

УДК 621.385.69

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГИРОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН. I. ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСА

*Ю. В. Быков, А. Г. Еремеев, М. Ю. Глявин, Г. Г. Денисов, Г. И. Калынова, Е. А. Копелович,
А. Г. Лучинин, И. В. Плотников, М. Д. Проявин, М. М. Троицкий, В. В. Холопцев**

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

В ИПФ РАН создана серия гиротронных комплексов, предназначенных для исследования физических процессов при воздействии электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн на вещество. В данной статье описывается универсальный принцип их построения на примере комплекса с мощностью выходного излучения 5 кВт на частоте 24 ГГц. Приведены описание и технические характеристики основных компонентов комплекса. Создание эффективных источников излучения и линий его транспортировки, предназначенных для выполнения различных научных исследований, представляет собой сложную радиофизическую задачу, а необходимость долговременной стабильной работы с автоматической подстройкой параметров режима генерации требует использования оригинальных инженерных решений. Использование в линии транспортировки излучения многомодовых электродинамических устройств позволяет осуществлять воздействие на материалы с существенно различными диэлектрическими свойствами, в частности нагревать их до температур порядка (и более) 2000°С. Вакуумно-плотная рабочая камера комплекса представляет собой высокودобротный ненастроенный резонатор с объёмом порядка 0,1 м³, в котором возможен микроволновый нагрев изделий с характерным размером более десятка сантиметров. Автоматизированная система управления работой комплекса обеспечивает его надёжное и безаварийное долговременное функционирование.

ВВЕДЕНИЕ

Создание гиротронов миллиметрового диапазона длин волн со средней мощностью 3÷30 кВт стимулировало развитие исследований в области использования излучения этой спектральной области для решения различных научных и технологических задач. В этих различающихся по своему характеру исследованиях делаются попытки использовать более высокие частоты и мощности миллиметрового излучения по сравнению с широко применяемыми на практике устройствами, работающими на частотах 2,450 и 0,915 ГГц для радикального улучшения характеристик и параметров технологических процессов. Первоначально к таким работам относились исследования высокотемпературных процессов, основанных на использовании СВЧ нагрева, в частности спекание керамических и композиционных материалов, соединение керамических изделий между собой и с металлами, создание различных по назначению покрытий, быстрый отжиг полупроводниковых и диэлектрических материалов [1–5]. Позднее в ряде работ были продемонстрированы перспективы развития технологий, основанных на поддержании плазмы газового разряда излучением миллиметрового диапазона длин волн: выращивание поли- и монокристаллических алмазных плёнок и пластин [6], скоростное осаждение плёнок и покрытий [7]. В последние годы перспективы развития электронно-циклотронных источников ионов связывают главным образом с использованием излучения миллиметрового диапазона. Увеличение частоты поддерживающего электронно-циклотронный разряд СВЧ излучения позволяет значительно повысить интенсивность и зарядовое состояние ионных пучков [8].

* holo@ipfran.ru

По уровню мощности, представляющему интерес для решения научных и прикладных задач (единицы и десятки киловатт в единичном приборе в непрерывном режиме генерации), единственными источниками излучения миллиметрового диапазона длин волн являются гирорезонансные приборы. В ИПФ РАН разработана и создана серия специализированных гиротронных комплексов с мощностью $3 \div 25$ кВт на частотах $24 \div 83$ ГГц [9–11]. В целом принципы построения неизменны для всех таких комплексов, несмотря на различие уровней мощности и частот СВЧ излучения. Отметим, что аналогичные принципы построения также используются при создании комплексов, в которых источниками миллиметрового излучения являются гирорезонансные лампы обратной и бегущей волны [12].

В данной работе приведено описание гиротронного комплекса с плавно регулируемой мощностью непрерывного выходного излучения $0 \div 5$ кВт на частоте 24 ГГц, используемого для исследований высокотемпературных процессов в поликристаллических диэлектриках при воздействии интенсивного электромагнитного поля миллиметрового диапазона длин волн [13].

1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ГИРОТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Гиротронные комплексы представляют собой совокупность следующих взаимосвязанных устройств и подсистем:

- 1) источник СВЧ излучения, основными компонентами которого являются гиротрон и его магнитная система;
- 2) система электропитания комплекса;
- 3) система охлаждения компонентов комплекса;
- 4) линия преобразования и транспортировки излучения;
- 5) рабочая камера;
- 6) автоматизированная система управления и защиты.

Конструкция и технические характеристики компонентов источника СВЧ излучения определяются его выходной мощностью и рабочей частотой, однако функциональные связи между компонентами остаются практически неизменными. Технические особенности компонентов остальных подсистем определяются назначением конкретного гиротронного комплекса.

На рис. 1 приведена блок-схема гиротронного комплекса с непрерывным выходным СВЧ излучением с мощностью $0 \div 5$ кВт на частоте 24 ГГц, а на рис. 2 — его общий вид с обозначениями входящих в его состав основных компонентов. С точки зрения управления гиротронный комплекс принципиально не отличается от аналогичных по назначению СВЧ устройств, работающих в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн. Однако значительное различие их рабочих частот определяет существенное отличие практически всех входящих в их состав компонентов.

2. ГИРОТРОН И МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Используемые в комплексах гиротроны отличаются лишь небольшими конструктивными особенностями от созданных в начале 1970-х годов приборов данного типа, работающих в диапазоне частот $10 \div 40$ ГГц [9]. С целью снижения потребляемой электрической мощности используются гиротроны, работающие на второй гармонике частоты электронного циклотронного резонанса. Из соотношения между частотой генерации f и напряжённостью резонансного статического магнитного поля H в объёме резонатора

