a chemical reactor // *Data in brief.* 2020. Vol. 28. P. 104868. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104868>
41. **Ezdin B. S., Zarvin A. E., Yaskin A. S., Kalyada V. V. and Konovalov S. A.** Fast cyclic compression installation for conversion of light hydrocarbons // *Chemical and Petroleum Engineering.* 2016. Vol. 52, № 1–2. P. 26–28. DOI 10.1007/s10556-016-0141-5
42. **Ezdin B. S., Nikiforov A. A., Kuprikov M. Yu.** Chemical compression reactor. Russian Federation Patent No. 2640079.
43. **Pakharukov Y. V., Shabiev F. K., Safargaliev R. F., Ezdin B. S., Zarvin A. E. and Kalyada V. V.** Thermocapillary waves formation at the interface of hydrocarbons and graphene-like nanofluids // *J. Phys. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1677. P. 012145. doi:10.1088/1742-6596/1677/1/012145
44. **Pakharukov Yu. V., Shabiev E. K., Safargaliev R. F., Simonov A. S., Ezdin B. S., Zarvin A. E. and Kalyada V. V.** The use of nanoparticles to displace oil from a porous medium // *J. Phys. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1683. P. 022082. DOI 10.1088/1742-6596/1683/2/022082
45. **Avtaeva S. V.** About formation of secondary current pulses in dielectric barrier discharges in Xe-Cl₂ mixtures // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2014. Vol. 42(1). P. 229–234.
46. **Avtaeva S. V.** Time-dependent characteristics of the dielectric barrier discharge in Xe-Cl₂ mixture and kinetics of the XeCl* molecules // *Eur. Phys. J. D.* 2014. Vol. 68(4). P. 68–90.

47. **Avtaeva S. V.** Modelling of physical and chemical processes in the dielectric barrier discharge in chlorine // Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Vol. 1. Plasma, Clusters, and Atmosphere / Ed. by A. M. Starik and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 143–151.
48. **Avtaeva S. V.** On electron attachment effect on characteristics of the DBD in chlorine and its mixtures with xenon // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 927. P. 012006. DOI 10.1088/1742-6596/927/1/012006
49. **Avtaeva S., Gorokhovskiy V., Obrusnik A., Zembower Z.** Composition of high current arc plasma in Ar-H₂ mixture at moderate pressures // Gas-discharge plasma and its application: Collection of abstracts of XIII International Conference, September 5-7, 2017. Novosibirsk, 2017.
50. **Avtaeva S. V., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Yaskin A. S., Chinenov S. T.** Spark discharge excited supersonic gas jets // Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Vol. 1. Plasma, Clusters, and Atmosphere / Ed. by A. M. Starik and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 232–240.
51. **Avtaeva S. V., Yakovleva T. S., Kalyada V. V. and Zarvin A. E.** The electron beam diagnostic of the clustered supersonic nitrogen jets // J. Phys. Phys. Conf. Ser. 2017. Vol. 927. P. 012005. DOI 10.1088/1742-6596/927/1/012005
52. **Yakovleva T. S., Avtaeva S. V. V., Kalyada V. V., Zarvin A. E.** Measurement of the rotational temperature of nitrogen in a clustered supersonic jet // Vacuum Science and Technology: Proceedings of the XXIV Scientific and Technical Conf. with the participation of foreign experts / Edited by Dr. S. B. Nesterov, September 16-23, 2017, Sudak. Moscow: Novella. 2017. C. 96 100.
53. **Chinenov S. T., Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Mass spectrometric study of gas clusters by a high-voltage electron beam // J. Phys. Conf. Ser. 2018. Vol. 1105. P. 012113. DOI 10.1088/1742-6596/1105/1/012113
54. **Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Dubrovin K. A., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Plasma chemical reactions initiation in supersonic jets by a high-voltage electron beam // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1683. P. 032008. DOI 10.1088/1742-6596/1683/3/032008/
55. **Khudozhitkov V. E. and Kalyada V. V.** Registration of protoned argon and helium in a clustered gas flow of argon-hydrogen and helium-hydrogen mixtures // AIP Conf. Proceedings. 2021. Vol. 2351. P. 040003. <https://doi.org/10.1063/5.0052014>
56. **Ukhina A. V., Dudina D. V., Esikov M. A., Galashov E. N., Bokhonov B. B.** The influence of morphology and composition of metal–carbide coatings deposited on the diamond surface on the properties of copper–diamond composites // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 401. P. 126272.
57. **Galashov E. N., Matvienko D. V., Moskovskiy V. A., Sikach B. I., Shwartz B. A.** Scintillation properties of (Zn_{0.9}Pb_{0.1})(W_{0.9}Mo_{0.1})O₄ and (Zn_{0.9}Cd_{0.1})(W_{0.9}Mo_{0.1})O₄ mixed crystals // Journal of Instrumentation. 2020. Vol. 15(7). P. C07028.
58. **Galashov E. N., Mandrik Y. M., Atuchin V. V., Gavrilova T. A., Korolkov I. V., Yelisseyev A. P., Xia Z.** Synthesis of Y₃Al₅O₁₂:Ce³⁺ phosphor in the Y₂O₃–Al metal–CeO₂ Ternary system // Journal of Materials Science. 2017. Vol. 52(22). P. 13033-13039.
59. **Galashov E. N., Atuchin V. V., Pokrovskiy L. D., Bekenev V. L., Khyzhun O. Y., Borovlev Yu. A., Kozhukhov A. S., Zhdankov V. N.** Low thermal gradient Czochralsky growth of large MWO₄ (M = Zn, Cd) crystals, and microstructural and electronic properties of the (010) cleaved surfaces // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2017. Vol. 19, № 1-2. P. 86–90.

Сведения об авторах

Александр Евгеньевич Зарвин, кандидат физико-математических наук

Евгений Николаевич Галашов, научный сотрудник

Борис Семенович Ездин, кандидат физико-математических наук

Николай Геннадьевич Коробейщиков, кандидат физико-математических наук

Петр Григорьевич Пасько, старший научный сотрудник

Александр Сергеевич Яскин, кандидат технических наук

Information about the Authors

Alexandr E. Zarvin, PhD, Head of the Research Department

Evgenii N. Galashov, Research Assistant

Boris S. Ezdin, PhD, Senior Researcher

Nikolay G. Korobeishchikov, PhD, Senior Researcher

Petr G. Pasko, Senior Researcher

Alexander S. Yaskin, PhD, Senior Researcher

*Статья поступила в редакцию 23.11.2021; одобрена после рецензирования 29.11.2021;
принята к публикации 22.06.2023*

*The article was submitted 23.11.2021; approved after reviewing 29.11.2021;
accepted for publication 22.06.2023*