

УДК 621.396.96

МОЩНЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ГИРОТРОН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН НА ВТОРОЙ ЦИКЛОТРОННОЙ ГАРМОНИКЕ

Н. А. Завольский, Е. В. Иляков, Ю. К. Калынов, И. С. Кулагин, В. Н. Мануилов, А. С. Шевченко*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку импульсных гиротронов на релятивистских электронных пучках для диапазона миллиметровых длин волн с сохранением мультимегаваттного уровня мощности. Использование взаимодействия на второй гармонике гирочастоты, для которого свойственны достаточно высокая эффективность и доступность решения проблемы селекции мод, позволяет увеличить частоту генерации вдвое без повышения индукции магнитного поля. В соответствующем эксперименте получена мощность выходного излучения свыше 2 МВт и коэффициент полезного действия около 30 % на длине волны 5,5 мм.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время гиротроны являются самыми эффективными источниками мощного сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения миллиметрового диапазона длин волн. В пределах слабoreлятивистского диапазона энергий электронов (менее 100 кэВ) максимальный на данное время достигнутый уровень мощности составил $2,0 \div 2,2$ МВт [1–3]. Однако возможности слабoreлятивистских гиротронов по наращиванию мощности близки к пределу [4], в частности из-за существенного влияния «провисания» потенциала винтового электронного пучка. Естественным способом повышения мощности является увеличение энергии электронов и связанное с этим наращивание тока. Так, в работах [5, 6] были реализованы релятивистские гиротроны мультимегаваттного уровня мощности с длиной волны 3 см и 8 мм при энергии частиц 300 и 900 кэВ с коэффициентом полезного действия (КПД) 20 % и 6 % соответственно. В теоретических работах [7, 8] было показано, что КПД гиротрона остаётся достаточно высоким и в области умеренного релятивизма (200 ÷ 500 кэВ). Эти результаты были подтверждены экспериментально: получены КПД 35 % (при мощности 1,2 МВт на длине волны 1,5 см) [9], КПД 45 % (7 МВт на длине волны 3 см) [10], КПД 50 % (10 МВт на длине волны 1 см) [11] и КПД 25 % (2,5 МВт на длине волны 4,4 мм) [12].

В настоящее время продолжают исследования, направленные на разработку гиротронов на релятивистских электронных пучках для миллиметрового диапазона длин волн с сохранением мультимегаваттного уровня мощности [13]. Они мотивированы тем, что электромагнитное излучение с такой мощностью перспективно к применению в ряде развивающихся научных и технических приложений. Оптимистичный прогноз в освоении больших мощностей основывается на отличительном свойстве гирорезонансных приборов — их способности работать с электродинамическими системами, поперечный размер которых в несколько раз больше длины волны излучения, что упрощает решение проблем электропрочности и формирования пучков с большими токами [14]. Несмотря на выигрыш в мощности активной среды при переходе в умеренно релятивистский диапазон, гиротрон становится менее коротковолновым из-за роста массы электронов

* ilyakov@appl.sci-nnov.ru

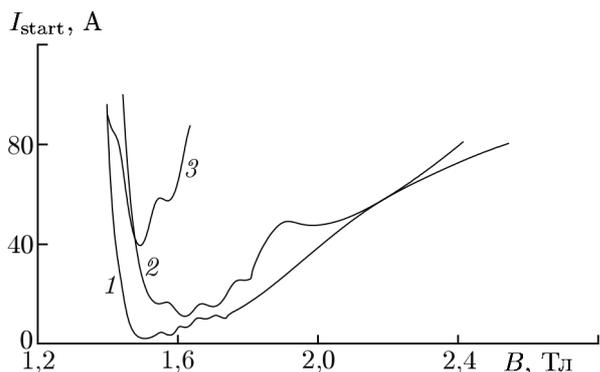


Рис. 1. Расчётные стартовые токи I_{start} моды $\text{TE}_{11,2}$ на второй циклотронной гармонике (кривая 1) и ближайших паразитных мод $\text{TE}_{4,2}$ (2) и $\text{TE}_{7,1}$ (3) на основном циклотронном резонансе в зависимости от индукции магнитного поля B . Напряжение $U = 280$ кВ