$$f = \frac{n}{2\pi} \frac{eH}{mc} \quad (1)$$

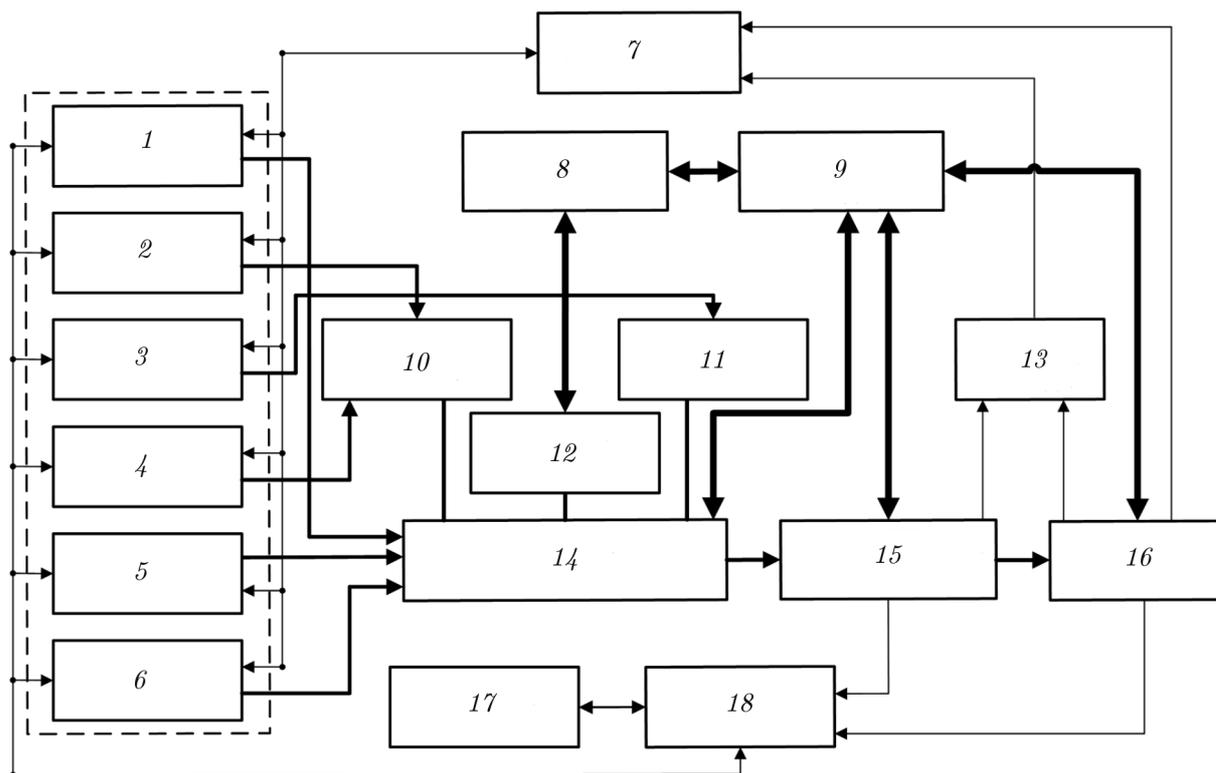


Рис. 1. Блок-схема гиротронного комплекса с мощностью выходного излучения 5 кВт на частоте 24 ГГц: 1–6 — набор источников питания (ИП; 1 — ИП подогревателя катода, 2, 3 и 4 — ИП основного, коллекторного и катодного соленоидов соответственно, 5 — высоковольтный ИП, 6 — ИП ионно-геттерного насоса), 7 — система блокировок и защит, 8 — система масляного охлаждения, 9 — система водяного охлаждения, 10 — катодный соленоид, 11 — коллекторный соленоид, 12 — основной соленоид, 13 — детектор дугового разряда, 14 — гиротрон, 15 — линия транспортировки излучения, 16 — рабочая камера, 17 — управляющий компьютер, 18 — система сбора данных и управления

(n — номер гармоники, e и m — элементарный заряд и масса электрона соответственно, c — скорость света) следует, что для генерации излучения на второй гармонике ($n = 2$) требуется вдвое меньшая напряжённость магнитного поля по сравнению с работой на фундаментальной частоте. Использование второй гармоники гирочастоты позволяет повысить энергетическую эффективность комплекса, упростить конструкцию как создающего рабочее магнитное поле основного соленоида, так и его источника питания, снизить требования к системе охлаждения соленоида и повысить надёжность функционирования комплекса.

Плавное изменение мощности выходного излучения гиротрона достигается согласованным изменением параметров его электропитания — напряжения и тока электронного пучка, а также тока основного соленоида. В качестве примера на рис. 3 приведены графики зависимостей мощности выходного излучения 5-киловаттного гиротрона, работающего на частоте 24 ГГц, от приложенного к катоду гиротрона напряжения и тока электронного пучка. Винтовой электронный пучок в гиротроне создаётся триодной инжекторной пушкой магнетронного типа. Ток электронного пучка регулируется током накала подогревателя катода. Плотность тока электронного пучка, получаемого с катода гиротрона, не превышает 2 А/см^2 при полном токе до 1,0 А. Настройка на максимальную мощность и эффективность генерации при заданных значениях напряжения и тока электронного пучка достигается регулировкой тока основного соленоида.

