

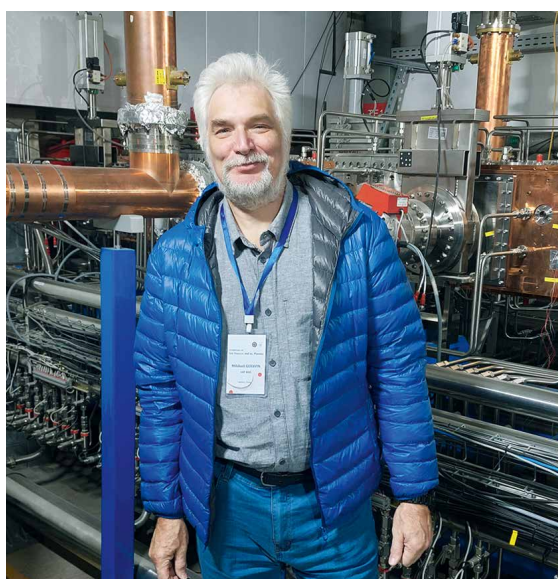
На волне гиротрона

Мировое лидерство ученых ИПФ РАН в области создания самых мощных в мире источников электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн — гиротронов — дало основания для включения института в число участников комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года»

Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН) стал одним из немногих академических учреждений страны, ставших участниками этой программы. Для того, чтобы обеспечить высокоэффективную генерацию мощного микроволнового излучения необходимо решить большое число теоретических и практических задач. О развитии научного направления, связанного с созданием гиротронов и гиротронных комплексов, рассказывает заместитель директора ИПФ РАН по научной работе, заведующий отделом электронных приборов, д. ф.-м. н. Михаил Юрьевич Глявин.

— Гиротрон — это электровакуумный СВЧ-генератор. В отличие от классических приборов вакуумной СВЧ-электроники в гироприборах характерные размеры электродинамических систем значительно превышают длину волны, при этом обеспечивается эффективная электронная и электродинамическая селекция мод, позволяющая реализовать режим мощной одномодовой генерации с высоким КПД, — говорит Михаил Глявин. — По средней мощности и энергии излучения гиротроны значительно, на несколько порядков, превосходят другие источники излучения диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн. В настоящее время гиротроны широко применяются для электронно-циклотронного нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза, для микроволновой высокотемпературной обработки материалов, спектроскопии и диагностики различных сред, инициации точечного плазменного разряда и ряда других приложений.

История создания гиротронов берет начало с середины XX в., когда человечество заинтересовалось последним неосвоенным диапазоном электромагнитных волн, в котором ни традиционные радиотехнические приборы (лампы бегущей или обратной волны, клистроны, магнетроны), ни лазеры не могли обеспечить высокую мощность и энергию излучения. (Напомним, что электромагнитные волны — это одно из ключевых понятий физики, при этом они широко используются в радиосвязи, телевидении, бытовых микроволновых печах, оптических приборах и т. д.). Сейчас часть этого диапазона ($0,1\text{--}10 \times 10^9$ Гц) принято называть «терагерцовым провалом».



