



**НАУЧНО-  
ПРОИЗВОДСТВЕННОМУ  
ПРЕДПРИЯТИЮ  
ГИКОМ**



**25**  
**ЛЕТ**



**НПП ГИКОМ**

Россия, 603155  
Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46  
Телефон: (831) 436-40-89  
Факс: (831) 202-03-63



**НАУЧНО-  
ПРОИЗВОДСТВЕННОМУ  
ПРЕДПРИЯТИЮ  
ГИКОМ  
25 ЛЕТ**



Нижний Новгород • 2017

**В** феврале 1992 года в Нижнем Новгороде по инициативе ученых и инженеров нижегородского Института прикладной физики РАН, Института атомной энергии им. И.В. Курчатова (Москва) и предприятий электронной промышленности «Салют» (Нижний Новгород) и «Торий» (Москва) было организовано закрытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие ГИКОМ» (от «ГИротронные КОМПлексы»). Несмотря на экономическую разруху начала 90-х годов и обрушение финансирования науки в нашей стране, создание НПП ГИКОМ позволило сохранить достижения науки, технологии и производственный потенциал в области разработки и изготовления гиротронов — источников мощного СВЧ-излучения диапазона миллиметровых длин волн. Вскоре ГИКОМ завоевал лидирующие позиции на мировом рынке, обеспечивая экспериментальные установки управляемого термоядерного синтеза гиротронами и необходимым для их работы вспомогательным оборудованием (сверхпроводящими криомагнитами, квазиоптическими линиями передачи СВЧ-излучения, измерительными СВЧ-приборами), и сохраняет эти позиции все 25 лет своего существования, превратившись за прошедшие годы в хорошо оснащенное многопрофильное высокотехнологичное предприятие.



Продукция НПП ГИКОМ не является серийной, она представляет собой уникальные изделия, как правило, обладающие рекордными параметрами в своем классе и разработанные под специфические требования заказчика. Эти изделия отличаются высоким качеством и надежностью и находят применение в России, странах Европы, Северной Америки, Японии, Индии, Китае, Южной Корее. Больше половины крупномасштабных установок магнитного термоядерного синтеза в мире оснащены нижегородскими гиротронами.

Залогом успеха ГИКОМа служит многолетнее тесное научное взаимодействие с Институтом прикладной физики РАН, рациональное распределение исследовательской (ИПФ РАН), опытно-конструкторской и производственной (ГИКОМ) деятельности. В ГИКОМе работают высококвалифицированные специалисты и инженеры из различных областей радиофизики, физической электроники, материаловедения и спецтехнологий; среди них 8 докторов наук, 40 кандидатов физико-математических и технических наук. ГИКОМ располагает современной производственно-технологической и испытательной базой, необходимой для работы на мировом уровне.

Настоящее издание посвящено 25-летию ЗАО «НПП ГИКОМ» и содержит краткую историю успешного предприятия, справочные материалы о его современной продукции, а также некоторые поздравительные отзывы и воспоминания представителей ведущих российских и зарубежных исследовательских центров о становлении НПП ГИКОМ и эффективном многолетнем сотрудничестве с ним. Эти воспоминания и поздравления, написанные в произвольной форме, иногда очень эмоционально, особенно ярко освещают четвертьвековой путь ГИКОМа и его достижения.

А.Г. Литвак, президент ЗАО «НПП ГИКОМ»

# ПРЕДЫСТОРИЯ

*Гиротрон — это разновидность лазера на циклотронном резонансе (МЦР), в котором используется резонансное взаимодействие электронов, движущихся по винтовым траекториям в постоянном магнитном поле, с волнами, распространяющимися поперек направления магнитного поля. Принципиальной для механизма излучения в МЦР является релятивистская зависимость частоты циклотронного вращения электронов от их энергии. Будучи источниками излучения на частотах от нескольких гигагерц до терагерцового диапазона, гиротроны многократно превосходят все другие приборы, пригодные для проведения энергоемких процессов.*

Механизм индуцированного циклотронного излучения был открыт еще в конце 50-х годов прошлого столетия несколькими авторами из разных стран. Однако последовательной реализацией этой идеи для создания приборов мощной вакуумной электроники занялся только один из первооткрывателей — А.В. Гапонов-Грехов с учениками. В Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ) в городе Горьком им вместе с учениками (И.И. Антаков, М.И. Петелин, В.К. Юлпатов, В.А. Флягин) был создан источник мощного электромагнитного излучения в диапазоне миллиметровых длин волн, получивший название «гиротрон».

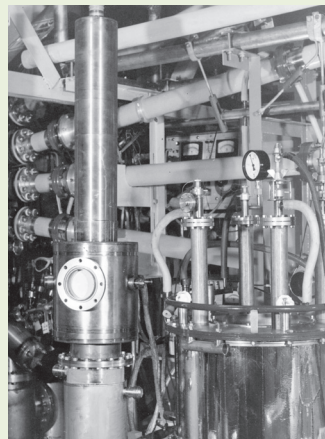
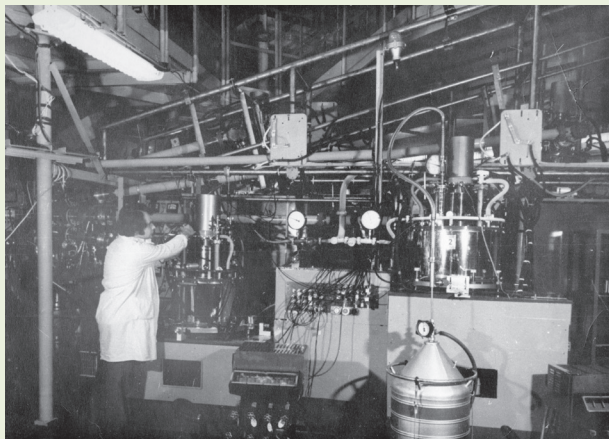
Первый же эксперимент с использованием гиротрона, выполненный коллективом ученых и инженеров (позднее они составили основу Института прикладной физики Академии наук — ИПФАН), впервые продемонстрировал самофо-

кусировку пучка электромагнитных волн в плазме и наглядно подтвердил, что гиротрон — действительно мощный прибор. После этого возникли предложения по использованию излучения гиротрона для электронно-циклотронного нагрева плазмы в токамаках — установках управляемого термоядерного синтеза. И уже в начале 70-х годов первые эксперименты по нагреву плазмы с использованием излучения импульсных гиротронов — экспериментальных образцов, изготовленных в НИРФИ, были выполнены в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (ИАЭ) и Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (ФТИ). Успех этих экспериментов стимулировал организацию промышленного выпуска гиротронов на предприятии «Салют» в г. Горьком. В частности, по предложению М.И. Петелина была использована схема преобразования рабочей моды со сложной про-



*Город Горький. 50-е годы*





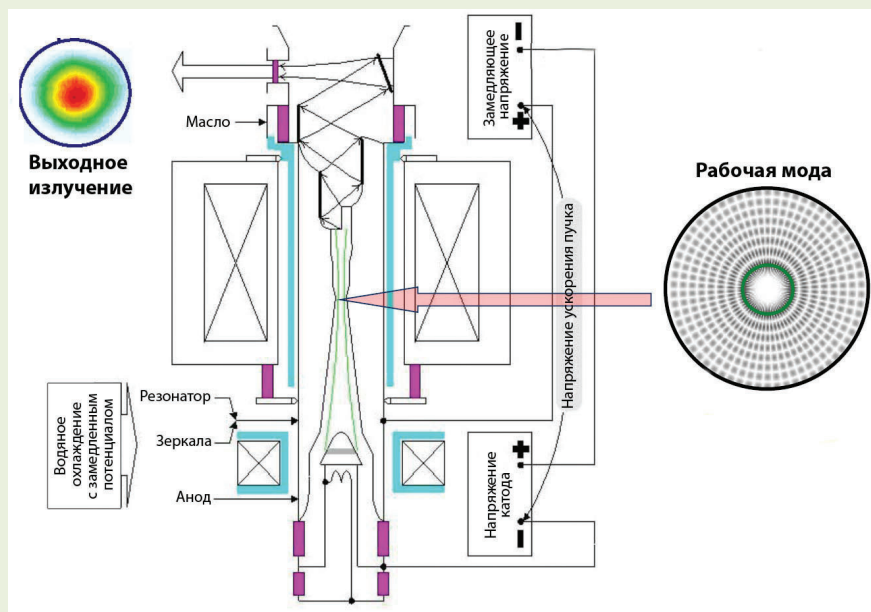
*Гиротронный комплекс на Т-10 в ИАЭ имени И.В. Курчатова*

странственной структурой в узконаправленный волновой пучок. Эти разработки определили особенности конструкции мощных гиротронов, сохранившиеся в основных чертах до сих пор. Одновременно в ИПФАНе были разработаны базовые принципы использования излучения гиротронов для резонансного электронно-циклотронного (ЭЦР) нагрева плазмы в термоядерных установках (А.Г. Литвак, Е.В. Суворов). Тогда же началась разработка гироклистронов (усилителей диапазона миллиметровых волн) для радиолокации.

Первые эксперименты по ЭЦР-нагреву плазмы, сопровождаемые публикациями о разра-

ботанных для этой цели гиротронах, пробудили интерес зарубежных лабораторий и фирм к исследованиям и разработкам мощных гирорезонансных приборов. В 1975 году производство гиротронов для установок УТС началось на фирме Varian в США, а затем на CSF Thomson во Франции, Toshiba в Японии и других.

В 80-е годы гиротроны были применены на нескольких термоядерных установках в США, Германии, Италии, Японии, Швейцарии и других странах. Но вплоть до конца 80-х годов лидирующие позиции в области нагрева плазмы излучением гиротронов сохранялись за советской наукой. Так, в ИАЭ им. И.В. Курчатова был



*Схема гиротрона*

создан гиротронный комплекс из 11 гиротронов на частоте 80 ГГц с суммарной мощностью 4,4 МВт и длительностью импульса 0,5 с, использовались опытно-промышленные гиротроны НПП «Салют». С помощью этого комплекса были проведены убедительные эксперименты по нагреву плазмы и генерации стационарного тока на токамаке Т-10. К разработке мощных длинноимпульсных гиротронов подключилось также одно из ведущих предприятий советской электронной промышленности НПП «Торий» (Москва).

С распадом СССР российская наука и промышленность вступили в долгую полосу трудностей из-за нарушения сложившихся производственных отношений, организационной перестройки и катастрофически низкого финансирования. Многие предприятия, в том числе и предприятия вакуумной электронной промышленности, оказались на грани исчезновения. Исследования гирорезонансных приборов в ИПФ РАН, производство гиротронов на предприятии «Салют» и эксперименты по ЭЦР-нагреву плазмы в ИАЭ им. И.В. Курчатова продолжались, но было понятно, что для дальнейших исследований необходимы существенные структурные изменения и новые источники финансирования работ.

В это время российские гиротроны по основным параметрам превосходили зарубежные

аналоги, однако из-за отсутствия опыта взаимодействия с зарубежными лабораториями и трудностей организации экспорта высокотехнологичной продукции они не предлагались на экспорт. В качестве первого шага в этом направлении в 1991 году ИПФ РАН предоставил Институту физики плазмы им. М. Планка (IPP, Германия) практически безвозмездно российский гиротрон на частоте 140 ГГц для опытного использования на стеллараторе W7-AS. После его запуска и проведенных экспериментов для всех потенциальных потребителей стало ясно, что российские гиротроны могут успешно соперничать с гиротронами, изготовленными ведущими электронными фирмами мира.

По инициативе А.Г. Литвака и под его руководством было создано предприятие для производства гиротронных комплексов, в котором планировалось сохранить научно-исследовательские, производственные и испытательные возможности российских организаций, участвовавших в создании гирорезонансных приборов. Научно-производственное предприятие получило название ГИКОМ, оно было учреждено в форме акционерного общества. Его первыми акционерами стали 30 человек, внесшие существенный вклад в программу создания и применения гиротронов.



*Нижний Новгород. Зимний вечер*



# 1992—2017

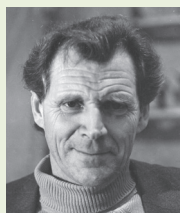
4 февраля 1992 года является официальной датой учреждения Научно-производственного предприятия ГИКОМ. Руководителями стали: президент — А.В. Гапонов-Грехов, вице-президент — А.Г. Литвак, директор — Е.В. Соколов. В наблюдательный совет вошли представители заинтересованных организаций: С.Д. Богданов (НПП «Салют»), В.Е. Мясников (НПП «Торий»), В.В. Аликаев (ИАЭ им. И.В. Курчатова) и В.А. Флягин (ИПФ РАН).

В том же году ГИКОМ получил приглашение участвовать в международных тендерах на поставку гиротронов на токамак FTU (ENEA, Италия) и стелларатор W7-AS (IPP, Германия). С фирмой CSF Thomson была достигнута договоренность о совместном участии в этих тендерах. Однако незадолго до срока подачи заявок от CSF Thomson поступили предложения изменить условия совместного участия (в пользу CSF Thomson). Но для руководства ГИКОМа это показалось неприемлемым, и тогда в сжатые сроки были оформлены и поданы самостоятельные заявки на два тендера. И оба тендера ГИКОМом были выиграны! Изготовление и поставка гиротронов прошли успешно. В дальнейшем ГИКОМ многократно участвовал в различных международных тендерах на поставку гиротронов и компонентов гиротронных комплексов и в большинстве случаев выигрывал заказы, причем это происходило в условиях острой конкуренции, хотя практически всегда в Европе, США и Японии присутствовало естественное правило поддержки национального производителя.



*Гости ИПФ РАН и ГИКОМа во время конференции «Strong microwaves in plasmas», 1993 год*

Основными продуктами предприятия ГИКОМ и сегодня являются гиротроны для установок УТС. Мощность и длительность непрерывной работы таких установок со временем увеличились, и, естественно, к энергетическим характеристикам гиротронов для нагрева плазмы предъявлялись все более высокие требования. Соответственно, новые разработки ГИКОМа всегда направлены на повышение мощности и увеличение длительности излучения гиротронов: в 1992 году максимальная энергия в импульсе составляла 1 МДж (выходная мощность 500 кВт в течение 2 с на частоте 140 ГГц), а в 2013-м она достигла 1000 МДж (1 МВт, 1000 с, 170 ГГц). Таким образом, фактически состоялся переход к непрерывному режиму работы.



*А.В. Гапонов-Грехов*



*А.Г. Литвак*



*Е.В. Соколов*



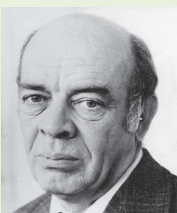
*В.Е. Мясников*



*В.В. Аликаев*



*С.Д. Богданов*



*В.А. Флягин*

Благодаря новым исследованиям и разработкам конструкция гиротронов для управляемого термоядерного синтеза постоянно и существенно совершенствовалась, что позволило перейти от импульсного режима работы к непрерывному и значительно повысить КПД и надежность приборов. Эти достижения — результат теоретических исследований процессов в мощных гиротронах, внедрения и разработки новых методов расчета их основных компонентов и развития технологии.

Теоретические исследования, проводившиеся в ИПФ РАН, были направлены на оптимизацию работы гиротронов на высоких модах резонатора и эффективное преобразование рабочей моды в волновой пучок для снижения уровня паразитного излучения в приборе и транспортировки излучения с наименьшими потерями. В настоящее время рабочей модой мегаваттного гиротрона на частоте 170 ГГц является  $TE_{25,10}$ ; эта мода посредством синтезированной трехмерной системы зеркал трансформируется в узконаправленный волновой пучок с эффективностью преобразования до 97 %.

Главные изменения в конструкции гиротронов для УТС связаны с внедрением алмазных окон с предельно низкими потерями мощности при выводе излучения и рекуперации остаточной энергии электронного пучка путем понижения потенциала коллектора. Рекуперация обеспечивает КПД прибора около 50 % и значительное снижение тепловой нагрузки коллектора.

Гиротроны ГИКОМа имеют существенно меньшие габариты, чем зарубежные аналоги, но, как правило, превосходят их по эффективности и надежности.

ГИКОМ производит также другие гирорезонансные приборы различного научного и технического применения:

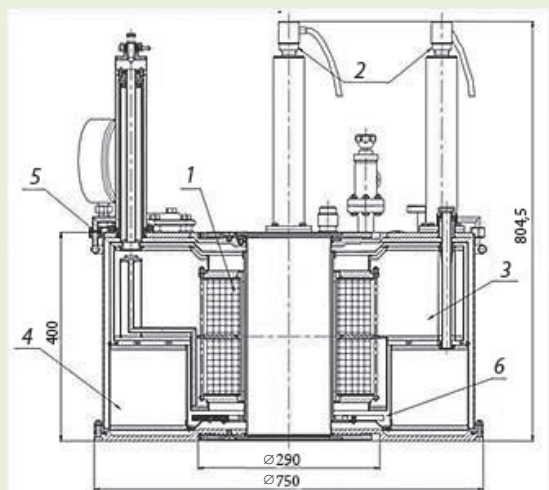
- гиротроны на частотах от 24 до 84 ГГц с мощностью излучения от нескольких киловатт до нескольких десятков киловатт для спекания нанокерамики, создания плазменных источников многозарядных ионов, получения изотопно чистых материалов и пр.;
- гиротроны длинноволновой области терагерцового диапазона для молекулярной и магнитной ядерной спектроскопии;
- усилители — гироклистроны и гиро-ЛБВ для радиолокации.