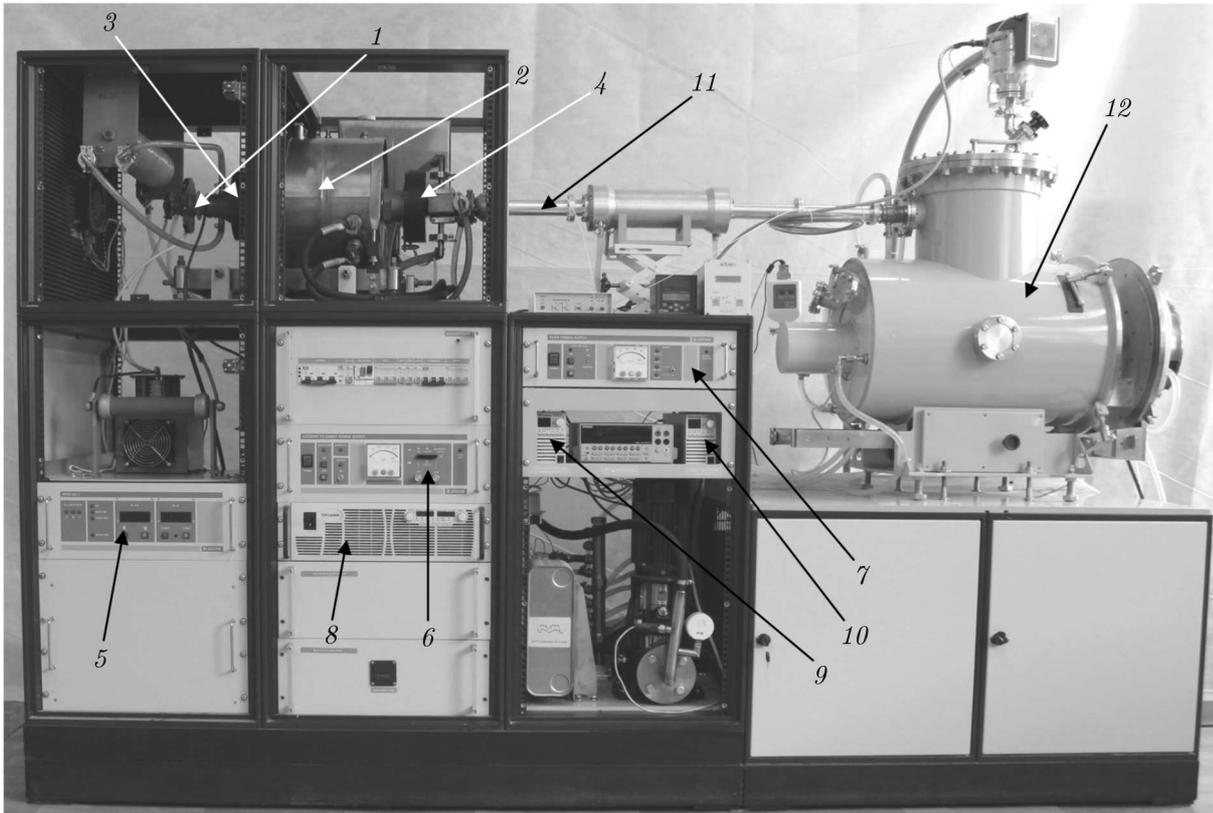


Рис. 2. Фотография гиротронного комплекса с мощностью выходного излучения 5 кВт на частоте 24 ГГц (часть внешних панелей снята): 1 – гиротрон, 2 – основной соленоид, 3 – катодный соленоид, 4 – коллекторный соленоид, 5 – высоковольтный источник питания гиротрона, 6 – источник питания подогревателя катода, 7 – источник питания ионно-геттерного насоса, 8 – источник питания основного соленоида, 9 – источник питания катодного соленоида, 10 – источник питания коллекторного соленоида, 11 – линия транспортировки СВЧ излучения, 12 – рабочая камера

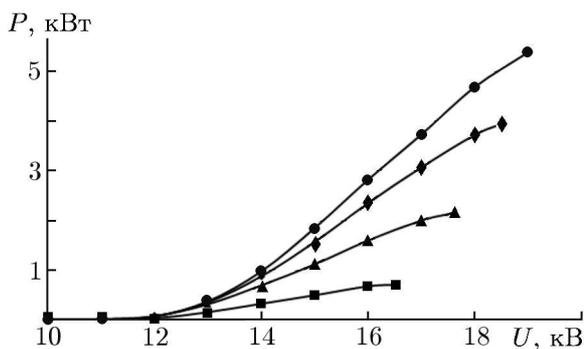


Рис. 3. Зависимость мощности выходного излучения P 5-киловаттного гиротрона, работающего на частоте 24 ГГц, от приложенного к катоду гиротрона напряжения U и тока электронного пучка: символы \blacksquare , \blacktriangle , \blacklozenge и \bullet соответствуют току 0,20; 0,40; 0,60 и 0,75 А

двух дополнительных соленоидов, расположенных в области катода гиротрона (3 на рис. 2) и его коллектора

Основной соленоид (2 на рис. 2) выполнен в виде заключённой в сварной бак из нержавеющей стали многослойной катушки, намотанной прямоугольным медным изолированным проводом, с зазорами между слоями для протока охлаждающей жидкости. Конструкция соленоида и системы его охлаждения обеспечивает создание магнитного поля с напряжённостью $H = 6 \times 10^5$ А/м (т. е. с индукцией $B = 0,75$ Тл) и позволяет использовать его для генерации излучения с частотой до 40 ГГц при работе на второй гармонике гирочастоты. Магнитная система гиротрона, кроме основного соленоида, обеспечивающего резонансное взаимодействие движущихся по винтовым траекториям электронов с электромагнитным полем в резонаторе, содержит два дополни-

(4 на рис. 2). Дополнительные соленоиды выполнены в виде охлаждаемых воздухом многослойных катушек. Катодный соленоид предназначен для формирования винтового электронного пучка с параметрами, обеспечивающими устойчивую и эффективную генерацию СВЧ излучения. Коллекторный соленоид служит для создания оптимальной конфигурации распределения магнитного поля в области оседания электронного пучка на коллекторе и снижения рассеиваемой удельной плотности мощности.

3. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Система электропитания соответствующих устройств гиротронного комплекса постоянным током состоит из следующих элементов:

- 1) высоковольтного источника электропитания (ВИЭП) катода гиротрона (5 на рис. 2), создающего ускоряющее электрическое поле в рабочем промежутке электронной пушки гиротрона;
- 2) источника питания основного соленоида (8 на рис. 2);
- 3) источника питания катодного соленоида (9 на рис. 2);
- 4) источника питания коллекторного соленоида (10 на рис. 2);
- 5) источника питания подогревателя катода гиротрона (6 на рис. 2);
- 6) источника питания встроенного в гиротрон ионно-геттерного насоса (7 на рис. 2).

Наиболее простым и безынерционным методом регулировки мощности выходного излучения гиротрона является изменение напряжения ВИЭП, работающего в режиме источника напряжения. Разработанные и изготавливаемые в ИПФ РАН стабилизированные высоковольтные источники питания выполнены на базе полумостового транзисторного преобразователя напряжения с высокочастотным ёмкостным дозированием передаваемой в нагрузку энергии и трансформаторным выходом [14]. Коэффициент пульсаций напряжения на выходе источника в рабочем диапазоне не превышает 0,5% при запасаемой в выходном ёмкостном фильтре энергии не более 10 Дж. Относительное отклонение напряжения на выходе от заданного значения не превышает 0,5%. Напряжение на выходе ВИЭП плавно, с точностью ± 10 В, регулируется в интервалах от -5 до -15 кВ. Высокая стабильность напряжения на выходе ВИЭП обеспечивает регулировку и поддержание мощности микроволнового излучения гиротрона с точностью не хуже, чем ± 50 Вт во всём диапазоне его генерации.