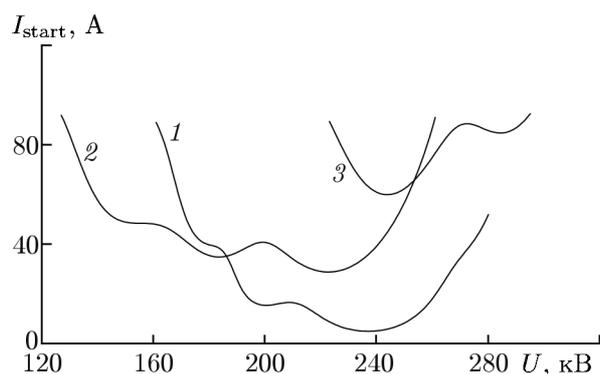


Рис. 2. Расчётные стартовые токи моды $\text{TE}_{11,2}$ на второй циклотронной гармонике (кривая 1) и ближайших паразитных мод $\text{TE}_{4,2}$ (2) и $\text{TE}_{7,1}$ (3) на основном циклотронном резонансе в зависимости от напряжения U . Магнитное поле $B = 1,4$ Тл

и убывания циклотронной частоты при заданной величине магнитного поля. Использование взаимодействия на второй гармонике гирочастоты, для которого свойственны достаточно высокая эффективность и доступность решения проблемы селекции мод, позволяет увеличить частоту генерации вдвое без повышения индукции магнитного поля и использовать релятивистский гиротрон в миллиметровом диапазоне длин волн.

1. ВЫБОР РАБОЧЕЙ МОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При расчёте гиротрона на второй гармонике гирочастоты использовалась нестационарная модель взаимодействия с нефиксированной структурой высокочастотного поля, а параметры винтового электронного пучка выбирались близкими к приведённым в статье [11] для гиротрона с рабочей волной на основной гармонике (энергия электронов 280 кэВ, диаметр пучка 18 мм, пич-фактор 1,3, разброс по поперечным скоростям 20 % при величине магнитного поля 1,4 Тл). Выбор в качестве рабочей моды на второй гармонике гирочастоты означает переход в частотный диапазон, где плотность мод существенно выше, чем на основной гармонике. Чтобы иметь возможность возбуждать рабочую моду селективно, следует выбирать её так, чтобы в её окрестности стартовые токи паразитных мод были относительно высоки.

Исходя из таких предпосылок был разработан проект релятивистского гиротрона с резонатором, рассчитанным на работу на второй гармонике гирочастоты, на волне $\text{TE}_{11,2}$. В данном гиротроне подобрана область параметров, в которой рабочая мода при определённой величине магнитного поля (см. рис. 1) имеет существенное преимущество по стартовому току перед конкурирующими модами на основной циклотронной гармонике не только в максимуме импульса ускоряющего напряжения, но и на его фронте (см. рис. 2). Это позволит не допустить на достаточно протяжённом фронте питающего импульса более раннего возбуждения паразитных мод, которые при достижении расчётных параметров пучка продолжают своё существование, подавляя рабочую моду [15]. Длина резонатора выбрана равной $L_r = 40$ мм, что обеспечит расчётный КПД 28 % (см. рис. 3).

Результаты численного моделирования показывают, что в проектируемом гиротроне при заданном магнитном поле $1,4 \div 1,5$ Тл стартовый ток рабочей моды составляет 5 А, в то время как

у паразитных мод он превышает 30 А (см. рис. 1). При расчётном КПД 28 % уровень мощности выходного излучения может достигать 5 МВт на длине волны 5,5 мм (см. рис. 3). При таком уровне мощности максимальная напряжённость электрических полей не превысит 120 кВ/см, что заметно меньше достигнутых нами ранее в релятивистской лампе обратной волны предельных полей (200 кВ/см), при которых удалось избежать СВЧ пробоев [16].