Для гиротронных комплексов, используемых на установках УТС, и для других применений НПП ГИКОМ разрабатывает и изготавливает необходимое дополнительное оборудование, включающее криомагнитные системы, линии передачи излучения, специальные источники питания и блоки управления.

В ГИКОМе созданы условия для полномасштабных испытаний гиротронов с выходной мощностью, превышающей 1 МВт. Установлено новое оборудование, включающее источник питания мощностью 3 МВт (60 кВт, 50 А) с контуром охлаждения, обеспечивающим работу мегаваттных гиротронов в течение 1000 с.

Схема и внешний вид заливного криомагнита:

- 1 — катушка из NbTi-проводника;  
2 — токовводы;  
3 — гелиевая ёмкость;  
4 — азотная ёмкость;  
5 — трубки для сбора газообразного гелия;  
6 — вакуумный объём





Для проведения испытаний гиротронов оборудовано 2 станда, еще 2 испытательных станда НИЦ «Курчатовский институт» используются в совместных работах.

Внедренная на предприятии система управления качеством соответствует международному стандарту ISO 9001. Это подтверждено международной комиссией, контролировавшей процесс и качество изготовления прототипа штатного гиротронного комплекса для установки ИТЭР.

В ГИКОме работают высококлассные специалисты из всех областей науки и техники, относящихся к теории, методам расчета и технологии производства гирорезонансных приборов. Ведущие сотрудники ГИКОма являются обладателями отечественных и международных премий в области науки и техники.

За прошедшие годы ГИКОм потерял несколько сотрудников, внесших значительный вклад в соз-



*Г.Г. Денисов*



*В.И. Курбатов*



*Е.М. Тай*

дание предприятия и организацию производства и в разные годы входивших в состав руководства: В.В. Аликаев, С.Д. Богданов, В.А. Флягин, В.И. Курбатов.

В настоящее время руководителями предприятия являются: А.Г. Литвак — президент, Е.В. Соколов — директор, члены совета — А.В. Гапонов-Грехов, Г.Г. Денисов, В.Е. Мясников и Е.М. Тай.



*Участники ежегодного российско-германского семинара «Гиротроны и ЭЦ-нагрев плазмы»*

# ПРОДУКЦИЯ НПП ГИКОМ

## Гиротроны для УТС

Нагрев плазмы гиротронами в установках УТС основан на резонансном поглощении излучения в тех зонах, где частота излучения совпадает с циклотронной частотой электронов плазмы или ее гармоникой. Для нагрева плазмы ГИКОМ изготавливает гиротроны с выходной мощностью от 0,5 до 1 МВт с длительностью непрерывной генерации до 1000 с. Частота излучения задается заказчиком, она определяется магнитным полем термоядерной установки. Гиротроны используются также для создания токов увлечения, способствующих стабилизации термоядерной плазмы и обеспечивающих работу токамака в непрерывном режиме (без таких токов режим токамака принципиально является импульсным). Каждому гиротрону придается квазиоптическая система, согласующая волновой пучок излучения гиротрона с линией передачи.

Гиротроны, изготовленные НПП ГИКОМ, были установлены на токамаках T-10 (Россия), ASDEX Upgrade и TEXTOR (Германия), FTU (Италия), D-III-D (США), TCV (Швейцария), CHS, TRIAM-1M и LHD (Япония), KSTAR (Южная Корея),

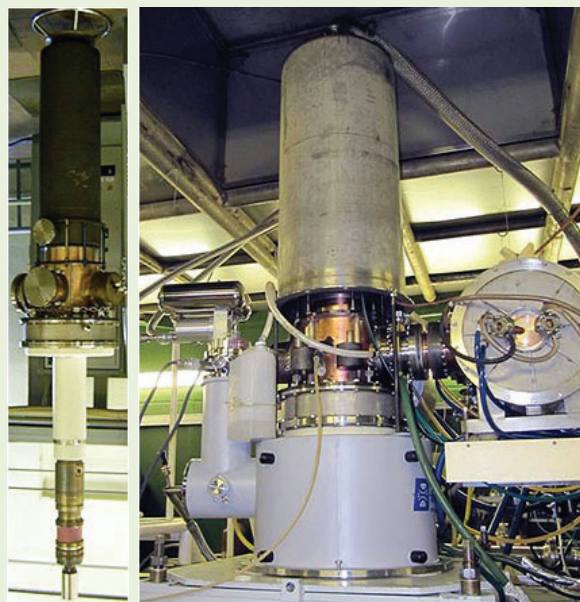


*Окно из искусственного алмаза  
для вывода энергии*

TJ II (Испания), SST-1 (Индия), HL-2A, SWIP и EAST (Китай), стеллараторах W7-AS (Германия), L-2M (Россия), Heliotron (Япония), прямой газодинамической ловушке ГДЛ (Россия). Среди них есть и гиротроны, которые можно настроить на одну из двух или нескольких рабочих частот в диапазоне 100–150 ГГц.

К настоящему времени поставлено 6 двухчастотных гиротронов, оперирующих на частотах 140 и 105 ГГц, на ASDEX Upgrade (Германия) и EAST (Китай). Непрерывно работающие мегаваттные гиротроны, изготовленные НПП ГИКОМ, используются на токамаках EAST (частота 140 ГГц, длительность 1000 с) и KSTAR (двухчастотный гиротрон на 140 и 105 ГГц с длительностью 300 с).

Все гиротроны, изготовленные после 2002 года, выполнены по схеме рекуперации. Их КПД составляет примерно 50 %. Гиротроны ГИКОМа имеют высокую надежность. Многие из них, проработавшие у заказчиков более 10 лет, имеют выходную мощность и КПД близкие к номинальным и продолжают использоваться.

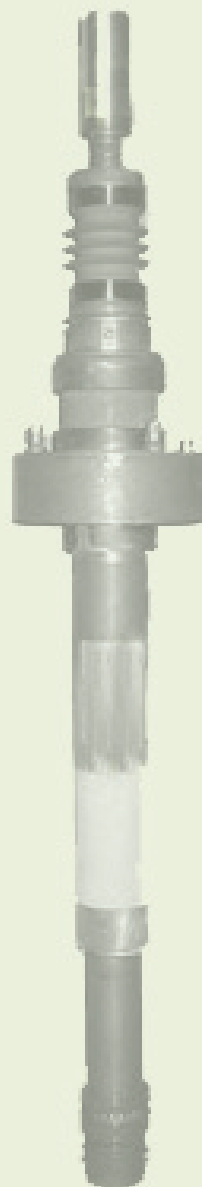


*Гиротрон для ИТЭР*



### Гиротроны НПП ГИКОМ для УТС

| Название<br>и место расположения<br>установки    | Рабочие параметры<br>гиротронов |          |          | Количество    |
|--------------------------------------------------|---------------------------------|----------|----------|---------------|
|                                                  | ГГц                             | кВт      | с        |               |
| Т-10, ИФТ НИЦ «Курчатовский<br>институт», Россия | 129                             | 700      | 0,5      | 2             |
|                                                  | 140                             | 750      | 0,5      | 1             |
|                                                  | 140                             | 1000     | 10       | 2             |
| L-2М, ИОФ РАН, Россия                            | 72/75/78                        | 800      | 0,1      | 1             |
| W7-AS, IPP, Германия                             | 140                             | 500      | 3        | 3             |
|                                                  | 140                             | 800      | 1        | 1             |
| ASDEX, IPP, Германия                             | 140                             | 500/700  | 2/1      | 4             |
|                                                  | 140/105                         | 1000/800 | 10       | 6             |
| TEXTOR, Германия                                 | 140                             | 800      | 10       | 1             |
| TJ-II(U), CIEMAT, Испания                        | 28                              | 400      | 0,1      | 1             |
|                                                  | 53,2                            | 400      | 0,3      | 2             |
|                                                  | 28                              | 500      | 0,3      | 1             |
| FTU, ENEA, Италия                                | 140                             | 500      | 0,5      | 5             |
| TCV, SPC (CRPP), Швейцария                       | 82,6                            | 500      | 2        | 7             |
| D-III D, GA, США                                 | 110                             | 1000     | 2        | 3             |
| TdeV, Канада                                     | 110                             | 400/800  | 5/2      | 2             |
| CHS, NIFS, Япония                                | 106                             | 500      | 0,1      | 1             |
|                                                  | 54,5                            | 500      | 0,1      | 1             |
| Heliotron-E, Kyoto Univ., Япония                 | 106                             | 500      | 0,1      | 1             |
|                                                  | 70                              | 500      | 0,5      | 1             |
| TRIAM-1M, Kyushi Univ., Япония                   | 170                             | 250      | 5        | 1             |
| LHD, NIFS, Япония                                | 86,2                            | 500      | 2        | 4             |
|                                                  | 84                              | 800      | 3        | 3             |
|                                                  | 84                              | 200/500  | непр./10 | 1             |
| FOM, Нидерланды                                  | 110                             | 500      | 0,2      | 1             |
| SST-1, IPR, Индия                                | 82,6                            | 200      | непр.    | 1             |
|                                                  | 42                              | 500      | 0,5      | 1             |
| HL-2A, SWIP, Китай                               | 68                              | 500      | 1,5      | 6             |
|                                                  | 140                             | 1000     | 3        | 2             |
|                                                  | 105                             | 1000     | 3        | 4             |
| SWUST, Китай                                     | 83                              | 100      | 10       | 1             |
| EAST, ASIPP, Китай                               | 140                             | 1000     | 1000     | 2             |
| KSTAR, NFRI, Южная Корея                         | 140/105                         | 950/800  | 300      | 1             |
| IN2P3, Франция                                   | 60                              | 300      | 0,1      | 1             |
| ИТЭР, Франция                                    | 170                             | 1000     | 1000     | 8 (2018–2025) |



ГИКОМ в кооперации с ИПФ РАН является одним из поставщиков гиротронов для сооружаемой во Франции международной термоядерной установки ИТЭР. Гиротронный комплекс ИТЭР должен состоять из 24 гиротронов на частоте 170 ГГц с мощностью 1 МВт, длительностью импульса 1000 с и эффективностью более 50 %. По 8 гиротронов должны быть поставлены Японией и Россией, 6 – европейским сообществом и 2 – Индией. В мае 2015 года работа российского прототипа гиротронной системы для ИТЭР в режиме, полностью соответствующем требуемой спецификации, была успешно продемонстрирована рабочей комиссии ИТЭР. Система включает в себя гиротрон, гелиевый безжидкостный сверхпроводящий магнит, дополнительные магниты и несколько источников питания, аппаратуру защиты и управления и другие вспомогательные элементы.

В 2016 году заключен контракт на поставку 8 гиротронных систем для ИТЭР.

ГИКОМ вместе с ИПФ РАН продолжают работы, направленные на дальнейшее повышение частоты, мощности и эффективности гиротронов для УТС. В экспериментах продемонстрированы возможности получения выходной мощности до 2 МВт и КПД до 60 %.

Ведутся разработки гиротронов на частотах выше 250 ГГц для демонстрационного термоядерного реактора DEMO.



*Высокоскоростное выращивание  
поликристаллических алмазных пленок*

## Технологические гиротроны и гиротронные комплексы

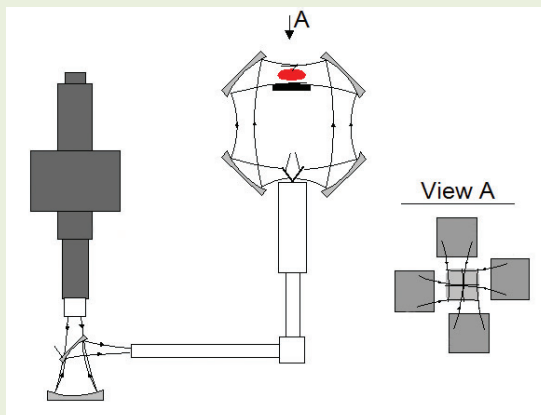
Гиротроны непрерывного действия для научных и технологических приложений («технологические гиротроны») имеют выходную мощность от нескольких киловатт до нескольких десятков киловатт в непрерывном режиме. Они работают на частотах от 24 до примерно 30 ГГц с «теплыми» соленоидами с водяным или масляным охлаждением.



*Непрерывный гиротрон  
с выводом излучения вдоль оси системы*

Для гиротронов на более высоких частотах, от 30 до 85 ГГц, магнитное поле создается сверхпроводящими соленоидами. На основе постоянного магнита университета Фукуи (Япония) ГИКОМом совместно с этим университетом был изготовлен и испытан гиротрон, работающий на 2, 3 и 4-й гармониках гирочастоты с рабочими частотами и мощностями 85 ГГц / 2,5 кВт, 112 ГГц / 0,5 кВт и 138 ГГц / 0,5 кВт соответственно.

Мощное коротковолновое излучение позволяет осуществить быстрый нагрев тугоплавких материалов вплоть до температуры плавления.





С использованием излучения гиротронов производится спекание нанокерамик, отжиг материалов. При воздействии на газовые среды излучение гиротронов может быть сфокусировано с размером фокального пятна порядка длины волны. Оно используется для создания и поддержания газового разряда с высокой концентрацией и температурой электронов. В плазме такого разряда с высокой эффективностью происходит формирование интенсивных пучков многозарядных ионов, осаждение алмазных пленок и выращивание алмазных пластин. Проводятся также эксперименты по получению нейтронных пучков из микроволнового разряда в дейтерии и по созданию эффективных источников экстремального ультрафиолетового излучения.

Технологические гиротронные комплексы являются установками, полностью оборудованными для конкретных применений. В их составе: гиротрон, линия передачи, рабочая камера, система охлаждения, контрольная аппаратура и система управления.

Технологические гиротроны и гиротронные комплексы, изготовленные ГИКОМом, установлены в лабораториях США, Германии, Японии, Китая, Франции и России.



*Установка с гиротроном до 30 кВт*



*3-кВт установка для экспериментов в области СВЧ-технологий*



*Образцы спекаемой керамики*

### **Субтерагерцовые и терагерцовые гиротроны**

Гиротроны на частотах порядка и выше 300 ГГц занимают самую высокочастотную область диапазона мощных электронно-вакуумных генераторов. Для микроволновой спектроскопии и динамической поляризации ядер в системах ядерного магнитного резонанса используется непрерывное излучение гиротронов на частотах 260 и 300 ГГц. Их максимальная выходная мощность составляет от 1 до 2 кВт.

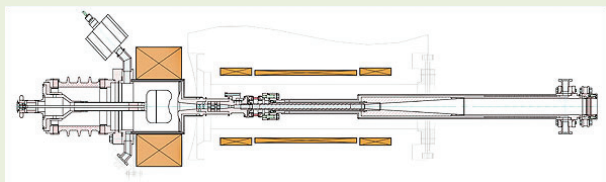
Для микроволновой диагностики, в частности диагностики термоядерной плазмы, используются более высокочастотные гиротроны, работающие в импульсном режиме с длительностью излучения порядка 10 нс. Это либо гиротроны на гармониках гирочастоты (3-й и более высоких) со сверхпроводящими соленоидами, либо компактные гиротроны с импульсными магнитными полями. Наиболее высокочастотные гиротроны, производимые ГИКОМом, работают на частоте 1000 ГГц.

## Параметры усилителей

| Характеристика                   | Гироклистрон | Гироклистрон | Гиро-ЛБВ | Гиро-ЛБВ |
|----------------------------------|--------------|--------------|----------|----------|
| Центральная частота, ГГц         | 34           | 96           | 34,5     | 34,5     |
| Выходная мощность, кВт           | 500          | 340          | 120      | 8        |
| КПД, %                           | 25           | 24           | 33       | 30       |
| Ширина полосы частот 3 дБ, ГГц   | 0,18         | 0,36         | 2        | 2        |
| Коэффициент усиления, дБ         | 20           | 23           | 20       | 25       |
| Длительность импульса, мкс       | 100          | 100          | 100      | непр.    |
| Частота следования импульсов, Гц | 1000         | 5            | 10       | —        |
| Напряжение, кВ                   | 70           | 70           | 40+20    | 20+20    |

### Гироклистроны и гиро-ЛБВ

ГИКОМом в кооперации с ИПФ РАН разработаны усилительные гироклистроны и гиро-ЛБВ для радарных систем дальнего обнаружения. Гироклистроны отличаются большой мощностью излучения при сравнительно малой полосе перестройки частоты. В последние годы разработаны гиро-ЛБВ, имеющие диапазон перестройки частоты до 10 %, значительно больший, чем у гиротронов.