Создающий основное магнитное поле соленоид питается от источника постоянного тока GENESYS 100-100 производства компании TDK-Lambda Americas Inc., США, с мощностью 10 кВт. Источник характеризуется высокой стабильностью (0,05%) тока на выходе, необходимой для обеспечения стабильной генерации СВЧ излучения, и высокой эффективностью (более 90%).

Дополнительные, катодный и коллекторный, соленоиды питаются от источников постоянного тока ZUP 20-10 производства компании TDK-Lambda Americas Inc., США, с мощностью 200 Вт и регулируемым током на выходе $0 \div 10$ А.

Источник питания подогревателя катода обеспечивает регулировку тока электронного пучка гиротрона за счёт плавного изменения тока подогревателя термокатода в диапазоне $0 \div 35$ А при напряжении от 1 до 12 В. При этом ток электронного пучка изменяется в диапазоне $0 \div 1$ А. Источник питания подогревателя катода осуществляет также релейную стабилизацию тока электронного пучка гиротрона путём автоматического регулирования тока подогревателя термокатода. При превышении током электронного пучка гиротрона заданного значения ток подогревателя термокатода снижается за счёт соответствующего изменения частоты работы транзисторного преобразователя источника питания.

Управление выходными параметрами всех источников питания может осуществляться как вручную с передней панели приборов, так и дистанционно с компьютера системы управления гиротронным комплексом.

4. СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ КОМПЛЕКСА

Несущие тепловые нагрузки элементы комплекса охлаждаются проточной водой. Охлаждаемыми элементами гиротрона являются коллектор, резонатор, анод и выходное окно. Охлаждение основного соленоида осуществляется по двухконтурной схеме. Внутренний, охлаждаемый трансформаторным маслом, контур состоит из основного соленоида, масляной помпы и масляно-водяного теплообменника. Выделяемое в соленоиде тепло снимается в теплообменнике водяным потоком. Вода на ВИЭП и на калориметрический измеритель мощности СВЧ излучения подаётся по отдельным каналам системы охлаждения. Также по отдельным каналам охлаждающая вода поступает на элементы линии преобразования и транспортировки излучения и на элементы рабочей камеры. Общий расход воды составляет $2,5 \text{ м}^3/\text{час}$ при её давлении в подводящей магистрали $3 \div 4 \text{ атм}$.

В линиях водяного и масляного охлаждения установлены электронные датчики протока и температуры охлаждающих жидкостей. Контактные группы реле измерительных модулей всех датчиков включены в общую схему автоматизированной системы управления и защиты комплекса. В случае выхода в процессе работы комплекса величин температур и расходов охлаждающих жидкостей за установленные при его наладке номинальные значения происходит автоматическое отключение соответствующих источников питания.

5. ЛИНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Линия преобразования и транспортировки излучения комплекса (11 на рис. 2) служит для преобразования пространственной структуры выходного излучения гиротрона, его транспортировки в рабочую камеру и обеспечения СВЧ развязки между гиротроном и рабочей камерой [15]. Рабочей модой гиротрона в комплексе с выходной частотой 24 ГГц является волна TE_{12} круглого волновода. Коэффициент передачи СВЧ излучения от гиротрона до рабочей камеры составляет не менее 0,98, относительная ширина полосы пропускания превышает 3 %.

Линия выполнена на основе круглого многомодового волновода с внутренним диаметром 32,6 мм и состоит из следующих основных элементов:

- 1) преобразователя мод, трансформирующего рабочую моду гиротрона в моду TE_{01} с целью обеспечения минимальных потерь мощности в линии передачи при транспортировке излучения к рабочей камере;
- 2) поляризатора, служащего для преобразования волны с круговой поляризацией в линейно поляризованную волну;
- 3) модового фильтра, обеспечивающего защиту гиротрона от излучения, выходящего из рабочей камеры.

В состав линии также может входить двунаправленный ответвитель СВЧ мощности. В этом случае измерение мощности ответвлённой проходящей волны осуществляется термическим измерителем мощности.

Одной из наиболее важных проблем конструирования линии транспортировки излучения является обеспечение минимальной мощности излучения, отражённого от рабочей камеры к гиротрону. При нагреве внутри рабочей камеры различных объектов СВЧ излучением имеет место значительное изменение уровня отражённого излучения от процесса к процессу, связанное

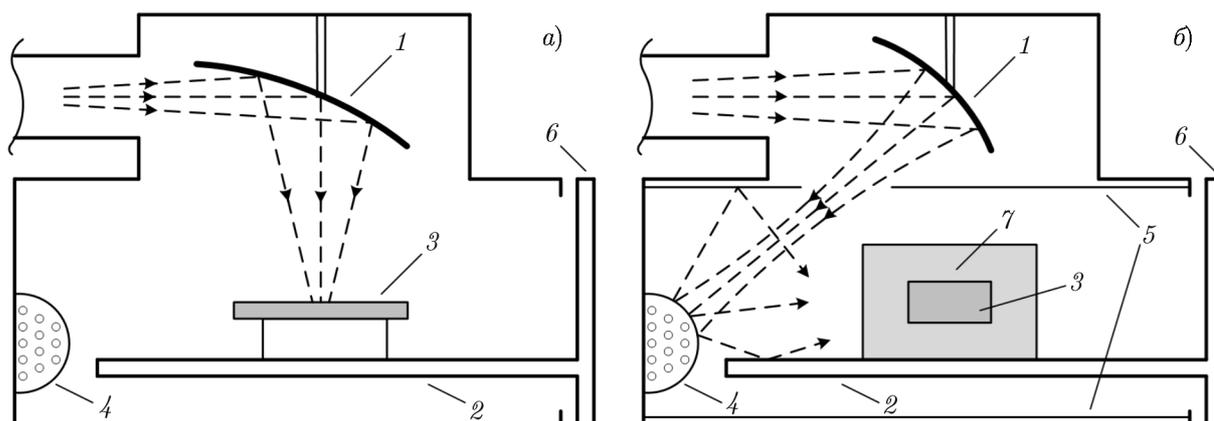


Рис. 4. Схематическое изображение рабочей камеры гиротронного комплекса при поверхностном (а) и объёмном (б) нагревах: 1 — фокусирующее зеркало, 2 — рабочий стол, 3 — нагреваемый образец, 4 — рассеиватель излучения, 5 — пятигранная вставка, 6 — дверь камеры, 7 — теплоизоляция