◀ Михаил
Юрьевич Глявин

СПРАВКА М.Ю. Глявин родился в 1965 г. в Горьком. Окончил Горьковский политехнический институт. В 1999 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Проблемы генерации высокоэффективных одномодовых колебаний в мощных коротковолновых гиротронах», в 2009 г. — докторскую диссертацию «Гиротроны для технологических комплексов и диагностических систем». Области научных интересов: электроника СВЧ, гиротроны и гиротронные комплексы для микроволновой обработки материалов, гиротроны ТГц диапазона для спектроскопии и диагностики различных сред. Профессор ВШОПН ННГУ, ведет лабораторные занятия, читает лекции по введению в специальность, электронике СВЧ, спецкурсам. Под его руководством студентами защищено более 10 дипломных работ и три кандидатские диссертации. В 1990–1998 гг. руководил Летней физико-математической школой для старшеклассников. В 1999–2004 гг. — один из организаторов Сессии молодых ученых Нижегородской области. В 2006–2015 гг. — председатель профсоюзного комитета ИПФ РАН. За последние 10 лет руководил более чем 20 научными проектами по заказам Министерства образования и науки РФ, программ Президиума РАН, грантам РНФ и РФФИ, в том числе работами российской группы в рамках проекта The International Consortium for Development of High-Power Terahertz Science and Technology, организованного Research Center for Development of Far-Infrared Region University of Fukui (FIR UF). Член диссертационного и Ученого советов ИПФ РАН, в 2016–2021 г. — член экспертного Совета РНФ по секции инженерных наук. Входит в число наиболее цитируемых ученых мира по версии Scopus. Увлечение — водный туризм, кандидат в мастера спорта СССР. Совершил около 40 походов, от простейших до высшей категории сложности, в том числе 30 руководителем. Член первого формирования спасательного отряда МЧС Нижегородской области.



▲ М.Ю. Глявин работает в ИПФ РАН 35 лет, пройдя путь от стажера-исследователя до заместителя директора института по научной работе

Гиротрон является разновидностью так называемых мазеров на циклотронном резонансе, механизм излучения которых был открыт в конце 1950-х гг. почти одновременно несколькими авторами в разных странах. Однако наиболее последовательным и успешным воплощением этой идеи в электронике больших мощностей занялись горьковские ученые во главе с Андреем Викторовичем Гапоновым-Греховым, основателем и первым директором ИПФ РАН. Ими были развиты теоретические подходы к разработке гиротронов, предложены ключевые узлы и, наконец, на практике реализованы наиболее мощные и эффективные на тот момент приборы этого класса. Изобретение и доведение до высокого технического уровня приборов гиротронного типа является одним из признанных и широко известных достижений коллектива ИПФ РАН не только в России, но в мировой науке.

Под руководством дважды лауреата Государственной премии СССР Валерия Александровича Флягина, академиков Александра Григорьевича Литвака, Григория Геннадьевича Денисова, директора ЗАО НПП «ГИКОМ» Евгения Васильевича Соколова нижегородцы стали мировыми лидерами по разработке и производству гиротронов для установок управляемого термоядерного синтеза. В ИПФ РАН созданы и испытаны гиротроны мегаваттного уровня мощности, работающие практически в непрерывном режиме. Сегодня нижегородские гиротроны определяют мировой уровень вакуумной электроники больших мощностей, превосходят мировые аналоги по частоте излучения, мощности и эффективности и востребованы на российском и международном рынках: подобными гиротронами оснащено более половины всех термоядерных установок в мире. Гиротроны рассматриваются как наиболее вероятные источники излучения, позволяющего нагреть плазму до температур, при которых должна возникнуть реакция управляемого термоядерного синтеза, наиболее перспективного источника энергии будущего.

Гиротронами активно осваивается терагерцовый диапазон, востребованный для

всевозможных приложений. С начала XXI в. институт является обладателем мирового рекорда по самому коротковолновому и самому мощному излучению, когда-либо продемонстрированному гироприборами. Наряду с традиционными вариантами гиротронов, работающих при очень сильных магнитных полях на основном циклотронном резонансе, разрабатываются также источники на более высоких циклотронных гармониках (гиротроны с большой орбитой, гироумножители).

— Что касается программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года», то на ее выполнение направлена большая часть усилий отдела электронных приборов, — поясняет ученый. — Даже первые результаты, полученные в рамках этой программы, оказались настолько значимыми, что уже принято решение о ее продлении до 2030 года. В соответствии с программой в России планируется реализовать две крупные термоядерные установки: токамак Т-15МД в Курчатовском институте и токамак с реакторными технологиями (РТР), аналогов которому пока не существует, в подмосковном Троицке. Магнитное поле РТР будет значительно выше, чем в существующих токамаках, что требует создания мегаваттных гиротронов нового поколения с частотой излучения примерно в полтора раза выше, чем у существующих аналогов.