*Гиро-ЛБВ. Общий вид и схема*

### Линии передачи

Большая мощность и высокая частота излучения микроволновых источников обуславливают необходимость применения многомодовых (сверхразмерных) электродинамических систем. Наиболее мощные СВЧ-источники (гиротроны, генераторы с релятивистскими электронными

пучками) работают, как правило, на очень высоких модах круглого волновода. Соответственно, возникает проблема преобразования этих мод в волны простейшей структуры, удобные для последующей транспортировки и использования. В более общей постановке задача может быть сформулирована как синтез трехмерных волноведущих или антенных систем, преобразующих исходное векторное поле в требуемое.

В ГИКОМе (совместно с ИПФ РАН) развиты оригинальные методы расчета многомодовых систем и анализа данных измерений в них, в частности:

- метод измерения пространственных структур волновых потоков,
- метод восстановления фазовых фронтов на основе амплитудных распределений,
- метод синтеза зеркальных антенн,
- методы анализа и синтеза многомодовых систем на основе скалярных и векторных интегральных уравнений.

Поскольку для транспортировки волновых потоков большой мощности используются волноводы широкого сечения — закрытые сверхразмерные или открытые зеркальные, возникла необходимость в разработке для таких трактов элементов сопряжения, управления и измерения. К числу таких элементов, разработанных в ГИКОМе, принадлежат:

- направленные квазиоптические и волноводные ответвители,
- зеркальные и волноводные преобразователи структур полей,

- делители и сумматоры волновых потоков,
- мультиплексеры широкополосных сигналов,
- высоковольтные разрывы трактов,
- универсальные поляризаторы,
- управляемые переключатели волновых потоков,
- пассивные и активные компрессоры микро-волновых импульсов,
- поглощающие нагрузки для мегаваттного миллиметрового излучения в непрерывном режиме работы.

Благодаря разработке новых компонентов и оптимальным методам диагностики с использо-

ванием анализа модового состава излучения созданы линии передачи мощного СВЧ-излучения (или их части) различных комплексов УТС, ускорителей, технологических установок для СВЧ-обработки материалов и выращивания алмазных пленок по CVD-технологии, источников многозарядных ионов, радарных систем, сложных мазеров на свободных электронах.

За 25 лет разработаны и поставлены заказчику десятки линий передачи, сотни компонентов.

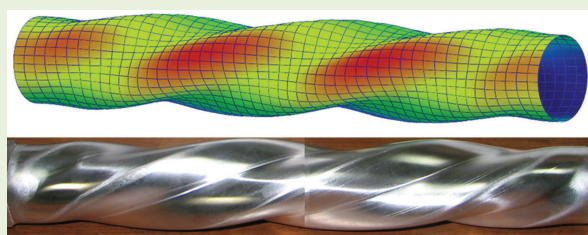
*Примеры, показанные ниже, иллюстрируют лишь очень малую часть этой деятельности.*

### Компоненты мегаваттных линий передачи



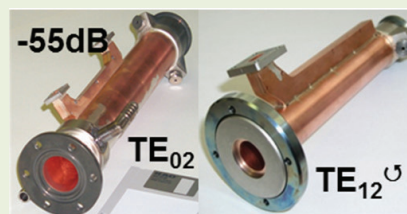
*СВЧ-тракт (170 ГГц / 1,5 МВт)  
с волноводным уголком  
и направленными ответвителями*

### Синтезированные волноводные преобразователи

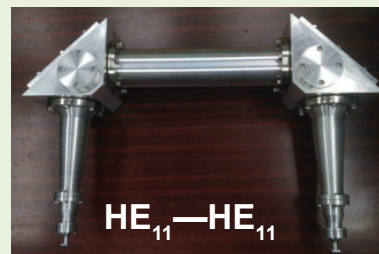
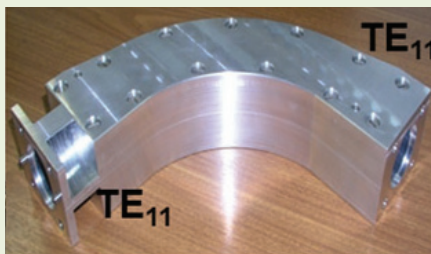


$TM_{01} \Rightarrow TE_{31}$  (внутренняя поверхность)

### Направленные ответвители

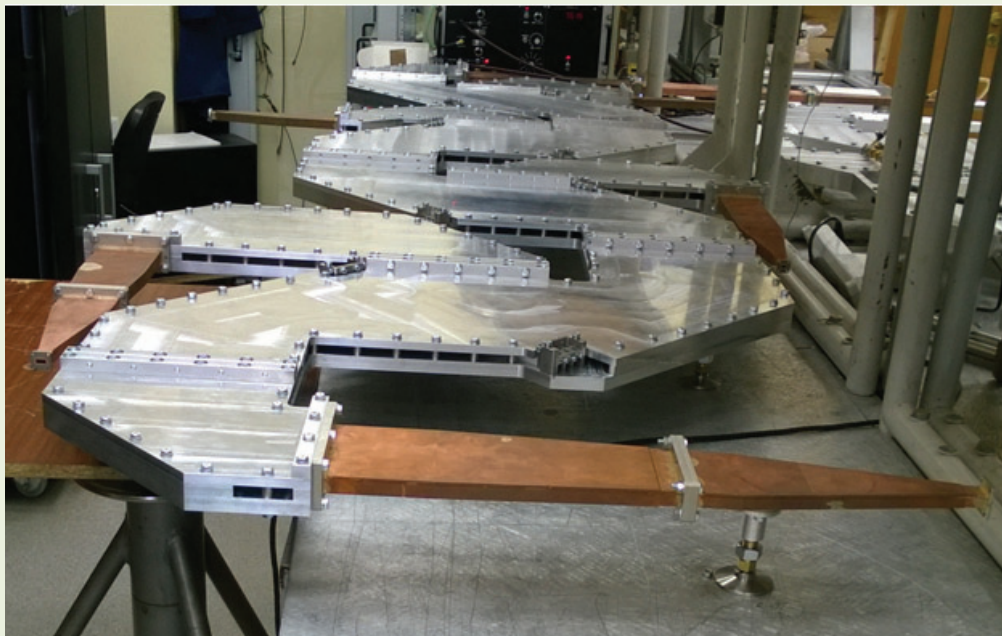


### Эффективные широкополосные повороты трактов



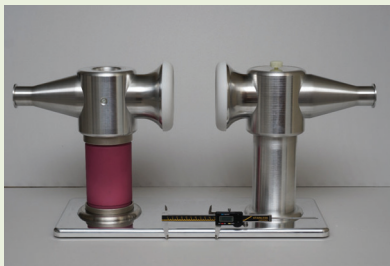


### Пятиканальный мультиплексер

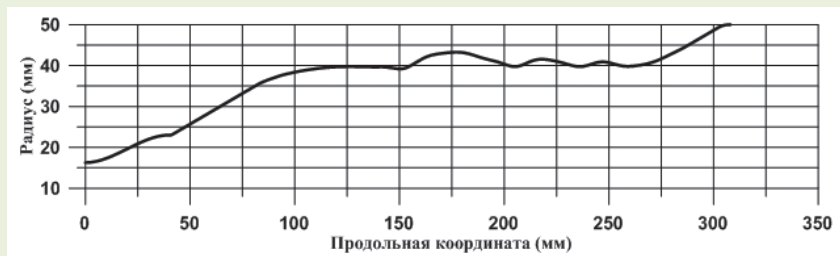


### Изолятор на 80 кВ с коэффициентом передачи волны $TE_{01}$ — 99 %

Изолятор является элементом линии передачи СВЧ-энергии на волне  $TE_{01}$  с частотой 28 ГГц.



Общий вид изолятора.  
Расстояние между рупорами 100 мм



Профиль внутренней поверхности рупора

# ГИКОМ ПОЗДРАВЛЯЮТ

## ПОЗДРАВЛЕНИЯ И НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ЛИЧНОГО СВОЙСТВА ПО СЛУЧАЮ 25-ЛЕТНЕЙ ГОДОВЩИНЫ КОМПАНИИ ГИКОМ

*Фолькер Эркманн*

от лица группы стелларатора W7-AS в IPP (Гархинг, Германия)

Юбилей — это всегда возможность оглянуться назад, вспомнить и оценить идеи и побуждения первых лет, проблемы, которые вставали на пути и были преодолены, взлёты и падения. Это также возможность подытожить все достижения, наметить новые цели и построить новые смелые планы. Прослеживая 25-летнюю историю ГИКОМа и сравнивая цели, поставленные тогда, и реальные достижения, ставшие результатом реализации долговременной программы развития, можно сделать следующий знаменательный вывод: разработка мощных источников СВЧ-излучения и соответствующие технологические наработки в России имели решающее значение для концепции использования электронно-циклотронного резонансного нагрева (ЭЦРН) в качестве системы нагрева мощностью в несколько мегаватт для исследований в области термоядерного синтеза и оказали большое влияние на понимание физики ядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы. Остановимся на экспериментах на стеллараторе W7-AS, принимая во внимание, что ЭЦРН имеет особое значение для стеллараторов, поскольку обеспечивает бестоковое производство плазмы и ее нагрев, стартуя от нейтрального газа.

**Первые годы.** ЭЦРН рассматривался как один из наиболее перспективных и привлекательных способов нагрева плазмы до температур синтеза, а теория взаимодействия волн и частиц была хорошо разработана уже в 1960–70-х годах. Однако применение мощного СВЧ-излучения для ЭЦРН и электронно-циклотронных токов увлечения (ЭЦТУ) тесно связано с разработкой гиротронов. С середины по конец 1980-х годов экспериментаторам остро не хватало источников СВЧ-излучения с достаточно высокими частотой и мощностью. Магнитное поле больших комплексов ядерного синтеза приходилось понижать, чтобы оно соответствовало усло-

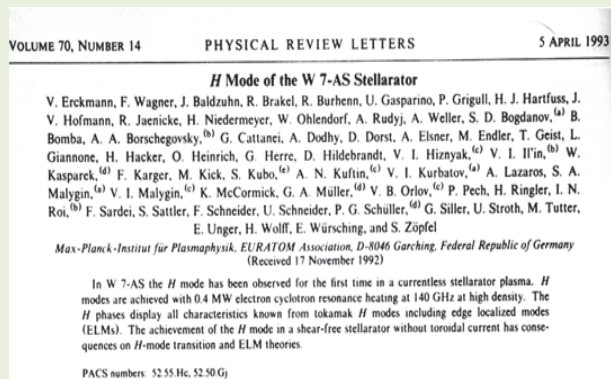
виям резонанса на доступных частотах источника. На передний край технологических разработок в конце 1980-х годов вышли гиротроны на частотах 60–70 ГГц, обычно с уровнем мощности на выходе каждого устройства 0,2 МВт. Например, система ЭЦРН мощностью 1 МВт на W7-AS состояла из пяти гиротронов, произведённых в США и генерировавших каждый 0,2 МВт мощности в трёхсекундных импульсах с частотой 70 ГГц. На тот момент системы нагрева, составлявшие гиротронам конкуренцию, например инжекция потока нейтральных частиц и нагрев методом ионно-циклотронного резонанса, уже обеспечивали существенно большую мощность, удовлетворяя потребности крупных устройств ядерного синтеза в системах нагрева на уровне нескольких мегаватт. Технология СВЧ-источников основывалась на генерации низших осесимметричных мод с осевым выводом ВЧ-мощности. Любые попытки продвинуть технологию в область более высоких частот и мощностей не имели успеха, и стало очевидно, что необходим другой подход.

**Прорыв.** Институт прикладной физики (ИПФ) в Нижнем Новгороде, как научный центр, занимающийся теорией и технологическим применением мощного СВЧ-излучения, и компания «Салют» — производственная площадка для изготовления опытных образцов — разработали новую концепцию источника излучения с использованием высших мод, встроенных оптических преобразователей мод и с разделением пучков электронов и СВЧ-излучения. Каждая из этих идей была новаторской сама по себе, а их сочетание стало результатом тщательного анализа и глубочайшего понимания как теоретических предпосылок, так и технологических требований. Институт атомной энергии (ИАЭ) им. И.В. Курчатова, ныне Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», в Москве

был одним из мощных движителей разработок источников СВЧ-излучения в России в область более высоких мощности и частоты. В ИАЭ работал токамак T-10, оснащённый мощной системой ЭЦРН. После опубликования первых отчётов о результатах, полученных на T-10 методом ЭЦРН с помощью гиротронов ИПФ, стало ясно, что, используя новый подход, можно снять упомянутые выше ограничения.

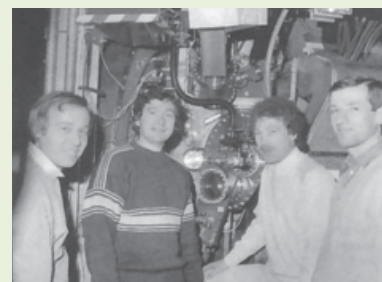
**Гиротроны ГИКОМа для W7-AS:** IPP обратился к исследовательским институтам в России, которые уже работали совместно с ним в области ядерно-магнитного синтеза, и предложил им использовать российский 140-гигагерцовый гиротрон на W7-AS для физических экспериментов. ИПФ РАН согласился взять на себя ответственность за реализацию экспериментальной программы по ЭЦРН на 140 ГГц и предоставил опытный образец гиротрона, генерирующего мощность 0,5 МВт в импульсах длиной 0,5 с.

Совместные эксперименты по ЭЦРН в W7-AS начались в 1992 г., и в них впервые был использован мощный российский гиротрон на 140 ГГц. Плотность плазмы в W7-AS удалось увеличить, доведя её до плотности отсечки  $1,2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$  на частоте 140 ГГц, т. е. двойной плотности отсечки использовавшейся ранее системы ЭЦРН на 70 ГГц. В результате работы в этом режиме с высокой плотностью была открыта H-мода стелларатора. Такой модифицированный режим удержания плазмы был хорошо известен по опыту работы с токамаком, но впервые отмечен в стеллараторе, что стало вехой в физике стеллараторов. Одним из важнейших параметров (помимо прочих) перехода к спонтанной H-моды был режим работы в условиях высокой плотности, достижимый на 140 ГГц с порогом плотности около  $0,6 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Научная группа, объединившая исследователей из IPP, ИПФ, ИАЭ и IPF-Stuttgart, опубликовала сообщение о результатах экспериментов (аннотация приведена на рисунке).



Управлять разрядом на H-моды было нелегко, поскольку ВЧ-мощность 0,4 МВт была предельной, а длительность импульса СВЧ-излучения (0,5 с) едва достаточной для развития H-моды. Для изучения и выяснения физики H-моды предпочтительнее были еще более высокая мощность и более длительные импульсы ЭЦРН, сравнимые с длительностью плоской вершины импульса W7-AS (3 с). Для этого IPP вместе с итальянской Национальной лабораторией ядерного синтеза ENEA-Frascati уже в 1992 г. объявил торги на закупку гиротронов (три из которых предназначались для IPP) с той же удельной выходной мощностью, но увеличенной длительностью импульса до 3 с. Только что созданная российская компания ГИКОМ выиграла торги, и IPP подписал с ней контракт в начале 1993 г. Три 70-гигагерцовых гиротрона были постепенно заменены на 140-гигагерцовые гиротроны ГИКОМа, установка которых была завершена в 1997 г. В результате общая мощность ЭЦРН с помощью установленных в W7-AS ламп была доведена до 2,3 МВт при длительности импульса 3 с.

Научное сотрудничество с исследовательскими лабораториями ИПФ и ИАЭ становилось всё интенсивнее, и в последующем сильная российская группа участвовала в физических экспериментах на W7-AS. В журнале IPP «Impulse» сообщалось о расширении германо-российского сотрудничества.



Мартовский номер журнала «Impulse» (1993). Слева: фото группы ЭЦРН в зале управления W7-AS. Заголовок: «Сотрудничество IPP с Россией будет продолжено». Справа: на фото на стр. 4 того же номера — коллеги из ИПФ, «Салюта», IPF и IPP перед портом ЭЦРН установки W7-AS

За время установки гиротронов и постепенно-го увеличения мощности ЭЦРН на частоте 140 ГГц были получены важные научные результаты, имевшие фундаментальное значение для исследования стеллараторов: удалось обеспечить управление плотностью плазмы, разогреваемой с помощью инжекции потока нейтральных частиц, добавив ЭЦРН



приблизительно той же мощности; эксперименты с тепловыми волнами позволили лучше понять локальную электронную теплопроводность (FED 1995); улучшение удержания центральной части плазмы было объяснено поведением электронной компоненты при сравнении нагрева вблизи оси и на удалении от неё; нагрев и токи увлечения при преобразовании мод были впервые продемонстрированы экспериментально (PRL 1997); и, последнее (отнюдь не по значимости!), гиротроны были успешно применены для коллективного томсоновского рассеяния (PPCF 1997), и была выявлена МГД-турбулентность (NF 1998). В экспериментальных кампаниях принимала участие сильная команда российских специалистов из Нижнего Новгорода и Москвы. Квартира на Римерфельдринг в Гархинге, где останавливались учёные из России, скоро получила название «русской квартиры», и в ней часто собирались, чтобы обсудить физические результаты и разработать новые предложения, пользуясь радушным гостеприимством российских коллег. Исследователи из IPF-Stuttgart жили неподалёку, в «штутгартской квартире», и кабачок на открытом воздухе в Гархинге, расположенный в двух шагах от обеих квартир, оказался идеальным местом для проведения совещаний и обсуждения новых идей.