с различиями в загрузке камеры. Кроме того, в ходе каждого нагрева уровень отражённого излучения непостоянен вследствие изменения диэлектрических свойств обрабатываемых объектов. Принцип работы используемого в гиротронном комплексе модового фильтра основан на различии пространственных структур полей поступающей от гиротрона прямой проходящей волны и волн, возбуждаемых в многомодовой линии транспортировки выходящим из рабочей камеры излучением. В линиях транспортировки моды TE_{01} используются либо кольцевые, либо щелевые (в сочетании с поляризатором поля прямой волны) фильтры.

6. РАБОЧАЯ КАМЕРА

Изготовленная из нержавеющей стали водоохлаждаемая рабочая камера (12 на рис. 2), схематично изображённая на рис. 4, имеет внутренний диаметр 40 см и длину 60 см. Излучение поступает в верхний отсек камеры через вакуумно-плотное входное окно в виде слабо расходящегося волнового пучка. Конструкция камеры позволяет выполнять как объёмный, так и поверхностный нагрев образцов при использовании одного из двух сменных зеркал, устанавливаемых в верхнем отсеке камеры. В случае проведения процесса, основанного на нагреве поверхности обрабатываемого изделия, например наплавки материала, на юстировочное устройство устанавливается зеркало (1 на рис. 4а), обеспечивающее фокусировку волнового пучка в центр рабочей камеры. Минимальное поперечное сечение волнового пучка в фокальной плоскости зеркала, расположенной на высоте 12 см от поверхности рабочего стола (2 на рис. 4), составляет 10 см^2 по уровню интенсивности излучения $\exp(-1)$.

Процессы, основанные на объёмном нагреве, например спекание керамических материалов, требуют, как правило, обеспечения максимально однородного распределения интенсивности СВЧ излучения в объёме рабочей камеры. Создание квазиоднородного распределения плотности электромагнитной энергии в достаточно больших объёмах пространства является необходимой предпосылкой для равномерного СВЧ нагрева изделий больших размеров и сложной формы, что представляет особый интерес в первую очередь для решения таких задач, как спекание и соединение керамических и композиционных материалов. Камера гиротронного комплекса с точки зрения электродинамики представляет собой сверхразмерный в масштабах длины волны λ излучения ненастроенный резонатор с отношением его характерного размера L к длине волны

порядка 50. Квазиоднородное пространственное распределение плотности энергии СВЧ излучения достигается за счёт суперпозиции электромагнитных полей большого числа одновременно возбуждаемых мод. Чтобы избежать образования стоячей структуры поля в результате суперпозиции полей различных мод, на задней торцевой стенке камеры располагается рассеиватель излучения (4 на рис. 4б), выполненный в виде вращающейся металлической полусферы. Последняя имеет нерегулярную поверхность с целью придания хаотического направления отражённым от неё волнам. Съёмная металлическая вставка в форме пятигранной призмы (5 на рис. 4б) обеспечивает дополнительное выравнивание пространственного распределения интенсивности СВЧ поля в рабочей камере за счёт хаотизации направления распространения волн, отражённых от стенок вставки.

Показателем эффективности использования СВЧ излучения является соотношение между мощностью излучения, поглощаемого в объёме обрабатываемого материала, и мощностью излучения, поступающего на вход камеры. Для СВЧ камеры (резонатора) заданного размера L нетрудно получить соотношение, связывающее между собой диэлектрические свойства материалов и характерные размеры изделий l , при выполнении которого заданная доля энергии поступающего в резонатор СВЧ излучения поглощается в обрабатываемом материале. Доля энергии η , поглощаемой в материале, может быть оценена как

$$\eta = \frac{Q}{Q_{\text{sample}}}, \quad \frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{ohm}}} + \frac{1}{Q_{\text{coupling}}} + \frac{1}{Q_{\text{sample}}}, \quad (2)$$

где Q — нагруженная добротность резонатора, Q_{ohm} , Q_{coupling} и Q_{sample} — добротности резонатора, определяемые омическими потерями в его стенках, потерями, связанными с выходом излучения из резонатора через отверстие связи и потерями, обусловленными поглощением излучения в образце, соответственно [16]. Величины добротностей, входящих в формулу (2), можно оценить следующим образом [16, 17]:

$$Q_{\text{ohm}} = \frac{V_{\text{res}}}{S_{\text{res}} \delta_s}, \quad (3)$$

$$Q_{\text{coupling}} = \frac{8\pi V_{\text{res}}}{\lambda S_{\text{coupling}}}, \quad (4)$$

$$Q_{\text{sample}} = \frac{V_{\text{res}}}{8\pi \epsilon' V_{\text{sample}} \text{tg } \delta}, \quad (5)$$

где V_{res} — объём резонатора, S_{res} — площадь его поверхности, $\delta_s = c/\sqrt{2\pi\omega\sigma}$ — толщина скин-слоя, σ — удельная проводимость материала стенок камеры, λ — длина волны излучения, S_{coupling} — площадь отверстия связи, ϵ' — действительная часть диэлектрической проницаемости обрабатываемого материала, $\text{tg } \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь, V_{sample} — объём обрабатываемого материала, $\omega = 2\pi f$.

На рис. 5 приведены результаты расчётов эффективности использования η СВЧ излучения в зависимости от объёма образца V_{sample} при значениях параметров, характерных для описываемой рабочей камеры: $\lambda = 1,25$ см, $V_{\text{res}} = 57000$ см³, $S_{\text{res}} = 9000$ см², $\sigma = 1,5 \cdot 10^7$ Ом⁻¹ · м⁻¹, $S_{\text{coupling}} = 20$ см², и при различных коэффициентах поглощения СВЧ излучения материалом образца ($\epsilon' = 10$, $\text{tg } \delta = 10^{-3}$, 10^{-2} , 10^{-1}). Результаты расчёта позволяют оценить оптимальные величины загрузки камеры для материалов с заданными диэлектрическими свойствами либо материалов с известным характером зависимости их диэлектрических свойств от температуры. Отметим, что приведённые на рис. 5 графики дают лишь качественное представление об эффективности использования СВЧ излучения в рабочей камере комплекса, т. к. при их расчёте не учитываются зависимости параметров σ и ϵ' от температуры и предполагается однородное распределение плотности СВЧ излучения в объёме камеры.