М.Ю. Глявин работает в ИПФ РАН с 1988 г., пройдя путь от стажера-исследователя до заместителя директора по научной работе. Его научная деятельность связана с разработкой и исследованиями гиротронов, разработкой технологических комплексов микроволновой обработки материалов и диагностических систем на основе гиротронов. Ученым получены важные фундаментальные и прикладные результаты, в том числе созданы гиротроны для микроволновой обработки материалов с рекордными значениями эффективности, продемонстрирована возможность освоения гиротронами терагерцового диапазона частот, исследованы факторы, влияющие на эффективность генерации гиротронов и селективное возбуждение высших гармоник. С 1999 г. в качестве приглашенного профессора сотрудничал с Центром разработки приборов дальнего инфракрасного диапазона университета Фукуи (Япония), участвуя в выполнении ряда совместных проектов по созданию субмиллиметровых гиротронов, а также с университетом Мэриленда (США) по разработке импульсных гироприборов на базе магнитных систем со сверхсильными полями.

— Для меня электроника была и остается наиболее близкой по духу к прикладной физике: здесь есть место и новым физическим идеям, и уникальным техническим решениям, и возможность на практике реализовать и проверить свои расчеты, и востребованность потребителями. Все 35 лет работы в институте я занимаюсь исследованиями в области вакуумной электроники больших мощностей. Уникальное достижение (на мой взгляд,

уровня Нобелевской премии) академика Андрея Викторовича Гапонова-Грехова и его коллег заключается в идее и первой практической реализации гиротрона — прибора, который способен генерировать высокие мощности в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн, — продолжает Михаил Глявин. — Известный американский ученый Джон Пирс говорил, что человеку свойственно мечтать о все более компактных и мощных приборах, но одно дело — говорить об этих приборах, а другое — создать их. Мне посчастливилось участвовать в создании современных гиротронов.

В юности я стал одним из четырнадцати студентов Горьковского политехнического института, которые были приглашены в первый набор будущей Высшей школы общей и прикладной физики, а тогда базовой кафедры ИПФ РАН, организованной в политехе по инициативе Александра Григорьевича Литвака, ныне научного руководителя ИПФ РАН. Нас собрали с разных факультетов (я пришел с факультета радиоэлектроники и технической кибернетики), но всех объединяло желание заниматься физикой и, в первую очередь, физическим экспериментом. Дело в том, что ИПФ РАН располагал большим количеством инженерных установок, и нужны были специалисты, имеющие не только хорошую теоретическую подготовку, но и склонности к экспериментальной, инженерной деятельности. Помимо куратора группы Евгения Васильевича Суворова (очень яркой личности, впоследствии руководителя Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН) у каждого студента был научный руководитель. У меня им стал к.ф.-м.н. Григорий Семенович Нусинович, умело сочетавший занятия теорией и экспериментом. Политех я окончил в 1988 году по специальности «Инженерная электрофизика». В качестве дипломной работы было выполнено исследование системы ввода внешнего сигнала в резонатор гиротрона. Интересно, что к этой работе, правда, на совершенно другом уровне, я снова вернулся в этом году — через 35 лет, и полученные в нашем отделе результаты стали одними из наиболее значимых для института в 2023 году. Кстати, наш первый выпуск оказался очень сильным. Среди моих одноклассников, например, — академик, главный научный сотрудник ИПФ РАН Ефим Аркадьевич Хазанов, да и остальные добились высоких результатов, пусть и не всегда в связанных с наукой областях. Достаточно назвать Александра Николаевича Котюсова и Дмитрия Викторовича Кузина, известных нижегородских бизнесменов.

В ИПФ РАН я распределился в лабораторию, перед которой стояла задача разработки гиротронов очень высокой частоты. Я бесконечно признателен своим родителям — преподавателям политехнического института Юрию Викторовичу и Тамаре Алексеевне Глявиным, своей семье — жене Инне, дочерям Марии и Анне за то, что они всегда поддерживали меня в выбранном пути и с пониманием относились к тому, что большую часть времени я провожу не с ними, а в институте. Считаю, что все, чего мне удалось добиться в науке, стало возможным благодаря взаимодействию

с моими коллегами, среди которых особо хочу выделить тех, с кем работаю от первого появления в ИПФ и по сей день — кандидата физико-математических наук Алексея Григорьевича Лучинина и Виктора Аркадьевича Малышева.