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И УСЛОВИЯ ЕГО ПРОВЕДЕНИЯ

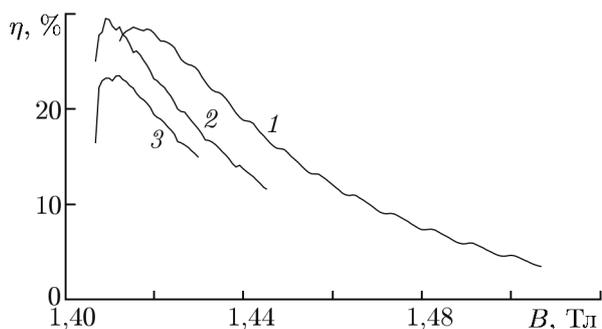


Рис. 3. Расчётная зависимость КПД гиротрона η от магнитного поля B для трёх длин резонатора L_r : 40 мм (кривая 1); 50 мм (2); 60 мм (3). Ток равен $I = 80$ А

Эксперименты проводились на сильноточном микросекундном электронном ускорителе «Сатурн-Д» с термоэмиссионным инжектором на базе магнетронно-инжекторной пушки, формирующей пучки с энергией электронов до 350 кэВ, током до 300 А, длительностью импульса до 10 мкс [17]. Схема эксперимента приведена на рис. 4. С целью предотвращения развития СВЧ пробоя резонатор гиротрона изготавливался из бескислородной меди и поддерживался во время работы СВЧ прибора при температуре $400^\circ \div 600^\circ\text{C}$ для устранения адсорбированных молекул [16]. Для предотвращения паразитной генерации во входной части канала транспортировки, которая может нарушать нормальную работу прибора, в том числе приводить к развитию СВЧ и высоковольтных пробоев в электронной пушке, во входном конусе размещались СВЧ поглотители (10 на рис. 4). В исследованиях релятивистского гиротрона 8-миллиметрового диапазона длин волн применение таких поглотителей позволило повысить ток транспортировки и пичч-фактор электронного пучка и соответственно, мощность выходного излучения гиротрона [18]. Выходной

которая может нарушать нормальную работу прибора, в том числе приводить к развитию СВЧ и высоковольтных пробоев в электронной пушке, во входном конусе размещались СВЧ поглотители (10 на рис. 4). В исследованиях релятивистского гиротрона 8-миллиметрового диапазона длин волн применение таких поглотителей позволило повысить ток транспортировки и пичч-фактор электронного пучка и соответственно, мощность выходного излучения гиротрона [18]. Выходной