На выдвижном люке рабочей камеры располагается диагностический фланец, через который могут вводиться четыре пары термпарных выводов. Сверхвысокочастотные и вакуумноплотные порты камеры позволяют использовать волоконно-оптические датчики температуры и электрически изолированные вводы. Для визуального наблюдения за происходящими в камере процессами либо для проведения оптических измерений она снабжена тремя портами, защищёнными от утечки СВЧ излучения. На корпусе камеры располагается штуцер для откачки газа и её наполнения рабочим газом. Диапазон рабочих давлений в камере составляет $10^{-7} \div 2$ атм.

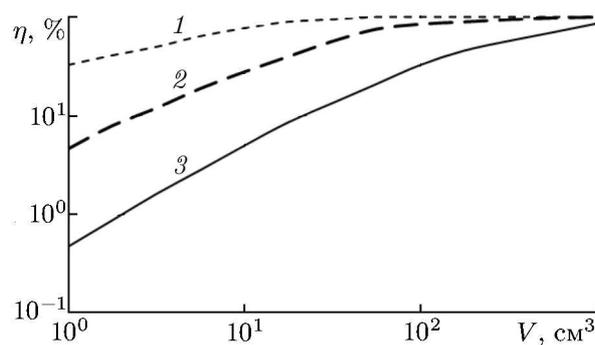


Рис. 5. Зависимости эффективности нагрева η от объёма нагреваемого образца V при $\operatorname{tg} \delta = 10^{-3}$ (кривая 1), 10^{-2} (2) и 10^{-1} (3)

7. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

Автоматизированная система управления и защиты гиротронного комплекса представляет собой совокупность аппаратных и программных средств, призванных обеспечить как взаимодействие его различных компонентов между собой, так и операторский интерфейс дистанционного управления комплексом в целом.

Основными задачами автоматизированной системы управления и защиты гиротронного комплекса являются:

- 1) обеспечение безопасной и безаварийной работы комплекса;
- 2) управление в автоматическом режиме мощностью выходного излучения гиротрона в соответствии с заданным оператором изменением во времени основного параметра проводимого процесса (температуры нагреваемого материала, мощности выходного излучения и т. д.);
- 3) сбор, отображение и протоколирование основных параметров работы гиротронного комплекса и проводимого процесса.

Частью автоматизированной системы управления и защиты гиротронного комплекса, отвечающей за его безопасную и безаварийную работу, является система блокировок и защит. Она выполнена на основе автономного программируемого контроллера, снабжённого соответствующими модулями ввода и вывода сигналов. Каналы модулей ввода связаны с датчиками, определяющими текущие значения контролируемых параметров компонентов комплекса. Каналы модулей вывода, в свою очередь, связаны со входами различных исполнительных устройств комплекса. Контроллер запрограммирован в соответствии с заданным алгоритмом работы комплекса, отражающим полный набор взаимозависимостей входящих в состав комплекса компонентов. Контроллер функционирует независимо от управляющего работой комплекса компьютера, однако связан с ним для обеспечения возможности отображения, протоколирования и архивирования текущего состояния компонентов гиротронного комплекса. В основе алгоритма лежит совокупность операций, обеспечивающих последовательный ввод в действие всех элементов комплекса, включая источники питания. Автоматическое отключение источников питания происходит в случае отклонений от номинального режима в работе системы охлаждения, отказа любого из источников питания, открывания дверей комплекса, а также возникновения внештатной ситуации в работе компонентов рабочей камеры. Эти меры призваны обеспечить долговременное надёжное функционирование комплекса, входящего в его состав оборудования и безопасность его эксплуатации.

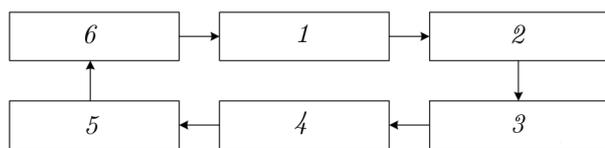


Рис. 6. Блок-схема системы автоматического управления мощностью выходного излучения гиротрона: 1 — гиротрон, 2 — рабочая камера, 3 — датчик основного параметра процесса, 4 — система сбора данных, 5 — управляющий компьютер, 6 — высоковольтный источник питания

Её автоматическую регулировку согласно заранее заданному режиму и алгоритму выполняемого процесса, приведена на рис. 6. Элементами данной системы являются гиротрон, датчик основного параметра процесса, система сбора данных, управляющий компьютер и ВИЭП. Специализированное программное обеспечение системы управления позволяет оператору задавать необходимую зависимость от времени поведения основного параметра в ходе проведения процесса. Во время проведения процесса текущее значение его измеряемого основного параметра сравнивается с предварительно заданным на данный момент времени значением. На основании сигнала рассогласования с использованием пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) алгоритма вырабатываются сигналы управления высоковольтным источником питания гиротрона, и последующая вариация катодного напряжения гиротрона приводит к изменению мощности его выходного излучения, минимизирующему сигнал рассогласования в системе сравнения. Минимальное отклонение реальной величины основного параметра от заданной на данный момент времени определяется не только возможностями системы управления в силу зависимости данного отклонения от многих факторов, таких как характеристики регистрирующего величину основного параметра датчика, свойства объекта и условия СВЧ воздействия. Для устранения неустойчивостей, связанных с нестабильностями и ошибками измерения сигналов, в систему управления введена возможность использования программных фильтров каждого из элементов ПИД регулятора — пропорционального, интегрального и дифференциального. Основные параметры ПИД регулятора: коэффициент пропорциональности, время интегрирования, время дифференцирования, время фильтрации сигнала, частота актов сравнения — могут варьироваться оператором во время процесса микроволновой обработки. Система управления предусматривает возможность перехода на ручное управление процессом и обратный переход в автоматический режим в любой момент времени.