Доставка и запуск гиротронов ГИКОМа в IPP нередко вызывали головную боль у начальства как в IPP, так и в ИПФ. Заметьте, что российские гиротроны должны были работать в британских сверхпроводящих магнитах с питанием от германских модуляторов и с германскими системами передачи излучения, разработанными в IPF-Stuttgart. Наконец, предполагалось, что всё это разнородное «железо», исключительно в опытных образцах, будет работать с источником питания IPP и управляться с помощью систем безопасности установки W7-AS. Интереснейшим опытом оказалось взаимодействие с германскими властями, чтобы получить разрешение на использование гиротронов и периферийных систем, например калориметрических нагрузок и линий передачи. Формальных требований не существовало, поскольку ни частота, ни мощность, ни длина импульса не относились к диапазонам, которые предписывались общими телекоммуникационными стандартами Германии. Следует воздать должное способностям групп, принимавших участие в исследованиях, находить творческие решения, поддержке, оказанной руководителями как с политиче-

ской, так и с научной стороны, и доброй воле всех задействованных административных органов, что привело к успеху всего этого проекта.

Гиротроны ведут себя почти как люди, и относиться к ним надо соответственно. Три гикомовских гиротрона были названы в честь древнегреческих героев: «Геркулес» (сер. №001), «Икар» (сер. №002) и «Дедал» (сер. №003). Как известно, жизнь этих персонажей, хотя и наделённых недюжинными силами и талантами, была не столь проста. В конечном итоге все они завоевали бессмертную славу: Геркулес своей силой, Икар — тем, что взлетел выше всех, Дедал — своим искусством изобретателя. Что же до трёх гиротронов ГИКОМа, автор уверен, что когда-нибудь они также займут почётное место на Олимпе гиротронов-героев высокой мощности.

W7-AS был выведен из эксплуатации в июле 2002 г. Два из трёх гиротронов ГИКОМа были переданы на AUG, где они находятся до сих пор в работоспособном состоянии. Третий гиротрон помещён в Зал славы гиротронов в IPP-Greifswald.



*Зал славы гиротронов в IPP-Greifswald. Гиротроны, слева направо: VARIAN, 20 ГГц / 0,2 MBm, непр. режим; ГИКОМ, 140 ГГц / 0,5 MBm / 3 с; VARIAN, 70 ГГц / 0,2 MBm / 0,1 с; «Салют», 140 ГГц / 0,8 MBm / 1 с*

Мы поздравляем ГИКОМ с достижениями, ставшими вехами в развитии технологии гиротронов и ЭЦРН и внесшими существенный вклад в понимание физики плазмы ядерного синтеза. Желаем ему процветания и успеха в разработке нового поколения гиротронов с высоким КПД, генерирующих мощность 2 МВт в непрерывном режиме в широком диапазоне мощностей в течение ещё 25 лет. На Олимпе есть место для новых героев.

## НА 25-Ю ГОДОВЩИНУ КОМПАНИИ ГИКОМ

Джон Лор

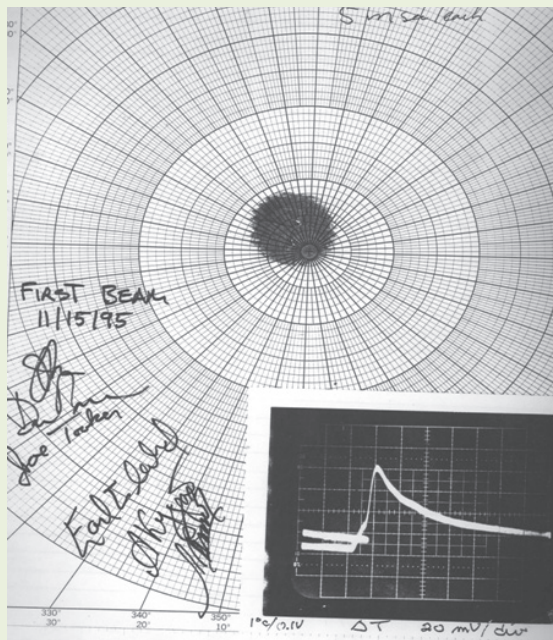
DIII-D National Fusion Facility, General Atomics, Сан-Диего, Калифорния, США

В июне 1988 г. DIII-D сообщил о первом случае наблюдения удержания H-моды в токамаке с использованием только электронно-циклотронного нагрева в качестве вспомогательного источника питания. Общая инжектированная высокочастотная мощность комплекса гиротронных ламп, генерировавших каждая по 200 кВт на частоте 60 ГГц, составляла до 0,9 МВт (на второй гармонике циклотронной частоты для магнитного поля 1,07 Тл). Длина импульса гиротрона составляла около 600 мс. Сообщение заканчивалось словами: «Физика H-моды и, в частности, изменение плотности плазмы в целом слабо зависит от метода нагрева». Признавалось, что нагрев с помощью СВЧ будет играть важную роль в работе токамаков в будущем, и поскольку более современные токамаки будут работать с более интенсивными магнитными полями, а H-моду нужно поддерживать в течение очень долгого времени, понадобится абсолютно новый класс гиротронов со значительно улучшенными характеристиками. Однако насколько получится расширить пределы характеристик гиротронов, оставалось неочевидным.

В рамках программы DIII-D было принято решение о приобретении гиротронов более высокой частоты, в частности 110 ГГц при максимальном тороидальном магнитном поле 2,1 Тл. В качестве желательной выходной мощности было выбрано красивое круглое число — 1 МВт. Стало понятно, что главной ахиллесовой пятой гиротронов с намеченными параметрами станет выходное окно. Плотность мощности в центре гауссова пучка слишком высока для материалов, из которых можно было бы изготовить окно. Поэтому, основываясь на статье Г. Денисова, в которой сообщалось, что высокочастотный пучок практически любого профиля может быть преобразован в пучок практически любого другого профиля с помощью отражения от соответствующим образом подобранных фазосдвигающих зеркальных поверхностей, производители решили распределить высокочастотный пучок на выходе по поверхности окна, чтобы затем, после прохождения пучка через окно, вернуть его обратно к гауссову типу. Хотя никому из производителей



Приезд в Институт прикладной физики и ГИКОМ до начала глобального потепления



Первый ВЧ-пучок гиротрона «Катя» в DIII-D

не удалось создать мегаваттный гиротрон со столь высокими рабочими частотами и длительностями импульса в несколько секунд, сапфировое окно с охлаждением поверхности было успешно испытано в DIII-D в составе гиротрона на 500 кВт/100 ГГц с электронной пушкой триодного типа и распределённым гауссовым пучком высокочастотного излучения. Хладагентом в этом гиротронном окне был хлорфторуглерод FC-75, и он стал самой серьёзной проблемой при работе в режиме высокой мощности и большой длительности импульса. FC-75 слабо поглощает высокочастотное излучение, но дело в том, что если один из сапфировых дисков треснет, произойдёт загрязнение или токамака, или гиротрона фтороводородной кислотой, что может стать «поцелуем смерти» для токамака, не говоря уже о гиротроне. В волноводной линии на стороне токамака был установлен быстродействующий затвор. Тем не менее, оглядываясь назад, следует сказать, что от такого решения проблемы окна, вероятно, следовало отказаться. Триодные пушки дают нам возможность управления электронным пучком, но для них требуется дополнительная электронная схема, которая находится под высоким напряжением в масляном танке, и каждый раз искрение в цепи питания анода приводило к повреждению компонентов, погружаемых в масло. Работа гиротронов производила очень хорошее впечатление, но оставалось несколько проблем, которые необходимо было решить, чтобы они стали «рабочими лошадками» нагрева и токов увлечения при ядерном синтезе, не говоря уже о достижении мощности в 1 МВт при полезных длительностях импульса.

В 1992 г. Институт прикладной физики Российской академии наук учредил коммерческое пред-

приятие, вполне в духе изменившихся отношений между Уолл-Стрит и новой Российской Федерацией. Эта компания назвалась «ГИКОМ» и первой разработала гиротрон на 1 МВт / 110 ГГц в импульсах достаточной длительности для исследований ядерного синтеза. Лампа была оснащена борнитридным выходным окном с охлаждением по краю, распределённым высокочастотным пучком, простой пушкой диодного типа и предельным значением длительности импульса при полной мощности в 2 с. Относительная простота этой лампы была её сильной стороной, и гиротрон работал прекрасно.

Многие из технических проблем, присущих мощным длинноимпульсным гиротронам, упомянутые выше, по всей видимости, были решены, и руководство программы DIII-D дало разрешение на покупку одного из этих гиротронов. В процессе переговоров о спецификациях, цене гиротрона и его доставке играли свою роль политика, путешествия с приключениями, кулинарные чудеса, чуть-чуть водки время от времени и закрепление дружеских отношений, которые не потеряли прочности вплоть до нынешнего юбилея. Науке известно, что гиротроны не генерируют СВЧ-излучение при температурах ниже минус 40 °С. Несмотря на это, привыкшие к теплу парни с калифорнийского пляжа отправились в Нижний Новгород, и контракт был подписан. В 1995 г. первый гиротрон типа «Кентавр» был доставлен в Сан-Диего, где электроны могут вырабатывать микроволны даже зимой.

«Кентавру» нужно было имя, и его нарекли «Катей» — официально в честь знаменитой ракетной установки «Катюша», но, возможно, в честь русской секретарши в офисе проекта ИТЭР в Сан-Диего. Точно не известно.

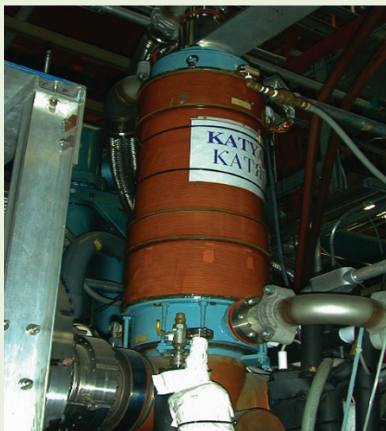


*«Катюша» и «студебеккер»*

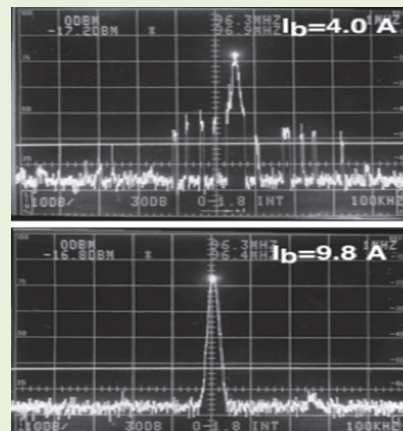
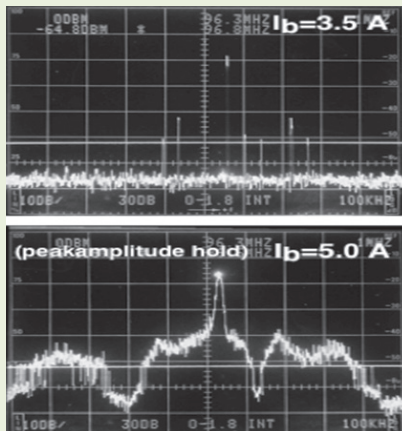


*Катюша и улыбка*





«Катя» была симпатичной дамой с большими недостатками. Настоящая кентавриха — энергичная, мощная, с длительностью импульса, достаточной для ядерного синтеза. Но не без блох, а чтобы вывести блох, понадобилось время



На этих осциллограммах показана динамика паразитного излучения на частоте около 100 МГц в зависимости от тока электронного пучка гиротрона в полулогарифмическом масштабе. Возможно, это вызвано отражением электронов в гиротроне. Схожие проблемы продолжают одолевать производителей гиротронов даже в день двадцатипятилетия ГИКОМа, по мере продвижения к большим значениям выходной ВЧ-мощности и КПД

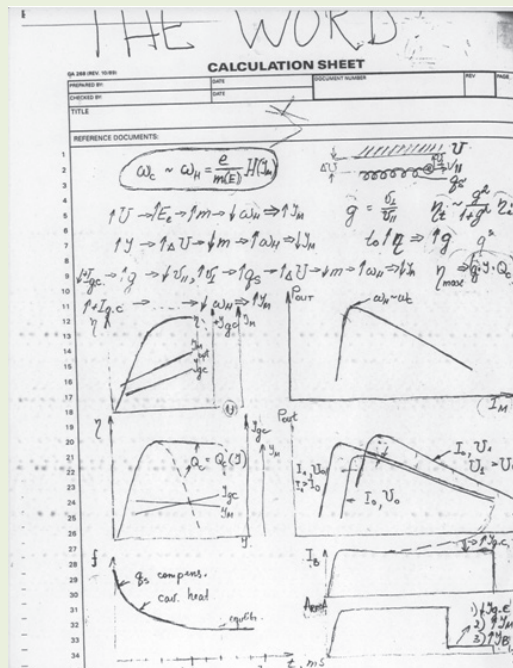
В конечном итоге с паразитным излучением «Кати», заметной величины в несколько киловатт, удалось справиться с помощью экранирования цепей с пониженным сопротивлением и некоторого количества водки время от времени, эффект от которой был лучше экранирования, но не так хорош, как контуры с пониженным сопротивлением. Специалисты ГИКОМа прибыли в Сан-Диего для участия в установке, сдаче в эксплуатацию и отладке миледи «Кати». Леонид Попов дал ряд рабочих наставлений, очень подробно объяснив, как именно нужно себя вести с этой русской красавицей. Когда в DIII-D прибыли ещё два гиротрона, «Борис» и «Наташа», проданные круглым путём через Канаду, «слову» от Леонида вняли и они.

«Катя» работала в программе DIII-D 9 лет, «Борис» и «Наташа» — по 4 года. За это время были проведены эксперименты по измерению КПД токов увлечения, профилей введения мощности, передачи излучения, порогов H-моды и т.д.

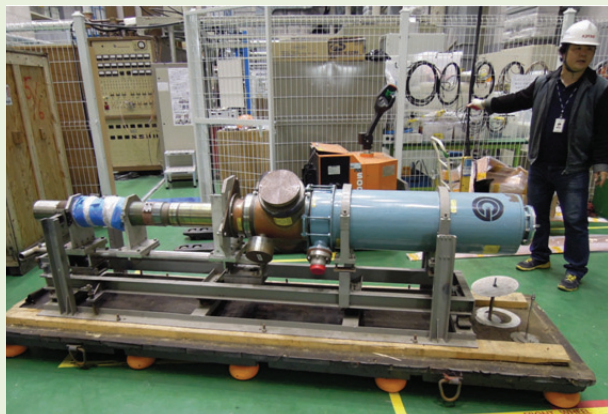
В конечном итоге в «Наташе» образовалась внутренняя течь в системе водоснабжения. Её борнитридное окно, однако, сняли и использовали в проекте НАСА, в котором пытались запускать спутники на околоземную орбиту с помощью пучка, излучаемого с поверхности Земли.

«Катю» и «Бориса», предельной длительностью импульса которых были 2 с, с почестями про-

дили на пенсию, и на установке DIII-D их сменили гиротроны с более длинными импульсами и только что разработанными выходными окнами из CVD-алмаза. Они могли пропускать гауссов пучок напрямую, без необходимости преобразовывать



«Слово» от Леонида — результат долгого общения с гиротронами



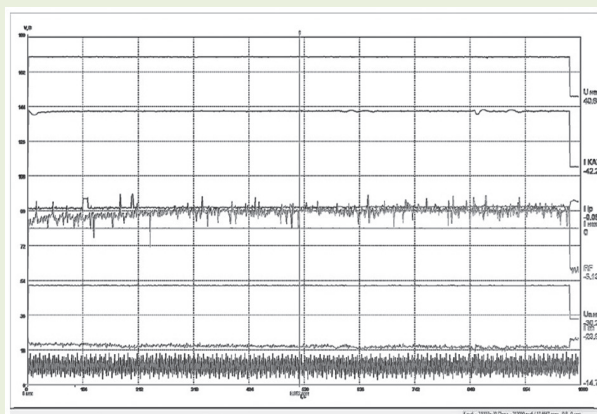
*«Катю» привезли на KSTAR и немедленно установили туда, где она будет обеспечивать пробой плазмы*

распределённый пучок обратно к гауссовой форме, и, будучи оснащены водяным охлаждением по краю, были способны работать в непрерывном режиме. Впрочем, как «Катя», так и «Борис» по-прежнему были способны выполнять важнейшую задачу запуска разряда в сверхпроводящих токамаках, и чтобы не списывать старых друзей со счетов совсем, их отправили на токамак KSTAR в Южную Корею, где они производят мощность, обеспечивающую пробой плазмы, и соответственно работу установки KSTAR.