К сожалению, в 1991 году Григорий Семенович Нусинович в силу ряда обстоятельств уехал за рубеж, и я лишился официального научного руководителя, хотя наши с ним контакты сохранились до сих пор. В то время не было развитого интернета и даже электронной почты, и практически до всего пришлось доходить своим умом, хотя, на счастье, всегда рядом были старшие товарищи, к которым я мог обратиться за советом. Переломный момент в моей трудовой биографии наступил в конце 1990-х годов, когда я под руководством



кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника института Аркадия Львовича Гольденберга — одного из «родителей» гиротрона — защитил кандидатскую диссертацию. В том же году на международной конференции мне довелось познакомиться с профессором Тошитака Идехара из университета Фукуи, и нас с ним, несмотря на большую разницу в возрасте, на долгие годы связали деловые и дружеские отношения. Мы сотрудничали сначала как учитель и ученик, потом как равные партнеры. Считаю, что тесное взаимодействие с японским коллективом исследователей, в состав которых входил болгарский профессор Свилен Сабчевский, дало многое не только мне, но было полезно и гиротронике в целом, поскольку удалось реализовать несколько очень интересных совместных проектов.

В 2009 году я защитил докторскую диссертацию, и в том же году в институте случился пожар, повредивший заметную часть оборудования нашей лаборатории. Я был в шоке от произошедшего, но в итоге при поддержке администрации и коллег нам удалось достаточно быстро отремонтировать помещение, оснастить лабораторию современным оборудованием и реализовать новые, более амбициозные проекты.

Время от времени я цитирую молодым коллегам слова Михаила Ивановича

▲ Тесное взаимодействие с японскими коллегами позволило реализовать ряд интересных совместных проектов.
М.Ю. Глявин с профессором Тошитака Идехара

Петелина — человека, стоявшего у истоков гиротроники, и одного из ближайших учеников и сподвижников академика Андрея Викторовича Гапонова-Грехова: «Существует «вечная» задача СВЧ-электроники — повышение мощности и частоты генерируемого излучения». Так оно и есть. Со времени своего появления и по сей день развитие всех электронных приборов направлено на повышение их частоты, мощности и эффективности. До определенного момента это легко, если начальный уровень не высок, но когда ты уже почти достиг теоретического предела, то каждый следующий шаг дается с колоссальным трудом.

Имея многолетний опыт работы в отделе мощных электронных приборов, после защиты двух диссертаций, неоднократных и продолжительных контактов с зарубежными коллегами могу обоснованно утверждать, что получить генерацию в гиротроне достаточно просто, а вот сделать прибор с максимально возможным КПД, большой выходной мощностью и высокой частотой может далеко не каждый. Для этого мы работаем над новыми концепциями, новыми схемами генераторов и усилителей. В наши дни гироприборы сделали качественный скачок, превратив в реальность проекты, казавшиеся несбыточными: 1 МВт непрерывной мощности на частотах 140–170 ГГц с эффективностью больше 50 процентов, прорыв в терагерцовый диапазон, широкополосную генерацию. Как я уже отметил, сегодня нам принадлежит ряд мировых рекордов и уникальных достижений в гиротронике, и, безусловно, мне хочется, чтобы эти рекорды по частоте, мощности и мощности генерированного излучения и дальше удерживала Россия.