Одновременно с регистрацией реального хода изменения основного параметра процесса проводится измерение значений питающих напряжений и текущей мощности СВЧ излучения, которое поступает с устройства, осуществляющего её мониторинг. Такой мониторинг позволяет проводить процессы, задавая в качестве основного параметра для процесса управления зависимость мощности излучения от времени. Информация о ходе выполнения процесса в виде дискретного набора данных о величине основного параметра процесса, питающих напряжениях, мощности СВЧ излучения и других регистрируемых многоканальной системой сбора данных величинах отображается в реальном времени на дисплее управляющего компьютера и архивируется на жёстком диске компьютера. На рис. 7 в качестве примера показан снимок экрана компьютера с основным окном программы управления гиротронным комплексом при нагреве керамического образца Al_2O_3 с постоянной скоростью $50^\circ C/мин$. Основное окно управляющей программы содержит как элементы дистанционного управления компонентами комплекса, включая источники

Многоканальная система сбора данных обеспечивает получение информации о текущих параметрах функционирования различных компонентов гиротронного комплекса и измеряемых параметрах объекта воздействия СВЧ излучения. Система сбора данных предусматривает расширение перечня регистрируемых параметров за счёт наличия резервных каналов, к которым возможно подключение аналоговых сигналов с дополнительного оборудования.

Блок-схема системы управления мощностью выходного излучения гиротрона, обеспечиваю-

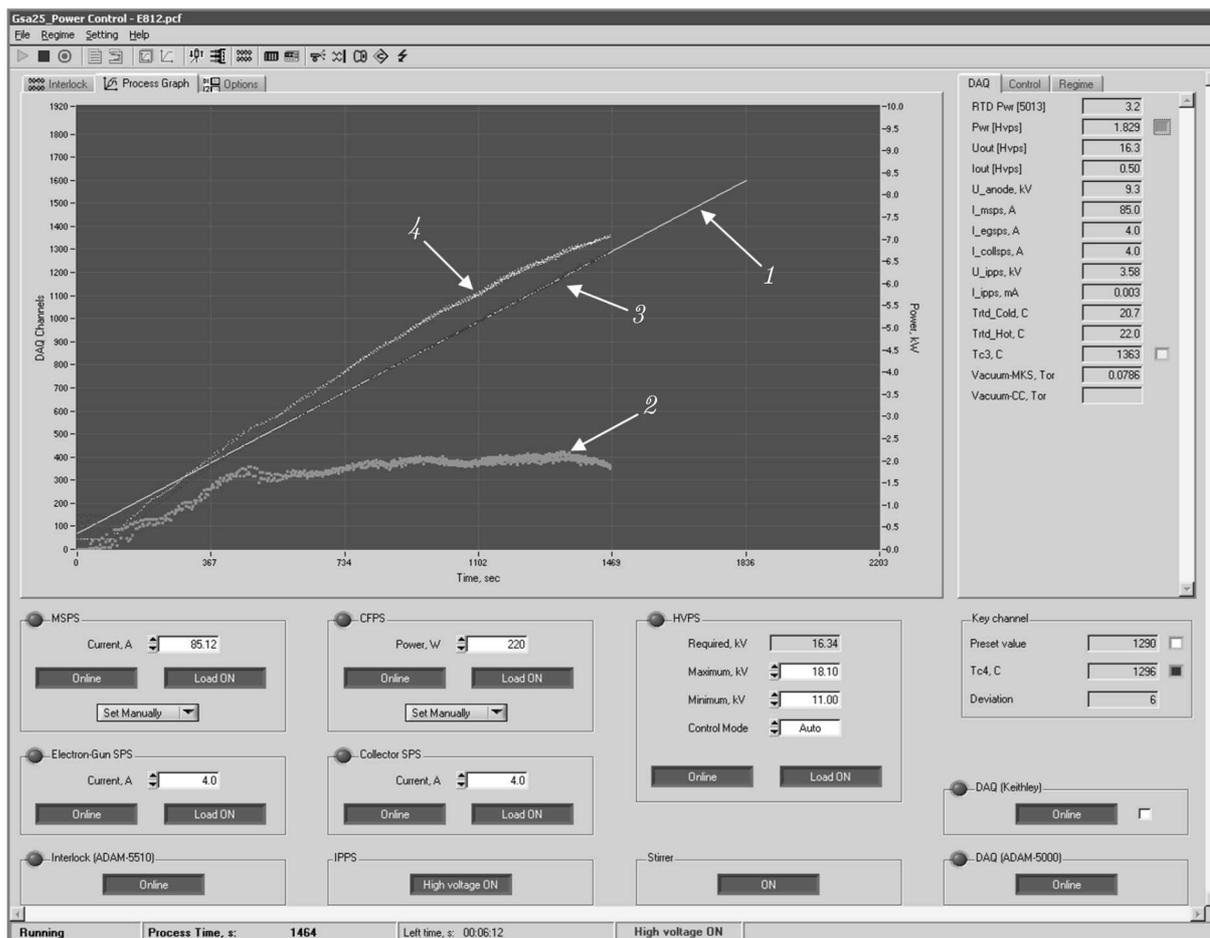


Рис. 7. Основное окно управляющей программы, отображающее текущее состояние процесса СВЧ обработки керамического образца Al_2O_3 с постоянной скоростью нагрева $50^\circ\text{C}/\text{мин}$: 1 — заданная зависимость от времени основного параметра процесса — температуры поверхности образца, 2 — уровень мощности выходного СВЧ излучения, 3 и 4 — регистрируемые температуры поверхности и центра образца соответственно

питания, так и текущую информацию о характеризующих работу комплекса параметрах и величинах, позволяющих судить о нагреве материала. Специализированное программное обеспечение системы управления гиротронным комплексом позволяет оператору выбирать регистрируемые и отображаемые параметры функционирования компонентов гиротронного комплекса и параметры объекта воздействия СВЧ излучения. Любой из параметров, регистрируемых многоканальной системой сбора данных автоматизированной системы управления и защиты гиротронного комплекса, может по выбору оператора отображаться в основном окне управляющей программы как в виде мгновенного значения, так и в виде графика зависимости от времени проведения процесса.