И гиротрон, и токамак были изобретены в России, и нет ничего удивительного в том, что именно эти два устройства сыграли решающую роль в исследованиях магнитного синтеза в мировом масштабе. «Катя», «Борис» и «Наташа» положили начало целой серии счастливых гиротронных историй, созданных ГИКОМом. ГИКОМ постоянно сотрудни-



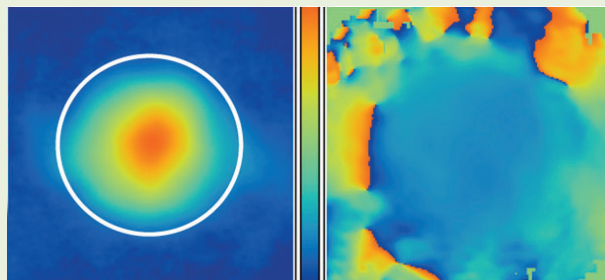
*Борнитридное выходное окно «Наташи» с тенью уширенного ВЧ-пучка. Можно поиграть в фазовую игру Григория Денисова, опознавая животное по силуэту и превращая его в другое животное с помощью фазосдвигающих зеркал*



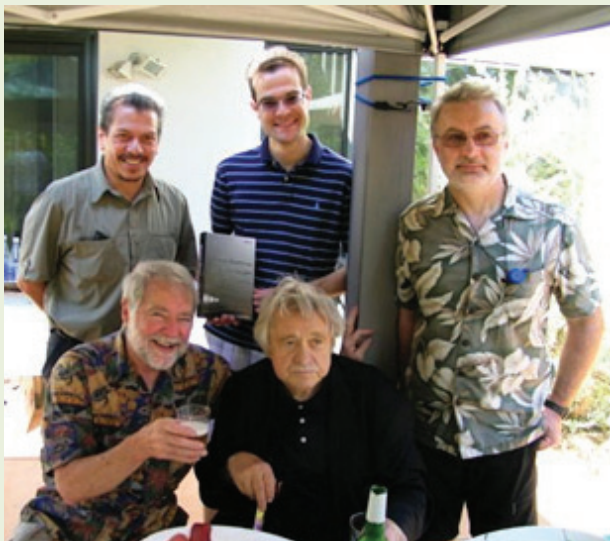
*Ось времени ВЧ-импульса длительностью 1000 с и мощностью 1 МВт, полученного с помощью гиротрона ГИКОМа для ИТЭР*

чает с научными и технологическими организациями Российской академии наук, и в его структуру входят важный филиал в Курчатовском институте в Москве, а также московский офис. ГИКОМу первому удалось выполнить требования ИТЭР к фабричным приёмочным испытаниям, представив гиротронную лампу, работающую на 170 ГГц с импульсами длиной 1000 с, мощностью 1 МВт и чистотой моды  $HE_{1,1}$  97 %, и продемонстрировав таким образом, что исходные требования ИТЭР, которые некогда считались чуть ли не недостижимыми в принципе, в конечном итоге оказались выполнимыми.

Гиротроны ГИКОМа работают во многих крупнейших лабораториях, занимающихся исследованиями в области ядерного синтеза во всем мире, и в частности вносят большой вклад в дерзком проекте ИТЭР. Значимость эпохальных новаций сотрудников ГИКОМа и ИПФ РАН в сфере гиротронных технологий признаётся во всём мире: от тонкостей создания

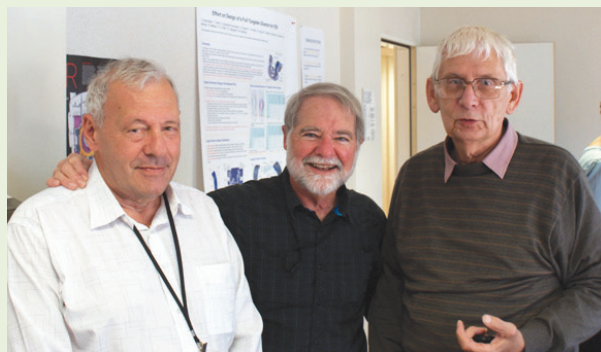


*Профиль мощности ВЧ-пучка в вакууме (слева), гауссов фазовый фронт (справа). Впечатляющее достижение, выполняющее требования ИТЭР в ходе фабричных приёмочных испытаний*



*Группе ЭЦРН DIII-D повезло: они работали в тесном контакте с членами российской группы, которые придумали и сделали первые гиротроны и изучали физические явления при их работе. На снимке: проф. Шулим Цимринг на праздновании его 90-летия в Сан-Диего, где члены группы ЭЦРН DIII-D вместе с семьёй и друзьями Шулима Ефимовича чествовали этого знаменитого пионера своей отрасли.*

гофрированного излучателя и длинноимпульсной нагрузки для полного уровня мощности до производства качественных дисков для высокочастотных окон из CVD-алмаза. Кроме своей научной и инженерной деятельности, ГИКОМ выступает спонсором одной из самых приятных и продуктивных научно-технологических конференций — «Strong Microwaves in Plasmas,» теперь переименованной в «Strong Microwaves: Sources and Applications». А ещё ГИКОМ поддерживает разнообразные куль-



*Леонид Попов, Джон Лор и Вадим Мясников на совещании по итоговой оценке проекта ИТЭР, на котором сообщалось о выполнении всех требований ИТЭР к спецификациям гиротронов*

турные начинания, в частности музыкальные, не говоря уже о тесном сотрудничестве с университетским сообществом Нижнего Новгорода, в рамках которого предоставляются преподаватели и площади для обучения студентов. И наконец, в продолжение рассказа о чередке приоритетов считается, что именно с помощью СВЧ-систем ГИКОМа миллиметрового диапазона длин волн было впервые получено изображение человека с собакой на другом берегу Оки.

Мы с удовольствием работали и работаем с ГИКОМом, приветствуем достижения этой замечательной компании и отдаём должное опыту ее высококлассных специалистов, заслуживших мировое признание.

Поздравляем вас с 25-летней годовщиной, и примите пожелания всего самого наилучшего в будущем от ваших друзей и коллег из DIII-D.



## ГИКОМ И ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫЙ НАГРЕВ НА УСТАНОВКЕ ASDEX UPGRADE

*Группа ЭЦРН-установки ASDEX Upgrade, (Гархинг, Германия)*

В конце 1989 г. в IPP было принято решение об оснащении новой, ещё недостроенной на тот момент установки ASDEX Upgrade системой электронно-циклотронного резонансного нагрева (ЭЦРН) высокой мощности. Это решение основывалось на успешном применении таких систем нагрева на стеллараторе W7-AS и токамаке T-10. В 1990 г. на конференции в Суздале Институт прикладной физики из города Горького (ныне Нижнего Новгорода) предложил применить для нашей установки 140-гигагерцовый российский гиротрон, после чего в 1991 г. началось сотрудничество ИПФ и IPP. Ещё до ввода ASDEX Upgrade в строй российский гиротрон был в первый раз запущен в составе стелларатора W7-AS. Успех этих экспериментов повлёк за собой продолжительное сотрудничество с целью улучшения рабочих параметров гиротронов. Практически каждый этап разработки, включая варианты с рекуперацией электронов, был впоследствии опробован на W7-AS, в результате чего была получена выходная мощность 1 МВт при длительности импульса 1 с. Наконец, в 1992 г. только что основанной компанией ГИКОМ были заказаны три гиротрона на 140 ГГц / 0,5 МВт / 3 с для системы ЭЦРН установки W7-AS.

Ниже мы опишем три этапа в эволюции системы ЭЦРН установки ASDEX Upgrade на базе гиротронов ГИКОМа.

**ЭЦРН-1.** В 1994 г. после сдачи ASDEX Upgrade в эксплуатацию ГИКОМу заказали 4 гиротрона на 140 ГГц / 0,5 МВт / 2 с и 0,8 МВт / 1 с для систе-



*Представители ГИКОМа на пуско-наладке гиротрона*

мы ЭЦРН установки ASDEX Upgrade. Строительство установки началось в 1993 г. в сотрудничестве с Институтом плазменных исследований (Institut für Plasmaforschung, IPP), Штутгартским университетом и Исследовательским центром Карлсруэ (Forschungszentrum, Karlsruhe, FZK). Для испытания этой системы гиротрон на 140 ГГц / 0,5 МВт / 0,5 с, который был ранее установлен в W7-AS, в 1994 г. был перенесен на площадку ASDEX Upgrade, и в мае 1995 г. первый импульс ЭЦРН был введен в плазму.

В процессе сооружения системы ЭЦРН обнаружилась серьёзная проблема: гиротроны были подвержены влиянию внешних магнитных полей. Это заставило нас пойти на перепланировку системы, и мы в сотрудничестве с ИПФ и ГИКОМом приступили к изучению осаждения электронного пучка на коллекторе гиротрона с помощью эквивалентов ламп типов «Салют» и «Зодиак». К нашему удивлению, выяснилось, что на гиротрон оказывало влияние не только паразитное магнитное поле токамака, но также слабое (4 гаусса) постороннее магнитное поле расположенного поблизости криомагнита. В результате были разработаны компенсирующие кольца, которые в конечном итоге будут использованы также и в гиротронах для ИТЭР. В 1997 г. первый импульс излучения гиротрона типа «Зодиак» был введен в плазму.

Гиротроны всё ещё находились на этапе разработки. Четыре гиротрона типа «Зодиак» системы ЭЦРН-1 имели разные катоды и разные системы охлаждения, и на нашей стороне пришлось несколько раз менять инфраструктуру установки. Неустойчивость пучка, чувствительного к изменениям полного внешнего сопротивления, была подавлена с помощью резистивно-ёмкостного контура, шунтирующего изолятор между катодом и коллектором, что было особенно важно для нашей установки, в которой два гиротрона запитывались одним общим модулятором.

Гиротроны «Зодиак» оснащались борнитридными окнами, требующими использования расширенного высокочастотного пучка. Кроме того, в излучении этих гиротронов присутствовали боковые лепестки существенной интенсивности, что вызвало необходимость разработки зеркал фазовой

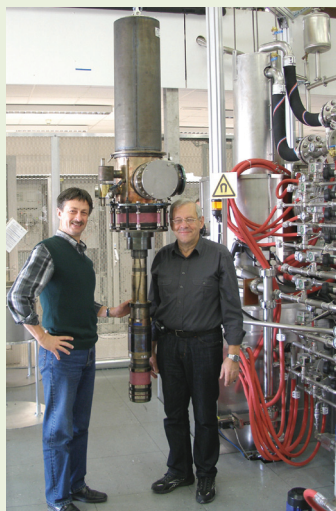
коррекции. И сегодня мы всё ещё пользуемся российскими расчётами профиля пучка при юстировке зеркал квазиоптической линии передачи с использованием жидких кристаллов.

Ещё одна проблема наших гиротронов, которую невозможно было разрешить с помощью испытаний в ГИКОМе, была связана с модуляцией мощности. Применялись два технологических решения: для частоты модуляции 500 Гц использовалось включение/выключение высокого напряжения, а на более высоких частотах высокое напряжение только понижалось с помощью подключенного последовательно модулятора, что позволяло реализовать модуляцию с частотой до 30 кГц.

Эти гиротроны успешно использовались в экспериментах по физике плазмы. Изучение тепловых импульсов позволило доказать, а затем и изучить турбулентную природу электронной теплопередачи. Возбуждение тока в ограниченной области улучшило удержание плазмы при различных профилях плотности тока при вводе мощности вблизи поверхности с  $q = 1$  и контроль пилообразных неустойчивостей; благодаря токам увлечения в магнитных островах мы смогли подавлять неоклассические моды разрывных неустойчивостей.

Два гиротрона «Зодиак» вышли из строя в 2003 и 2005 гг. и были заменены гиротронами «Икар» и «Дедал» с установки W7-AS. Они работали в составе ASDEX Upgrade еще 10 лет, пока также не вышли из строя, проработав почти 20 лет. После демонтажа ЭЦРН-1 в 2016 г. две лампы типа «Зодиак» всё еще оставались пригодными для эксплуатации, проработав около 17 лет.

**ЭЦРН-2.** В результате успешной эксплуатации ЭЦРН в ASDEX Upgrade потребовалась более высокая мощность в более длинных импульсах. Планы добиться активного контроля макроскопической МГД-неустойчивости появились уже в 1999 г. Реализация нового проекта началась после его утверждения в 2003 г. с использованием 4 гиротронов на 1 МВт / 10 с, имевших рекуперацию остаточной энергии электронов и только что появившиеся алмазные окна. Этот проект, который осуществляли совместно IPP, Штутгартский университет и Технологический институт Карлсруэ (KIT), финансировался



*Вадим Нечипоренко и Леонид Попов у гиротрона «Елисей»-2*



*Фриц Лойтерер и Макс Мюнх у гиротрона «Одиссей»-5*

совместно Обществом Гельмгольца (Германия), ассоциацией EURATOM на льготных условиях и тремя указанными выше участниками.

Первый гиротрон был поставлен ГИКОМом в 2005 г., последний — в 2013-м; при этом приходилось преодолевать ряд технических проблем, связанных с:

- переходом к квазиоптическому преобразователю с гофрированными стенками и модифицированной пушке при замене конструкции «Одиссей» вариантом «Елисей»,
- повышением КПД до более 50 %,
- снижением вторичной электронной эмиссии для предотвращения возникновения избыточных токов анода,
- выбором материалов для изоляторов между коллектором с пониженным потенциалом и внешней трубой магнита и для катушки пушки,
- разработкой контура охлаждения системы зеркал.

Эти гиротроны также могут работать на частоте 105 ГГц, соответствующей следующему резонансу выходного окна, с выходной мощностью 0,8 МВт. Модифицированная технология охлаждения обеспечивает поразительно низкие величины дрейфа частоты. Гиротроны могут также генерировать излучение мощностью 800 кВт на частотах 117 ГГц и 127 ГГц. Сначала планировалось оснастить три гиротрона перестраиваемыми окнами, дающими возможность использовать эти промежуточные частоты, что оказалось труднее, чем предполагалось.

Рассматривались варианты использования двух-дисковых окон, брестерских окон и рифлёных алмазных окон. Некоторые из них были частично реализованы (с большим трудом), но добиться успеха так и не удалось. Поэтому в 2008 г. на разработку этих решений было отведено больше времени, а три из четырёх гиротронов оснащены традиционными однодисковыми окнами. Последний гиротрон был также оснащён однодисковым окном, но его внутренняя оптическая система модифицирована таким образом, чтобы пучок выходил из лампы под углом 15 градусов к перпендикуляру к плоскости окна. Это позволило установить в системе перестраиваемый кольцевой резонатор для подавления отражений на промежуточных частотах. В данный момент эти работы ещё продолжаются.

Эти четыре гиротрона всё ещё представляют собой «индивидуальные» проекты, т.е. у каждого из них свои характеристики и слегка различающиеся настройки. Мы, однако, приближаемся к цели, которой является возможность полного дистанционного управления системой с помощью системы управления разрядом (DCS) токамака. На данный момент DCS способна включать и выключать гиротроны, смещать излучатели, заменять отказавшие гиротроны запасными и в очень ограниченной степени даже использовать напряжение катода в качестве устройства управления температурой плазмы.

Проект ЭЦРН-2 успешно продемонстрировал, что МГД-нестабильностью можно управлять с помощью обратной связи. Параллельно с реализацией этого проекта установку ASDEX Upgrade оснастили цельной вольфрамовой внутренней стенкой. Выяснилось, что ЭЦРН эффективно подавляет накопление примесей материала стенки в центре плазменного шнура, что в общем серьёзно повышает интерес к использованию этой технологии. Были разработаны новые схемы нагрева (X3, O2 — на второй и третьей гармониках циклотронной частоты) для продвижения в направлении более низких магнитных полей и более высоких плотностей плазмы. Серьёзной проблемой стало паразитное излучение в системе ЭЦРН, и решение задачи защиты установки от его воздействия привело к разработке дополнительных мер безопасности и улучшению механической устойчивости установки. Для изучения поведения быстрых ионов с помощью диагностики коллективного томсоновского рассеяния успешно применяется зондирующий пучок с частотой 105 ГГц. Сегодня при подавляющем большинстве экспериментов в установке ASDEX Upgrade требу-

ется нагрев электронов плазмы с помощью системы ЭЦРН, и исследователи обычно устраивает то, что им могут предложить. Это наивысшая похвала, которой могут быть удостоены и группа ЭЦРН, и производитель гиротронов.

**ЭЦРН-3.** Уже в тот момент, когда работал всего один гиротрон из ЭЦРН-2, исследовательская группа токамака обсуждала возможности дальнейшего усовершенствования путём замены ЭЦРН-1 новой системой с использованием тех же портов тора. Физики просили разработать новую систему довольно быстро. Поскольку испытанная технология передачи излучения в ASDEX Upgrade по невакуумированным волноводам имела ограничения примерно около 1 МВт / 10 с, было принято решение и дальше использовать мегаваттные гиротроны и ту же технологию передачи. Длительность импульса токамака ограничена десятью секундами, поэтому новые гиротроны в составе ЭЦРН-2 должны были генерировать излучение в импульсах по 1 МВт / 10 с. Возможность перестройки частоты систем ЭЦРН за пределами резонансов Фабри-Перо в однодисковом окне ещё не была продемонстрирована, так что было решено остановиться на частотах 140 ГГц и 105 ГГц.