Мы работаем над тем, чтобы наши приборы были все более востребованы для различных приложений. Отрадно, что растет интерес потребителей к высокочастотным системам. Здесь широкое поле возможностей. Так, использование терагерцовых технологий в коммуникационной сфере позволит создать сверхбыстрые каналы для беспроводных систем, обеспечивающих скорости передачи данных свыше 10 Гбит/с. В этом же диапазоне

лежат характерные линии поглощения целого ряда биологических молекул. Доказано, что больные клетки новообразования у человека или животного при облучении волнами определенной частоты поглощают в три-четыре раза больше энергии, чем здоровые, вследствие чего перегреваются и погибают. Иными словами, терагерцовое излучение дает возможность неинвазивного селективного воздействия на опухоли. Использование мощного излучения гиротронов позволило увидеть новые спектральные характеристики ряда газов. Еще одна область применения — инициация точечных разрядов в газовой среде, что может служить источником экстремального ультрафиолетового излучения для литографии или использоваться для индикации источников ионизирующих излучений, то есть радиоактивных элементов, с большого расстояния.

Расширяется область приложения микроволновых технологий. Интересно, что спектр потенциальных приложений начался у нас со ... стоматологии. Оказалось, что при помощи наших методов можно обеспечить идеальное соединение металла и керамики при изготовлении коронок. По факту врачи отказались от этой идеи, потому что наши установки достаточно объемные, требуют соблюдения определенных требований безопасности и квалификации пользователя. Тем не менее, сегодня мои молодые коллеги обсуждают возможность массового производства имплантов, которые после 3D-печати будут обрабатываться микроволновым излучением. В какой-то момент к нам обращались машиностроители. Известно, что одна из проблем двигателей внутреннего сгорания — это разогрев и повышение трения между цилиндром и поршнем. Можно делать эти элементы керамическими, и тогда потери на трение заметно уменьшаются, в результате чего вы получите двигатель с большей экономичностью. Еще одна работа, связанная с автомобильной тематикой, касалась производства автомобильного стекла. Выяснилось, что при микроволновом нагреве стекло той же прочности может быть более тонким и требуется меньше исходного материала. Вместе с японскими коллегами мы занимались изготовлением стержней защиты ядерных реакторов. В Японии после аварии на АЭС Фукусима-1 серьезно задумались о дополнительных мерах безопасности. Как известно, для того чтобы заглушить реактор, необходимо сбросить защиту, состоящую из углеродных стержней и позволяющих поглотить нейтронный поток, обеспечивающий поддержание реакции. Из наших экспериментов следовало, что наиболее качественные и прочные стержни можно создавать при помощи микроволнового нагрева, но пока это осталось на уровне лабораторных разработок.

Лаборатория микроволновых технологий, которой многие годы руководил один из моих учителей Юрий Владимирович Быков, совместно с ЗАО НПП «ГИКОМ» разработала, изготовила и поставила заказчикам, преимущественно зарубежным, несколько десятков технологических гиротронных комплексов для спекания керамики и источников многозарядных ионов. Во время недавней командировки в Китай

▼ Супруга и дочери М.Ю. Глявина с пониманием относятся к тому, что большую часть времени он проводит не с ними, а в институте



я осмотрел там установку для лечения раковых опухолей, рабочей средой в которой являются протонные и нейтронные пучки, создаваемые при помощи ионных пучков, бомбардирующих мишень из специфического материала. Подобная установка разрабатывается и в нашем институте, и неотъемлемым элементом этой установки является производимый нами гиротрон. Еще одно перспективное направление — получение искусственных алмазов, то есть материалов, обладающих очень высокой теплопроводностью и прочностью. Отделом физики плазменных технологий нашего института, которым руководит доктор физико-математических наук Анатолий Леонтьевич Вихарев, создана уникальная методика выращивания искусственных алмазов, а мы рассчитываем на порядок увеличить скорость роста алмазных пленок и дисков за счет применения гиротронов. Это возможно, поскольку плотность плазмы и, соответственно, количество «материала» для выращивания алмазного диска прямо пропорциональны частоте излучения, инициирующего газовый разряд, а частота гиротрона примерно в 10 раз выше, чем у применяемых сегодня источников.