Как видно из рис. 7, заданная зависимость от времени основного параметра процесса — температуры поверхности образца (1 на рис. 7) — автоматически поддерживается системой управления за счёт изменения мощности выходного излучения гиротрона (2 на рис. 7). Отклонение регистрируемой в ходе нагрева температуры поверхности образца (3 на рис. 7) от заданной на протяжении всего времени реализации процесса микроволновой обработки не превышает $\pm 10^\circ\text{C}$ (не более $\pm 2\%$ на высокотемпературной стадии нагрева). Регистрация и отображение изменения во времени температуры центра образца (4 на рис. 7), в дополнение к температуре его поверхно-

сти, позволяет в реальном времени наблюдать перепад температуры на образце в процессе его микроволнового нагрева.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специализированные гиротронные комплексы являются удобным для пользователя инструментом проведения экспериментов с применением излучения миллиметрового диапазона длин волн мощностью до нескольких десятков киловатт, благодаря чему они нашли широкое применение в различных областях фундаментальных и прикладных исследований. Универсальность построения гиротронных комплексов позволяет достигать максимального соответствия реализуемых возможностей требованиям пользователя за счёт модификации отдельных входящих в их состав компонентов при сохранении общей структуры. Примерами перспективных направлений дальнейшего развития специализированных гиротронных комплексов, диктуемых запросами пользователей, являются оснащение рабочей камеры устройствами оптического видеонаблюдения и фиксации в реальном времени эволюции параметров объекта микроволновой обработки, а также использование гиротронов с перестройкой частоты генерируемого излучения для повышения однородности распределения его плотности мощности в рабочей камере и, как следствие, однородности температурного распределения в объёме объекта обработки.

Некоторые результаты использования гиротронного комплекса с мощностью выходного излучения 5 кВт на частоте 24 ГГц в исследованиях высокотемпературных процессов в поликристаллических диэлектриках при воздействии на них излучения миллиметрового диапазона будут приведены во второй части данной работы [13].

Работа выполнена за счёт субсидии на выполнение государственного задания ИПФ РАН (проект 0035–2014–0024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bykov Yu. V., Semenov V. E. // *Appl. High-Power Microwaves* / ed. by A. V. Gaponov-Grekhov and V. L. Granatstein. Norwood: Artech House, 1994. P. 319.
2. Bykov Yu. V., Egorov S. V., Ereemeev A. G., et al. // *J. Materials Proc. Technol.* 2014. V. 214, No. 2. P. 210.
3. Bykov Yu. V., Egorov S. V., Ereemeev A. G., et al. // *Materials.* 2016. V. 9. P. 684.
4. Егоров С. В., Быков Ю. В., Еремеев А. Г. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2016. Т. 59, № 8–9. С. 769.
5. Mahmoud M., Link G., Jelonnek J., Thumm M. // *EPJ Web Conf.* 2017. V. 149. Art. no. 02007.
6. Vikharev A. L., Gorbachev A. M., Kozlov A. V., et al. // *Diamond and Related Materials.* 2006. V. 15. P. 502.
7. Vodopyanov A. V., Golubev S. V., Mansfeld D. A., et al. // *Rev. Sci. Instr.* 2011. V. 82. Art. no. 063503.
8. Zhao H. W., Lu W., Zhang X. Z., et al. // *Rev. Sci. Instr.* 2012. V. 83. Art. no. 02A320.
9. Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., et al. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2004. V. 32, No. 1. P. 67.
10. Soluyanov E. A., Bykov Yu. V., Chirkov A. V., et al. // *Proc. 8th Int. Workshop «Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications», 9–16 July, 2011, Nizhny Novgorod,* P. 133.
11. Tsvetkov A., Ereemeev A., Kholoptsev V., et al. // *42 Int. Conf. Infrared, Millimeter Terahertz Waves. 27 August–01 September 2017, Cancún.* Art. no. 8067065.

12. Samsonov S. V., Denisov G. G., Gachev I. G., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. V. 59. P. 2 250.
13. Быков Ю. В., Егоров С. В., Еремеев А. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. (в печати).
14. Kopelovich E. A., Novikov A. U., Razumov A. G., et al. // Proc. 8-th IEEE Int. Vacuum Electron. Conf. Kitakyushu, Japan, 15–17 May, 2007. P. 339.
15. Bogdashov A., Denisov G., Kalynova G. // Quasi-Optical Control of Intense Microwave Transmission. NATO Sci. Series, II. V. 203 / ed. by J. L. Hirshfield and M. I. Petelin. Dordrecht: Springer, 2005. P. 15.
16. Kimrey H. D., Janney M. A. // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. V. 124. Microwave Processing of Materials. 1988. P. 367.
17. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.

Поступила в редакцию 9 июля 2018 г.; принята в печать 23 октября 2018 г.

MILLIMETER-WAVE GYROTRON RESEARCH SYSTEM. I. DESCRIPTION OF THE SETUP

*Yu. V. Bykov, A. G. Eremeev, M. Yu. Glyavin, G. G. Denisov, G. I. Kalynova, E. A. Kopelovich,
A. G. Luchinin, I. V. Plotnikov, M. D. Proyavin, M. M. Troitskiy, and V. V. Kholoptsev*

We describe a series of gyrotron setups developed at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS) for studying physical processes during interaction of millimeter-wave electromagnetic radiation and matter. This paper presents the universal principle of designing such setups on the basis of a setup having an output radiation power of 5 kW at a frequency of 24 GHz. The main components of the setup are described, and their technical parameters, specified. Designing of high-efficiency radiation sources and radiation transmission lines for various research applications is a sophisticated radiophysical problem, and the need for long-term stable operation with automatic adjustment of the parameters of the generation regime requires unique engineering solutions. Application of multimode electrodynamic devices in the radiation transmission line allows one to treat materials with significantly different dielectric properties, in particular, heat them up to temperatures of about (and exceeding) 2000°C. The vacuum-tight working chamber of the setup is a high-Q untuned cavity having a volume of about 0.1 m³, in which microwave heating of items with characteristic sizes of more than 10 cm can be performed. The automatic control system of the setup ensures its reliable and long-term failure-free operation.