Проект ЭЦРН-3 был запущен в 2011 г. и финансировался по гранту Общества Гельмгольца, а также из средств IPP. В основном он сосредоточен на усовершенствовании системы с точки зрения простоты эксплуатации и работы источников питания. ГИКОМ согласился произвести четыре гиротрона класса «Елисей» с модификациями, реализованными при разработке гиротронов для ИТЭР (коллектор, охлаждение окна), и ослабить зависимость запуска гиротрона от времени задержки между импульсами. Выполнение последнего требования было недавно успешно продемонстрировано в ходе фабричных приёмочных испытаний. Новые гиротроны поставляются с магнитами, не требующими применения криогенных веществ, подобно российским гиротронам для ИТЭР, способным работать при магнитном поле 7,2 Тл, так что в принципе в будущем возможен переход на частоту 175 ГГц. Новый источник напряжения корпуса лампы на полупроводниках разрабатывается в данный момент. Источник постоянного тока для накала катода специально разработан для предотвращения потери контакта при переключениях во внутренних электрических сетях. Институт технологии межфазных процессов и плазменной технологии Штутгартского университета взял



на себя разработку и производство СВЧ-компонентов, специально предназначенных для связи с тором и конечной нагрузкой при тестовых импульсах.

Система ЭЦРН-1 выведена из эксплуатации в конце 2015 г. и уже демонтирована. На следующем этапе работ на ASDEX Upgrade в 2017 г. начнут работу две линии пучков ЭЦРН-3, ещё две будут введены в эксплуатацию в середине 2017-го и начале 2018 г. соответственно.

Мощным стимулом перехода к ЭЦРН-3 была задача обратиться к низшим столкновительным Н-модам при сильном ЭЦРН и, особенно, модифицировать профиль тока с использованием токов увлечения, чтобы изучить потенциал безындуктивно поддерживаемой плазмы токамака для будущих реакторов со стационарным режимом. Недавние первые эксперименты, в которых использовалась полная мощность ЭЦРН-1 и ЭЦРН-2, уже демонстрируют возможность почти безындуктивной работы на Н-моде при уровне тока плазмы 0,8 МА, поэтому мы с нетерпением ожидаем появления нашей новой системы.

**Алмазные окна.** Во время реализации проектов ЭЦРН-2 и ЭЦРН-3 ГИКОМ продолжал развивать собственный потенциал по производству алмазных окон. Первые диски были отпаяны в центре Culham с применением алюминиевого припоя с низкими антикоррозионными свойствами, что требовало использования агрессивных присадок в закрытых контурах охлаждения. ГИКОМ изготовил корпус с системой охлаждения, работая в то же время над производством 106-миллиметровых дисковых заготовок для сборок гиротронных окон с использованием значительно более стойкого к коррозии припоя Cu/Ag. Кроме того, окна тора в ASDEX Upgrade также обрабатывает ГИКОМ (пайку 92-миллиметровых манжет производит фирма Reuter Technologies, Германия). Сейчас, при взгляде назад, ясно, что начало этой технологии положили несколько обошедшихся весьма недешево неудачных попыток; за последние 10 лет, однако, ни один диск IPP не был испорчен в процессе обработки в



ГИКОМе. Будем считать, что это не просто везение, а настоящий прогресс. До сих пор не было ни одного отказа припаянных на алмазные окна ЭЦРН-2 или ЭЦРН-3 компонентов. IPP благодарит за поддержку Институт прикладного материаловедения (Institute of Applied Materials) из KIT. Все диски закупались у фирмы Element-6 (Нидерланды). Перевозка невзрачных, но чрезвычайно дорогих алмазных дисков продолжает оставаться проблемой с точки зрения таможенного оформления.

**Закключение.** Отношения между ГИКОМом и группой ЭЦРН ASDEX Upgrade — не чисто коммерческие. Это научно-техническое сотрудничество, построенное на взаимном уважении, многократно повышающее эффективность совместных работ: команде ASDEX Upgrade пошло на пользу применение надёжных усовершенствованных гиротронов в изучении физики токамака, а ГИКОМ получил возможность испытать гиротроны в условиях реальной эксплуатации в установках термоядерного синтеза. Полученные знания и опыт регулярно обсуждаются на ежегодных российско-германских семинарах, а также в многочисленных международных публикациях и выступлениях на конференциях. Для защиты гиротронов и токамака были разработаны сложные системы и электронные контуры управления, которые сейчас применяются на тестовых стендах в ГИКОМе. Результатом постоянных работ по усовершенствованию гиротронов и систем управления стала высокая надежность нашей системы ЭЦРН.

**В.А. Флягин и Фриц Лойтерер**



За долгое время этого сотрудничества между нашими командами установились тёплые, дружественные отношения. Мы поздравляем коллег из ГИКОМа с 25-летием и впечатляющими успехами, которых они добились, и надеемся на дальнейшее долгосрочное и плодотворное сотрудничество.

## ПОМНИТСЯ ХОРОШЕЕ... СЛОВО К КОЛЛЕГАМ

*Отдел физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

Коллектив отдела физики плазмы ИОФ РАН рад поздравить дорогих своих коллег, создавших и работающих в НПП ГИКОМ с 25-летием. Наше плодотворное сотрудничество началось задолго до создания Вашей славной фирмы по различным направлениям физики плазмы и успешно продолжается все эти годы. Нам никогда не забыть первую эпопею по созданию бестоковой плазмы на стеллараторе «Ливень-2» с помощью излучения гиротрона «Бристоль», когда впервые в мировой практике для ЭЦР-нагрева был использован гауссовый пучок.

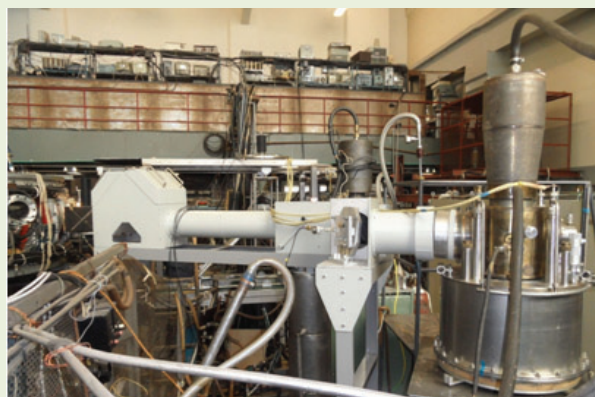
Нам также не забыть эпопею по созданию комплекса ЭЦР-нагрева на мадридском стеллараторе TJ-10 в тяжелейшие 90-е, когда 10-мм гиротроны «Бальзамин» были поставлены для нашей совместной работы. Эта дружеская поддержка никогда не забудется. В наших исследованиях на стеллараторе

«Ливень-2» и во всех исследованиях по плазмохимии были использованы, по меньшей мере, 3 типа гиротронов. Эти приборы всегда отличались высокой надежностью в эксплуатации, обеспечивая выполнение широкого круга исследований. И мы всегда ощущали дружескую поддержку и помощь нижегородцев.

За последние два десятка лет в Испании и Японии нам пришлось вести исследования с использованием ваших гиротронов, и мы радовались и гордились их высоким качеством.

Мы не забудем совместную работу с такими замечательными людьми, как Сергей Дмитриевич Богданов и Вадим Иванович Курбатов. Наше доброе сотрудничество с коллективом ГИКОМа продолжается и по сей день.

Доброго здоровья и успехов вам, наши друзья и коллеги!



*Продукция ГИКОМа, установленная на стеллараторе Л-2М ИОФ РАН*

## ФЕВРАЛЬ 2017 Г. 25 ЛЕТ ГИКОМУ

Джон Елонек, Манфред Тумм

KIT, Карлсруэ, Германия

Дорогой Александр Григорьевич!

От лица Института импульсной мощности и СВЧ-технологии (ИМ) Технологического института Карлсруэ (KIT) сердечно поздравляем вас и всех работников ГИКОМа с 25-летней годовщиной вашей компании. ГИКОМ — одна из самых известных компаний в сфере разработки и производства гиротронных устройств и соответствующих сверхразмерных волноводных и квазиоптических линий передачи для различных приложений. С момента основания вашей компании в 1992 г. ГИКОМ, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН) и KIT наладили прочные, долгосрочные и очень успешные отношения сотрудничества в области компонентов мощных гиротронов для электронно-циклотронного нагрева и токов увлечения плазмы для экологически чистого производства энергии в ходе управляемого термоядерного синтеза и применения гиротронных систем средней мощности для обработки материалов. Ниже мы приводим краткую историческую справку о наших совместных достижениях.

### Компоненты мощных гиротронов для термоядерного синтеза

Совместная разработка магнетронных инжекторных пушек (МИП) мегаваттных гиротронов для термоядерного синтеза началась уже в 1992 г., когда ГИКОМ предложил нам 40-амперную диодную электронную пушку с эмиттером из  $\text{LaB}_6$  для мегаваттного гиротрона на моде  $\text{TE}_{22,6}$ . Эта МИП была совместно разработана (1992) и успешно испытана (1993) нашими группами. В последующие годы с помощью этой качественной и надёжной МИП и соответствующей запасной пушки были впервые получены результаты мирового уровня: (1) мощный гиротрон на 1 МВт со ступенчатой перестройкой частоты диапазона D и выходным окном Брюстера; (2) быстродействующий мощный гиротрон со ступенчатой перестройкой частоты с гибридной магнитной системой; и (3) 140-гигагерцовый гиротрон с выходной мощностью 2,1 МВт. Затем, для сравнения, моду в резонаторе этого гиротрона заменили на  $\text{TE}_{22,8}$ , т. е. рабочую моду гиротрона ГИКОМа на



Одномегаваттные гиротроны со ступенчатой перестройкой частоты диапазона D, в которых используются 40-амперные МИП разработки ИПФ / ГИКОМ / KIT





*Манфред Тумм и Александр Литвак в Карлсруэ, 2003 год*

140 ГГц / 1 МВт. В 2007 г. ГИКОМ поставил в КИТ еще один вариант этой пушки, и она до сих пор используется в нашем короткоимпульсном мегаваттном гиротроне с перестройкой частоты диапазона D, очень высоким КПД и эллиптическим отпаянным окном Брюстера из синтетического алмаза. Эта лампа работает в диапазоне частот от 112 до 166 ГГц с выходными КПД от 32 до 41,5 % (без рекуперации электронов).

Параллельно с разработкой этих МИП для традиционных мегаваттных гиротронов с цилиндрическими полыми резонаторами ИПФ/ГИКОМ и КИТ в 1994 г. разработали, произвели и испытали 50-амперную обращённую пушку (IMIG) с мощностью электронного пучка 4,5 МВт для гиротрона 1,5 МВт / 140 ГГц на моде  $TE_{28,16}$  с коаксиальным резонатором. Эта IMIG оснащена большим эмиттером из  $LaB_6$  радиусом 56 мм. За последующие годы с помощью этой пушки в сотрудничестве КИТ и ИПФ были получены превосходные и (частично) первые в мире результаты: (1) 1,5 МВт / 140 ГГц гиротрон на моде  $TE_{28,16}$  с коаксиальным резонатором; (2) гиротрон с коаксиальным резонатором с выводом высокочастотного пучка, в котором резонаторная мода  $TE_{28,16}$  с попутным направлением вращения преобразовывалась в моду  $TE_{76,2}$  с противоположным направлением вращения для использования в квазиоптическом выходном излучателе; и (3) режим ступенчатой перестройки частоты гиротрона с коаксиальным резонатором и брьюстеровским окном от 134 ГГц до 169,5 ГГц. Позднее короткоимпульсные гиротроны с коаксиальными резонаторами на 1,5 МВт / 165 ГГц и 2 МВт / 170 ГГц были оснащены либо окнами из кварцевого стекла, произведёнными в КИТ, либо борнитридными окнами, произведёнными



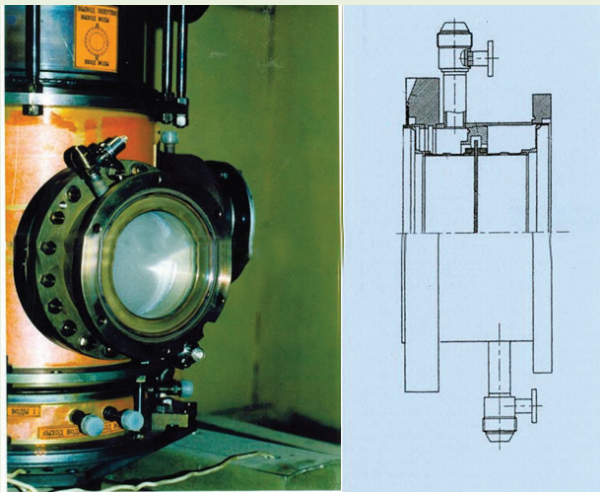
*Докладывает Джон Елонек*

ми в ИПФ/ГИКОМе. То же самое было сделано для различных короткоимпульсных калориметрических нагрузок.

Первый раз разработанная в ГИКОМе для ИТЭР лампа на 1 МВт / 170 ГГц была оснащена окном из искусственного алмаза, полученного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) в сотрудничестве с КИТ в 1999 г. КИТ предоставил свой диск «Звезда FZK» диаметром 119 мм (апертурой окна 100 мм) и толщиной 2,22 мм, с тангенсом потерь  $2 \cdot 10^{-5}$ . Позже, в 2001 г., КИТ поставил для дальнейших совместных экспериментов с ИПФ ещё два диска из CVD-алмаза диаметром 106 мм, а толщиной 1,85 мм. Они также прошли испытания в 170-гигагерцовом гиротроне ГИКОМа. По трагическому и досадному стечению обстоятельств, все три диска — по разным причинам — сломались.

### **Гиротронные системы для обработки материалов**

В 1993 г. КИТ купил у ИПФ/ГИКОМа технологический гиротронный комплекс на 10–15 кВт / 30 ГГц для обработки материалов в непрерывном режиме (CW). В 1994 г. комплекс был доставлен в КИТ. Исходно комплекс для обработки материалов, работавший в миллиметровом диапазоне длин волн, был оснащён гиротроном на моде  $TE_{02}$ , квазиоптической линией передачи и цилиндрическим облучателем с миксером мод. КИТ усовершенствовал эту систему, установив в неё устройство для частичного преобразования моды  $TE_{02}$  в моду  $TE_{01}$  для снижения интенсивности боковых лепестков, и соответственно дифракционных потерь в выходном излучении гиротрона. Кроме того, в облучатель вставили



*Алмазное окно, подготовленное КИТ  
и установленное в гиротроне ГИКОМа*



*Гиротронный комплекс компании ГИКОМ  
для обработки материалов на 10–15 кВт / 30 ГГц*

металлический шестиугольный отражатель собственной запатентованной конструкции для повышения однородности электромагнитного СВЧ-поля. Таким было начало долгого и успешного сотрудничества ИПФ и КИТ в области сверхвысокочастотной обработки материалов. На данный момент в установке КИТ для обработки материалов стоит уже пятая лампа ГИКОМа этого типа, т. е. гиротрон средней мощности на 30 ГГц.

Для повышения однородности поля в миллиметровых облучателях для обработки материалов предпочтительнее использовать источники излучения с возможностью перестройки частоты. ИПФ и ГИКОМ разработали двухчастотную систему для обработки материалов с использованием гиротрона на 15 кВт / 28 ГГц и гиро-ЛОВ с возможностью перестройки частоты на 2,5 кВт / 24,1 ГГц. КИТ внёс свой вклад в эту разработку, производя и предоставив для использования волновод со спиральной гофрировкой для замедляющей системы перестраиваемой гиро-ЛОВ на моде  $TE_{21}$  (2-я гармоника частоты/низшая собственная частота  $TE_{11}$ ).

Всё вышесказанное явно указывает на то, что с момента основания ГИКОМа в феврале 1992 г. ГИКОМ / ИПФ и КИТ очень успешно поддерживают

прочные и долгосрочные отношения сотрудничества в сфере разработки компонентов мощных гиротронов для термоядерного синтеза и применения технологических гиротронных комплексов для обработки различных материалов. Совсем недавно Российский научный фонд (РНФ) и немецкий фонд Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) приняли решение о поддержке совместного предложения ИПФ и КИТ под названием «Генерация ультракоротких импульсов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн для спектроскопии и диагностики различных сред на основе пассивной синхронизации мод в электронных устройствах с нелинейным циклотронным поглотителем в контуре обратной связи». Мы надеемся, что этот исследовательский проект будет полезен для всех нас, внесёт свой вклад в дальнейшее научное сотрудничество КИТ и ИПФ / ГИКОМ и даст нашим молодым научным сотрудникам возможность теснее взаимодействовать друг с другом.

В заключение мы желаем предприятию ГИКОМ и в будущем оставаться компанией, пользующейся заслуженным авторитетом и одним из лидеров в области разработки и производства разнообразных гироустройств, от миллиметровых до терагерцевых.

## ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИРОТРОНОВ КОМПАНИИ ГИКОМ В ГЕЛИОТРОНАХ УНИВЕРСИТЕТА КИОТО НА ПРОТЯЖЕНИИ ЧЕТВЕРТИ ВЕКА

*К. Нагасаки<sup>1</sup>, К. Сакамото<sup>1</sup>, Н. Инклин<sup>1</sup>, С. Кобаяши<sup>2</sup>, Х. Шидара<sup>3</sup>, Х. Зуши<sup>4</sup>, М. Сато<sup>5</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Advanced Energy, Университет Киото, Япония

<sup>2</sup> National Institute for Fusion Science, Япония

<sup>3</sup> Metal Technology Co. Ltd, Япония

<sup>4</sup> Institute of Applied Mechanics, Университет Кюсю, Япония

<sup>5</sup> Chubu University, Япония

От лица группы ЭЦР-отдела гелиотронов в Университете Киото поздравляем ГИКОМ с 25-летием.

Мы работаем с гиротронами компании ГИКОМ уже четверть века, используя их в экспериментах на установках Гелиотрон Е и Гелиотрон J. Как показано в таблице, у нас три гиротрона ГИКОМа. Первый гиротрон, №1, был установлен в 1995 г. и работал вплоть до остановки Гелиотрона Е в 1997 г. Гиротрон №2 был установлен в Гелиотроне J в 2001 г. и работал до 2013 г. Гиротрон №3 установлен в 2014 г.

Системы электронно-циклотронного нагрева (ЭЦН) и тока увлечения (ЭЦТУ) — важный элемент установок магнитного термоядерного синтеза, обеспечивающий генерацию и нагрев плазмы, а также возбуждение токов увлечения. Мы использовали гиротрон на частоте 106 ГГц в установке Гелиотрон Е, а в Гелиотроне J — 70-гигагерцовый диодный гиротрон и 70-гигагерцовый гиротрон с рекуперацией электронов для ЭЦН/ЭЦТУ на второй гармонике моды Х. Такие гиротроны применяются во многих исследованиях в области физики плазмы и разработках термоядерного синтеза, в частности приме-

нительно к генерации плазмы, изучению Н-моды, формированию внутреннего барьера переноса электронов, МГД-стабилизации, анализу переноса частиц и тепла, а также физике токов увлечения.

Главное достоинство гиротронов ГИКОМа — их надёжность и стабильность в работе. На этапах установки и запуска мы столкнулись с некоторыми проблемами технического свойства, но как только гиротроны заработали должным образом, в плазменных экспериментах они работали неизменно стабильно. Управлять мощностью высокой частоты достаточно легко, регулируя параметры. В частности, 70-гигагерцовый гиротрон №2 работал более десяти лет. Даже при возникновении проблем с дуговым разрядом в гиротронах мы справлялись с этой ситуацией после нескольких тренировочных импульсов. Серьёзных поломок, таких как разрушение окна или короткое замыкание подогрева катода, не было ни разу.

Ещё одним достоинством является высокая чистота моды. Поскольку выходной модой гиротрона является гауссов пучок с чистотой более 95 %,

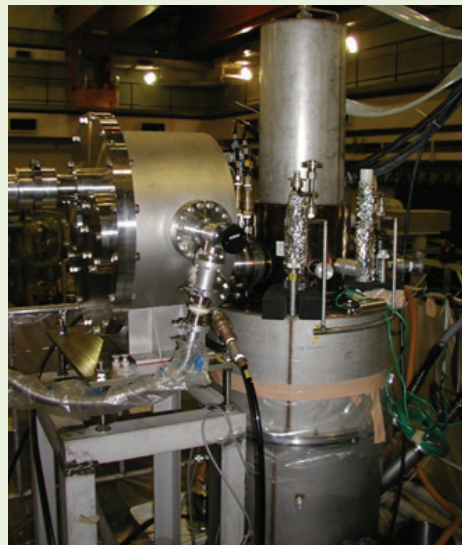
**Гиротроны НПП ГИКОМ для установок Гелиотрон Е и Гелиотрон J**

| Характеристики        | Гиротрон №1 | Гиротрон №2 | Гиротрон №3               |
|-----------------------|-------------|-------------|---------------------------|
| Частота               | 106,4 ГГц   | 70,0 ГГц    | 70,0 ГГц                  |
| Выходная мощность     | 500 кВт     | 500 кВт     | 500 кВт                   |
| Длительность импульса | 200 мс      | 500 мс      | 500 мс                    |
| Тип                   | диодный     | диодный     | с рекуперацией электронов |
| Напряжение пучка      | —80 кВ      | —75 кВ      | -50 кВ                    |
| Ток пучка             | 20 А        | 23 А        | 25 А                      |
| Напряжение на корпусе | нет         | нет         | +30 кВ                    |
| Окно                  | BN          | BN          | BN                        |
| Год установки         | 1995        | 2001        | 2014                      |





*В.Б. Орлов и В.И. Курбатов на пуске гиротрона на 106,4 ГГц*



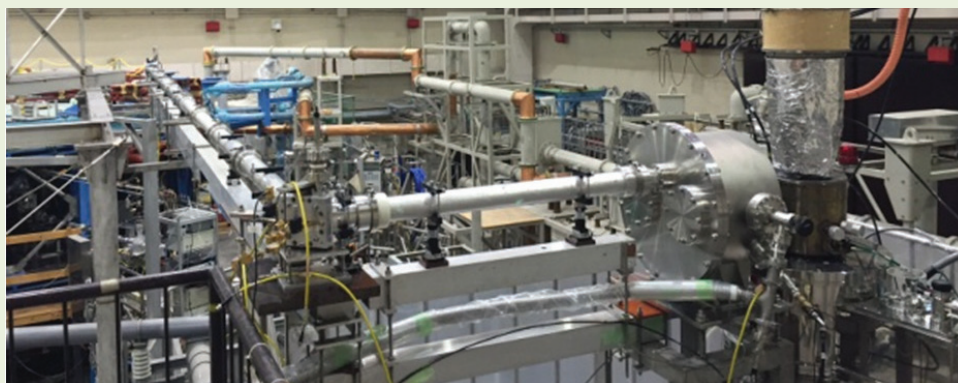
*Диодный гиротрон на 70 ГГц*

нам удалось получить высокий КПД передачи (более 90 %), используя сверхразмерные гофрированные волноводы длиной 20 м, 3 уголка, монитор мощности и поляризатор, тем самым доказав, что волноводная линия передачи может быть эффективно использована для передачи мощного СВЧ-излучения. Использование криомагнита фирмы JASTEC существенно облегчило обслуживание гиротронной системы.

Сильное СВЧ-излучение гиротронов вносит возмущения в процедуру диагностики плазмы с помощью микроволн. Чтобы подавить микроволновый «шум» на 70 ГГц мы попросили ГИКОМ разработать и изготовить режекторные фильтры и фильтры ниж-

них частот для диагностики электронно-циклотронного излучения (58–74 ГГц, 72–88 ГГц) и рефлектометра (26–40 ГГц, 33–48 ГГц) в Гелиотроне J. Эти компоненты были установлены в диагностической волноводной линии. Шумовое излучение поглощается достаточно эффективно, в результате чего мы можем успешно измерять электронные температуру и плотность плазмы в Гелиотроне J.

Мы благодарим ГИКОМ за их великолепные гиротроны и компоненты миллиметрового диапазона длин волн и особенно: Г. Денисова, М. Глявина, А. Гольденберга, В. Курбатова, А. Кузмина, А. Литвака, В. Орлова, А. Павельева, Е. Солуянову, Е. Тая и А. Толкачёва.



*Система ЭЦРН/ЭЦТУ на 70 ГГц*

## НАЗЫВАЮТСЯ ПРОСТО – «ГИРОТРОН-1» И «ГИРОТРОН-2»

Анжела Фернандез, Альваро Каппа

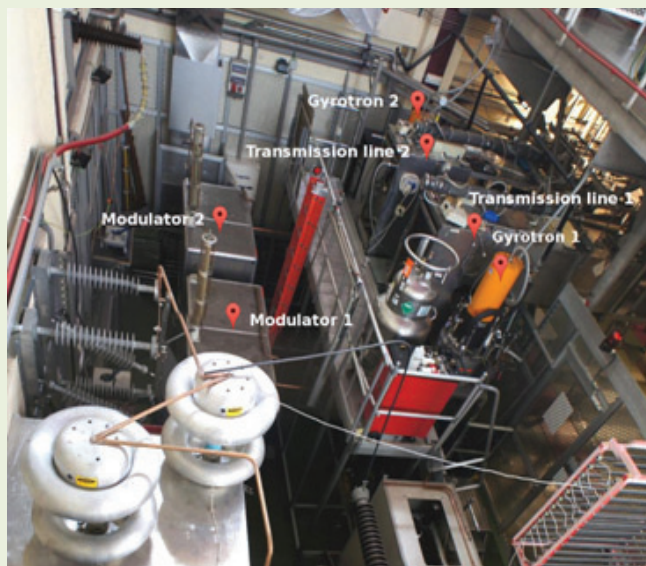
CIEMAT, Мадрид, Испания

У гиротронов системы ЭЦРН стелларатора TJ-II никогда не было экстравагантных названий. Соответственно номерам запитываемых линий передачи они назывались «Гиротрон-1» и «Гиротрон-2». Обе лампы, принадлежащие классу «Буран» (53 ГГц / 300 кВт / 1 с), работали с высокой надёжностью с момента их установки и запуска более 18 лет назад. За это время они прошли через разные руки. Сначала их обслуживали К.М. Ликин и Á. Fernández. Затем, после их ухода из CIEMAT, за техническое обслуживание и эксплуатацию обеих ламп отвечал опытный инженер-испытатель А. Толкачёв, ранее работавший в ГИКОМе, ему помогал G. Catalán.

С момента запуска установки в 1998 г. все разряды в плазме TJ-II, за исключением 1700 импульсов, произведённых с помощью нагрева инжекцией

потока нейтральных частиц (NBI), т. е. приблизительно 413000 импульсов, генерировались с помощью этих двух гиротронов. Кроме того, в рамках сотрудничества с группой ЭЦРН TJ-II работники ИОФАНа регулярно приезжали в CIEMAT вплоть до 2014 г. с целью изучения различных аспектов электродинамики гиротронов.

На данный момент оба гиротрона по-прежнему используются для создания и нагрева плазмы TJ-II, генерируя в среднем 35 импульсов длительностью 200 мс в день три дня в неделю, 25–30 недель в год. И хотя у «Гиротрона-2» случаются недомогания в виде спорадических дуговых разрядов на окне, следующая экспериментальная кампания TJ-II будет полностью построена на штатном использовании обоих гиротронов.



Система ЭЦРН стелларатора TJ-II

## ГИРОТРОНЫ, ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ И ВАКУУМНЫЕ БАРЬЕРНЫЕ ОКНА КОМПАНИИ ГИКОМ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЦРН В IPR

Д-р Брей К. Шукла

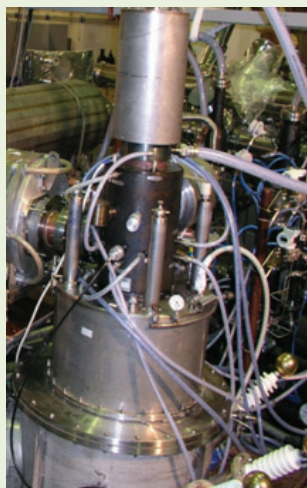
Institute for Plasma Research, Бхат, Гандинагар (Гужарат), Индия

ГИКОМ начал техническое сотрудничество с Institute for Plasma Research (IPR) в 1999 году, поставив комплекс линии передачи на 28 ГГц и окно из нитрида бора для токамака «Aditya». В состав этой системы входили большой преобразователь мод ( $TE_{02} \rightarrow HE_{11}$ ), гофрированный волновод, уголки, поляризатор, прерыватель постоянного тока и барьерное окно. Система была успешно запущена на токамаке «Aditya», и был проведён ряд экспериментов по пробое с помощью ЭЦРН при низкой напряжённости индуцированного электрического поля. Затем ГИКОМ поставил и успешно запустил в эксплуатацию гиротрон на 82,6 ГГц / 200 кВт / 1000 с, линию передачи и окна из искусственного CVD-алмаза для токамака SST-1. Этот гиротрон на 82,6 ГГц был впервые испытан на длительность импульса в 1000 с. В ходе испытаний была продемонстрирована очень высокая надёжность работы в режиме длинного импульса, рекордного (по энергии излучения) в истории гиротронов. Испытания окна из CVD-алмаза на высоком уровне мощности в ходе приёмных испытаний на месте пользования представляли собой весьма непростую техническую задачу. Недавно ГИКОМ поставил систему ЭЦРН на 42 ГГц / 500 кВт для токамака SST-1. Она стала одним из главных компонентов SST-1 и дала фантастические результаты по генерации плазмы в токамаке. Краткая информация

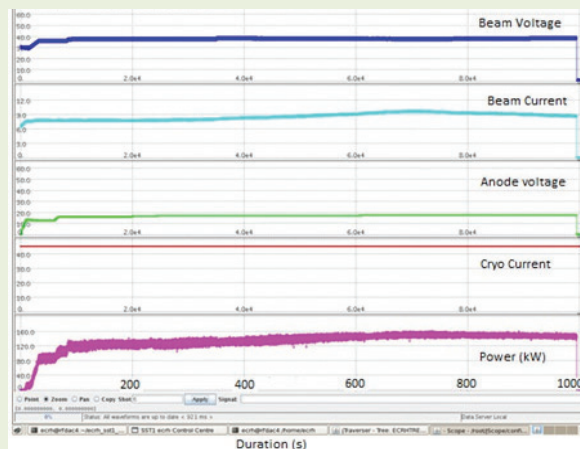
о важнейших испытаниях на высоком уровне мощности, которым IPR подвергал гиротроны, линию передачи и алмазное окно ГИКОМа, приведена ниже.

### Гиротрон на 82,6 ГГц / 200 кВт / 1000 с

Система ЭЦРН на 82,6 ГГц / 200 кВт / 1000 с (гиротрон, линия передачи и окно из CVD-алмаза) была приобретена у ГИКОМа для работы в составе SST-1 при больших длительностях импульса в рабочих магнитных полях токамака 1,5 и 3,0 Тл. Этот гиротрон на 82,6 ГГц — возможно, первый в истории гиротрон, успешно испытанный в режиме непрерывного излучения на длительности 1000 с. Он представляет собой усовершенствованный вариант гиротрона с рекуперацией электронов, который генерирует мощность 200 кВт в режиме непрерывного излучения при напряжении и токе пучка ~40 кВ и ~10 А соответственно и КПД ~ 50 %. Линия передачи на основе гофрированного волновода диаметром 63,5 мм состоит из системы согласующих зеркал, прерывателей постоянного тока, уголков для излучения высокой мощности с направленными ответвителями, поляризатора и сифона. Весь комплект линии передачи был также испытан на уровне полной мощности при длительности импульса 1000 с.



Гиротрон 82,6 ГГц / 1000 с

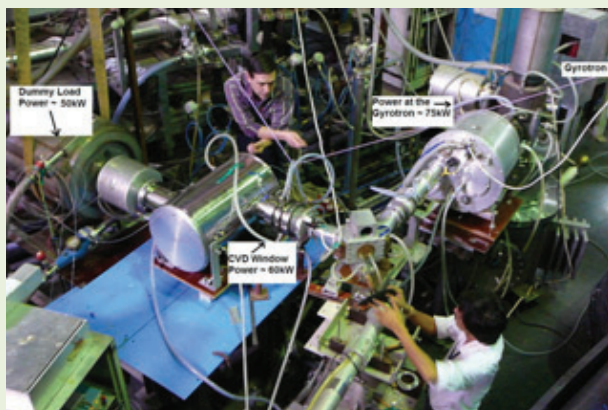


Импульсы гиротрона на 82,6 ГГц длительностью 1000 с



## Испытания окна из CVD-алмаза на высоком уровне мощности

Произведённое ГИКОМом окно из CVD-алмаза используется как элемент порта токамака для разделения сверхглубокого вакуума токамака и линии передачи под давлением выше атмосферного.



*Испытательный стенд высокой мощности для окна из CVD-алмаза*

Для проверки этого алмазного окна на соответствие требованиям эксплуатации были проведены испытания на высоком уровне мощности с использованием калориметрической нагрузки и системы согласующих зеркал. Эти испытания окна имели чрезвычайно важное значение, поскольку это был первый испытательный стенд высокой мощности с двумя алмазными окнами, включая одно гиротронное. Испытания алмазного окна на высоком уровне мощности проводились со всей возможной аккуратностью. В конечном итоге алмазное окно было подвергнуто испытанию при значениях мощности 40 кВт и 80 кВт и длительностях импульса 1000 с и 600 с соответственно.