Вообще решение большинства любых задач всегда идет по двум направлениям. Первое: нам ставят задачу, и мы создаем прибор для ее решения. Второе: мы говорим окружающим: у нас есть такой прибор, а вы прикиньте, что можно сделать с его помощью. И отклики есть — от химиков, медиков, промышленников.

В целом в ИПФ РАН проблемами физической электроники, в том числе гиротроникой, занимаются около 100 человек, среди которых есть и мои ученики — кандидаты физико-математических наук Михаил Владимирович Морозкин, Михаил Дмитриевич Проявин и Андрей Павлович Фокин, который недавно возглавил лабораторию гиротронов терагерцового диапазона. В сентябре мы с Андреем совершили визит во Францию на строительство первого в мире термоядерного экспериментального реактора (токамака ИТЭР). Проект ИТЭР — самый крупный международный научный проект современности — заключается в демонстрации научно-технологической осуществимости использования термоядерной энергии в промышленных масштабах и возможности коммерческого использования термоядерной реакции. Консорциум ИПФ РАН и предприятия ЗАО НПП «ГИКОМ» получил заказ на изготовление для ИТЭР восьми непрерывных гиротронов мощностью 1 МВт, работающих на частоте 170 ГГц (всего планировалось 24 гиротрона, 16 должны были изготовить страны Евросоюза и Япония). Гиротронные комплексы, разрабатываемые и производимые в Нижнем Новгороде, являются важнейшим оборудованием ИТЭР. Андрей Фокин будет курировать большую часть работ по тестированию российских гиротронов. Четыре из восьми российских приборов уже находятся на площадке ИТЭР.

В этой связи не могу не отметить наше многолетнее сотрудничество с коллективом ЗАО НПП «ГИКОМ», который сейчас возглавляет Евгений Максимович Тай. Основным направлением деятельности этого предприятия является



◀ Поход группы сотрудников ИПФ РАН по рекам Кольского полуострова на катамаранах. Справа — руководитель похода М.Ю. Глявин. 2013 г.

промышленное производство гиротронов, и у этих работ, очевидно, большое будущее. В этом году после анализа возможностей и перспектив проекта ИТЭР принято решение увеличить количество гиротронных комплексов с 24 до 80, и, вероятно, изготовление части дополнительных 56 гиротронов будет возложено на «ГИКОМ». Сейчас китайские партнеры интересуются возможностью поставить им около 50-ти гиротронов за пять лет для своих крупных проектов. Они тоже строят свой токамак, который будет называться BEST. Видимо, будет проведен международный конкурс, но мы надеемся, что именно «ГИКОМ» будет реализовывать этот заказ. Благодаря этому предприятию нам удастся быстро и на высоком уровне претворять «в железо» все свои научные идеи, какими бы сложными для реализации они ни казались на первый взгляд.

ИПФ РАН ЯВЛЯЕТСЯ МИРОВЫМ ЛИДЕРОМ ПО РАЗРАБОТКЕ И ПРОИЗВОДСТВУ ГИРОТРОНОВ ДЛЯ УСТАНОВОК УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Как заместитель директора я рад, что в ИПФ ученым созданы хорошие условия для работы — на мой взгляд, лучше, чем во многих столичных или зарубежных лабораториях. Наш институт заслуженно считается одним из сильнейших и в стране, и в мире по своим тематикам, здесь прекрасный коллектив и атмосфера, комфортная для научного творчества. Создана система непрерывной подготовки кадров — профильные классы лицея 40 (школы РАН), факультет ВШОПФ Университета Лобачевского и аспирантура. Пример экс-президента РАН, научного руководителя Национального физико-математического центра Александра Михайловича Сергеева, на протяжении долгих лет работающего в нашем институте, показывает, что для молодежи есть практически неограниченная перспектива профессионального карьерного роста. Не стоит забывать, что ИПФ РАН имеет отношение к двум недавним Нобелевским премиям по физике, присужденным за открытие гравитационных волн и компрессию лазерных импульсов. Это тоже критерий уровня ИПФ РАН и всей нижегородской науки, и я испытываю радость и гордость за то, что связал свою жизнь с институтом! 📷