## Система ЭЦРН на 42 ГГц для токамаков SST-1 и Aditya

Система ЭЦРН на 42 ГГц / 500 кВт, поставленная компанией ГИКОМ, стала новым ключевым элементом токамака SST-1. Эта система предназначена для обслуживания двух токамаков — SST-1 и «Aditya». Она состоит из линии передачи длиной приблизительно 70 м с двумя волноводными переключателями, первый из которых позволяет испытывать гиротрон с юстировочной нагрузкой, а второй — запускать мощность в токамаки SST-1 или «Aditya». Она интенсивно использовалась с SST-1, и с её

помощью были получены интересные результаты по генерации плазмы с помощью ЭЦРН на основной и второй гармонике гирочастоты при низком индуцированном напряжении.

Гиротрон на 42 ГГц / 500 кВт представляет собой усовершенствованный вариант гиротрона. Внутренние потери в нём существенно снижены, что позволило поднять КПД до уровня более 50 %. Гиротрон генерирует мощность 500 кВт при напряжении и токе пучка ~48 кВ и 19 А соответственно. Расчётные и фактические полученные характеристики этого гиротрона приведены в таблице. Этот надёжный гиротрон постоянно используется с токамаками SST-1 и «Aditya».

При использовании с токамаком «Aditya» система ЭЦРН на 42 ГГц также дала ряд интересных результатов при запуске токамака на второй гармонике с низким индуцированным напряжением. Требуется запустить приблизительно 150–200 кВт мощности ЭЦРН в импульсе продолжительностью 100–150 мс приблизительно за 30 мс до появления непрерывного индуцированного напряжения для успешной предварительной ионизации и пробоя при напряжении на индукторе не более 7 В. В результате эта величина становится существенно ниже, чем обычное напряжение в «Aditya» (~22 В).

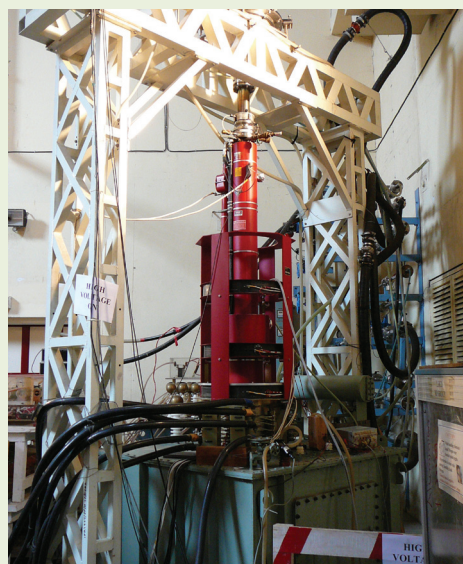
IPR имеет давние отношения с компанией ГИКОМ. За последние 15 лет IPR испытал несколько гиротронов, линию передачи и вакуумные барьерные окна, включая окно из CVD-алмаза. Несколько ключевых технических результатов в разработке гиротронных систем были получены совместно, в частности, первая демонстрация работы гиротрона на 82,6 ГГц в течение 1000 с, испытания



*Система ЭЦРН на частоте 42 ГГц токамака SST-1*

## Расчётные и фактические характеристики гиротрона на 42 ГГц

| Характеристика           | Расчётное значение                        | Фактическое значение                      |
|--------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Тип гиротрона            | С рекуперацией электронов                 | С рекуперацией электронов                 |
| Вывод излучения          | Боковой с внутренним преобразователем мод | Боковой с внутренним преобразователем мод |
| Мощность                 | 500 кВт                                   | 500 кВт                                   |
| Длительность импульса    | 500 мс                                    | 500 мс                                    |
| Выходная мода            | TEM <sub>00</sub> (гауссов пучок)         | TEM <sub>00</sub> (гауссов пучок)         |
| Чистота моды             | > 95 %                                    | ~ 99 %                                    |
| Напряжение пучка (макс.) | – 50 кВ                                   | – 49 кВ                                   |
| Ток пучка (макс.)        | ~20 А                                     | ~18 А                                     |
| Напряжение анода         | +20 кВ                                    | +19 кВ                                    |
| КПД                      | ~50 %                                     | >52 %                                     |
| Ток криомагнита          | 28,2 А                                    | 28,2 А                                    |
| Мощность накала          | ~ 640 Вт                                  | ~ 630 Вт                                  |



*Др. Б. Шукла, В. Белоусов и М. Шмелев  
во время монтажа линии передачи СВЧ-излучения на токамаке «Aditya»*

окна из CVD-алмаза на высоком уровне мощности, гиротрон на 42 ГГц с КПД более 50 % и комплекс ЭЦРН, способный обслуживать два токамака (SST-1 и «Aditya») одновременно.

В заключение можно сказать, что надёжность и хорошие характеристики гиротрона ГИКОМа доказаны со всей убедительностью. Последний гиро-

трон на 42 ГГц, запущенный в эксплуатацию в IPR, генерирует излучение с КПД, превышающим 50 %, и проработал безотказно последние три года. Таким образом, компания ГИКОМ доказала высокое качество своих разработок в сфере гиротронов, линий передачи и окон из CVD-алмаза для систем ЭЦРН в установках термоядерного синтеза.

## СОЧЕТАНИЕ ПРОФЕССИОналиЗМА С ГОТОВНОСТЬЮ ИМПРОВИЗИРОВАТЬ

*Оге Крюйт, инженер*

FOM/DIFFER, Эйндховен, Нидерланды

Уважаемый профессор Литвак!

Поздравляю Вас с двадцатипятилетием компании ГИКОМ. Спасибо за приглашение описать свои впечатления в юбилейном буклете.

Я с большой радостью вспоминаю опыт сотрудничества со специалистами ГИКОМа при подготовке гиротронов и высокочастотных линий передачи для систем ЭЦРН FOM в Нидерландах и Юлихе (Германия). Фотография, приложенная к моему письму, сделана после успешной установки 140-гигагерцо-

вого гиротрона и получения первого мегаваттного импульса в марте 2004 г. — насколько я помню, около полуночи. С гиротронами было очень просто работать, и работали они прекрасно.

С не меньшим удовольствием я вспоминаю работу с инженерами ГИКОМа, с которыми я чувствовал своего рода родство по работе — возможно, сочетание профессионализма с готовностью импровизировать по мере необходимости.

С наилучшими пожеланиями и поздравлениями!



*Празднование успешного запуска гиротрона*



## ОТ ТОРГОВОГО ПРЕДСТАВИТЕЛЯ ГИКОМА

*Владислав Складчевич,*

президент Gyrotron Technology, Inc., США

Дорогие друзья!

Поздравляем вас с 25-летием вашего дела! С того момента, когда я познакомился с вами в самом начале, в 1985 году, вы прошли невероятный путь от государственного предприятия с весьма



туманными перспективами до процветающей, признанной во всём мире частной компании. Я рад, что принял в этом участие, пусть и небольшое. Надеюсь, вы не забыли, кто заплатил 10000 долларов за ваш первый коммерческий гиротрон.

В начале этого пути были первые испытания, когда ножку гиротрона уронили на пол и получили 3 кВт, в конце — прекрасные, надёжные устройства, генерирующие сотни киловатт. Нельзя не отметить и потрясающий рост цен, по которым ГИКОМ продает свою продукцию: с восьми тысяч рублей до сотен тысяч долларов.

Мы гордимся совместной деятельностью с этой группой профессионалов, пользующихся столь

высокой репутацией. Мы установили более 11 гиротронов в коммерческих предприятиях, пять из них — как американская компания, имеющая честь быть вашим торговым представителем. Ваши генераторы обеспечивают успешный выпуск продукции, и я могу заверить вас, что большинство наших клиентов ими довольны — в первую очередь, благодаря высокому качеству ваших гиротронов и оказываемой вами поддержке.

Нужно особо отметить, что в прошлом, независимо от уровня вашего бизнеса, вы никогда не отказывались встречаться с нами по любым поводам, плохим или хорошим, и помогать нам, когда мы нуждались в вашей помощи. Мы благодарны за всё, что вы сделали для нас, и надемся на дальнейшее сотрудничество.

Желаем вам всего наилучшего!



## ПОЗДРАВЛЕНИЕ С 25-ЛЕТИЕМ КОМПАНИИ «ГИКОМ»

*Тошитака Идехара*

Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui (FIR UF), Фукуи, Япония

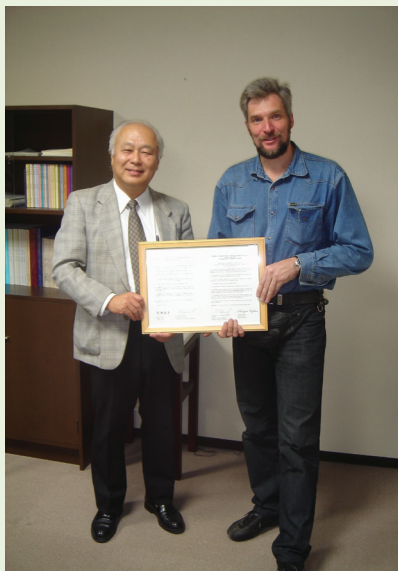
Прежде всего мне хотелось бы передать мои самые сердечные поздравления по случаю 25-летия компании «ГИКОМ».

От лица всех сотрудников Исследовательского центра по разработкам в дальнем инфракрасном диапазоне Университета Фукуи (FIR UF) посылаю свои поздравления с самой искренней благодарностью. Оглядываясь на два десятилетия назад, в первое и второе десятилетия двадцать первого века, мы видим, какие тесные отношения сотрудничества установились между ИПФ РАН и FIR UF благодаря академическому обмену как научными сотрудниками, так и данными по многим направлениям исследований.

Сразу после основания FIR UF в 1999 г. к нам приехал д-р М. Глявин, что послужило началом нашего долгосрочного сотрудничества. Затем у нас работал профессор В. Братман в качестве приглашённого профессора, что дало возможность

продолжить совместную исследовательскую деятельность. После этого мы неоднократно обменивались сотрудниками: из FIR UF в ИПФ РАН приезжали профессор Т. Идехара, С. Мицудо и И. Огава, а из ИПФ РАН в FIR UF – профессор В. Мануилов, В. Запевалов, А. Литвак и доктор Ю. Калынов и А. Еремеев. За этот период интенсивного научного обмена нам удалось добиться больших успехов и внести существенный вклад в продвижение рабочих параметров в терагерцовый диапазон частот при работе на высоких уровнях мощности (несколько киловатт) даже в этом диапазоне.

Я надеюсь на продолжение этого плодотворного сотрудничества между ИПФ РАН и FIR UF при значительной поддержке со стороны компании ГИКОМ. Уверен, что продолжение наших совместных исследований внесёт свой вклад в разработку мощных источников терагерцового излучения и практику их применения.



*Результаты почти 20-летних совместных исследований: проф. Т. Идехара и д-р М. Глявин с подписанным соглашением о научно-техническом сотрудничестве (слева) и во время экспериментов по микроволновой обработке материалов (справа)*

## ВПЕЧАТЛЕНИЯ О СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ С ГИКОМОМ

*Петр Багрянский*

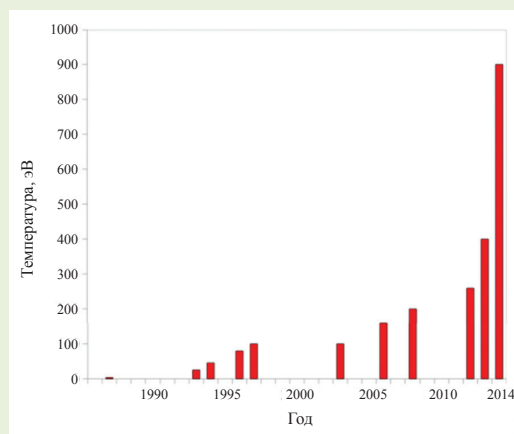
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

В самом начале 90-х годов в наш институт были поставлены четыре модуля с гиротронами «Буран» мощностью до 0,5 МВт, два из них имели частоту 75 ГГц, а два — 54,5 ГГц. Приборы были изготовлены в ГИКОМе и предназначались для экспериментов на амбиполярной ловушке АМБАЛ, которая сооружалась в те годы. Однако трудности «лихих девяностых» не позволили завершить полностью проект АМБАЛ, и гиротроны не использовались почти 20 лет, пока в 2010 г. не «проросла» и не получила денежную поддержку идея реализовать прямой нагрев электронов на установке «газодинамическая ловушка» (ГДЛ) и продемонстрировать возможность достижения уровня электронной температуры в 1 кэВ. Это значение более чем втрое превышает прежнее рекордное значение температуры электронов, полученное в квазистационарном режиме на ловушках открытого типа для магнитного удержания плазмы. По результатам численного моделирования такая температура электронов позволяет реализовать ближайшее термоядерное приложение магнитных ловушек открытого типа — мощный источник нейтронов от реакции синтеза ядер D-T.

С 2010 г. и началось активное сотрудничество группы ГДЛ с коллегами из ГИКОМа и ИПФ РАН. Было принято решение использовать два имеющихся гиротрона с частотой 54,5 ГГц и инжектировать пучки СВЧ-излучения в области близ магнитных пробок ловушки. С гиротронов удалили «пыль веков» и отправили в ГИКОМ, где их (по договору с очень дружественной ценой) быстро реанимировали без «вскрытия», провели измерения параметров пучков микроволнового излучения и прислали обратно. После этого к нам с визитом прибыл Виктор Борисович Орлов, который за несколько дней произвел сборку, настройку и запуск гиротронных модулей, а также обучение персонала работе с гиротронами. Затем в краткие сроки ГИКОМ изготовил все элементы, необходимые для формирования, транспортировки и инжекции в плазму установки ГДЛ пучков излучения. После сборки, запуска, оптимизации параметров и автоматизации системы микроволнового нагрева эксплуатируется уже

в течение четырех лет и является одной из самых надёжных на установке ГДЛ. Обслуживание осуществляется техническим персоналом, который просто выполняет инструкции, данные В.Б. Орловым.

Характеризуя научные результаты, полученные в ходе исследований на установке ГДЛ с использованием системы микроволнового нагрева плазмы, следует сказать, что был решен целый ряд принципиальных проблем, связанных с изучением теплопроводности плазмы, генерацией предварительной плазмы, диагностикой плазмы и др. Сегодняшние параметры плазмы по совокупности не уступают параметрам среднего размера токамаков. Достигнуто значение электронной температуры в 0,9 кэВ. По результатам опубликована серия статей в высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах. Исследования в этих направлениях активно развиваются, а новые интересные и важные результаты ожидаются.



*Увеличение электронной температуры в экспериментах на установке ГДЛ за 25 лет: результаты 2013 и 2014 гг. получены в сотрудничестве с ГИКОМом и ИПФ РАН*

В заключение скажем, что соприкосновение с высочайшим уровнем научной, инженерной и технологической культуры ГИКОМа и ИПФ РАН позволило нам вывести на новый конкурентоспособный уровень «забытое богом и термоядерным сообществом» направление ловушек открытого типа для магнитного удержания плазмы.





*А.Г. Литвак, А.В. Гапонов-Грехов и адвокат Майкл Склярофф (фирма «Ballard Spahr»), оказавший неоценимую помощь в подготовке первых международных контрактов*



*Джей Хиршфилд (Йельский университет, США) и Михаил Петелин — пионеры исследования циклотронных мазеров*



*М. Бланк (США) и Б. Пиошик (Германия)*

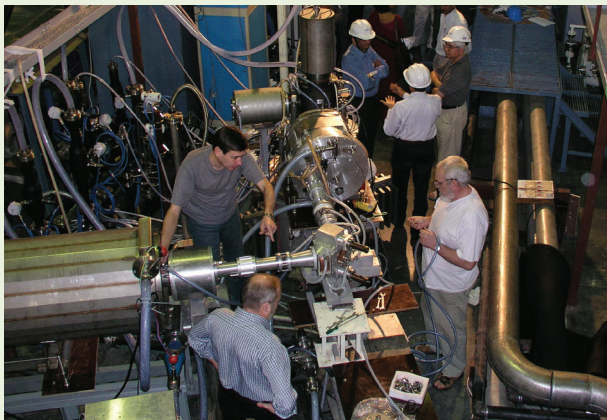


*Делегация ГИКОМа в Японии, 1992 год*



*Российско-германское сотрудничество: партнеры в науке и в футболе*





*Подготовка к испытаниям гиротронного комплекса на токамаке SST-1*



*Сборка линии передачи, поставленной ГИКОМом, в Институте физики плазмы в Индии*



*В.Л. Вдовин (ИАЭ им. И.В. Курчатова) и А.В. Красильников (ген. директор Российского агентства ИТЭР)*



*Докладчик — Г.Г.Денисов*



*Демонстрация гиротронного комплекса для ИТЭР в присутствии директора организации ИТЭР г-на Осаму Мотоджимы, 2015 год*





*Поездка в Дивеево участников российско-германского семинара «Гиротроны и ЭЦ-нагрев плазмы»*



*Е.В. Суворов и Ф. Эркманн (Германия)*



*В. Каспарек, Х. Цом (Германия), У. Йордан (Швеция) и Ф. Рютер (Германия)  
Традиционный тост за дружбу и сотрудничество*



*На теплоходной конференции «Strong microwaves in plasmas».  
Делегации Нидерландов (слева) и Германии участвуют в шоу талантов*