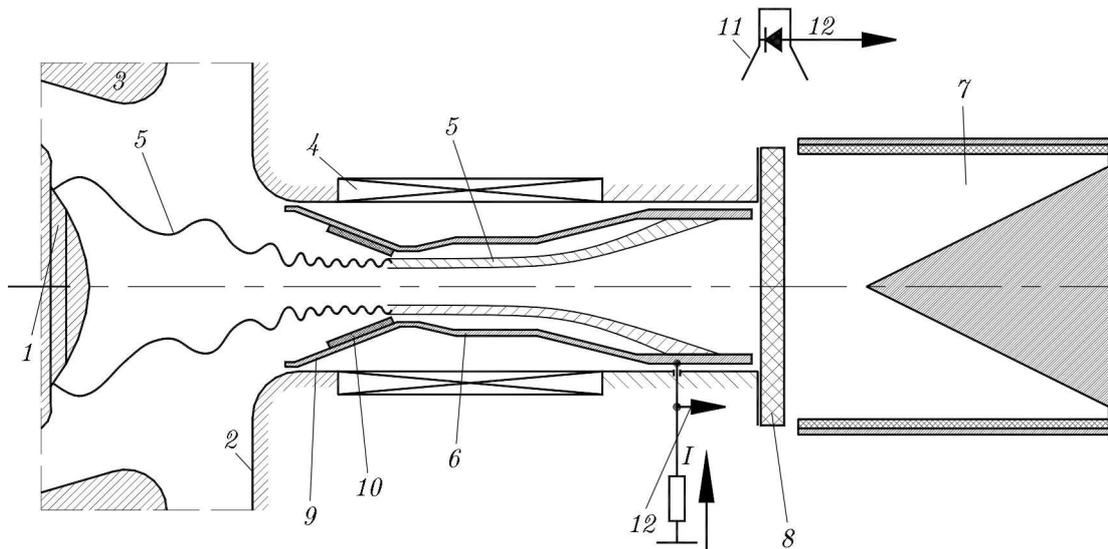


Рис. 4. Схема эксперимента: 1 — катод, 2 — анод, 3 — промежуточный анод, 4 — соленоид, 5 — винтовой электронный пучок, 6 — резонатор гиротрона, 7 — калориметр, 8 — вакуумное окно, 9 — входной конус, 10 — СВЧ поглотитель, 11 — приёмный рупор, 12 — выход к осциллографу

тракт гиротрона заканчивался плавным рупором большого диаметра и вакуумным СВЧ окном 8 из материала, обеспечивающего малую величину отражений в широком диапазоне частот (фторопласт, диаметр окна 180 мм).

Ток электронного пучка измерялся с помощью шунта, соединённого с резонатором 6 и выходным волноводным трактом (коллектором электронов), гальванически изолированными от анода 2. Мощность излучения в эксперименте измерялась с помощью импульсного твердотельного калориметра 7, аналогичного [19], но с большей входной апертурой (300 мм). Частота излучения определялась набором запердельных волноводов и гетеродинным методом.

Необходимо отметить, что специальная неадиабатическая магнетронно-инжекторная пушка, которая упоминалась выше, позволяет за счёт сокращения времени вывода электронов в область высоких потенциалов увеличить рабочий ток до 50 % от ленгмюровского тока пушки и формировать интенсивный квазиламинарный винтовой электронный пучок с высоким пич-фактором и малым разбросом по поперечным скоростям. Сопоставление результатов расчётов параметров пучка по программе ЭПОС с результатами измерений с помощью магнитного анализатора разброса скоростей показало хорошее их соответствие [20].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

На ускорителе для питания высоковольтной электронной пушки используются две формирующие схемы, генерирующие импульсы с длительностью 1 и 10 мкс. Импульсы с длительностью 1 мкс используются на первом этапе исследований при выводе приборов на номинальные параметры. Это позволяет ослабить влияние высоковольтных пробоев электронной пушки на работу катода и СВЧ пробоев на электропрочность прибора. В режиме с импульсами длительности 10 мкс проверяется устойчивость генерации в рабочей точке, проводятся более точные измерения калориметром мощности выходного излучения и КПД, определяется запас по электропрочности, изучается надёжность работы гиротрона с точки зрения перехода к более жёстким условиям (к режимам с высокой частотой повторения импульсов, с импульсами большей длительности и т. д.).

Эксперименты, проведённые в режиме высоковольтных импульсов с длительностью 1 мкс, показали, что в области расчётных параметров (магнитного поля и ускоряющего напряжения) при превышении тока пучка 10 А происходит селективное возбуждение рабочей моды $TE_{11,2}$ на второй гармонике гирочастоты (см. рис. 5). Частота излучения, измеренная гетеродинным методом, составила 55,67 ГГц. При увеличении тока пучка мощность выходного излучения нарастала и достигала максимального значения 2,1 МВт при токе пучка 38 А (см. рис. 6). Точность измерения мощности составляла $\pm 10\%$. С увеличением тока пучка также нарастал КПД, который достигал максимума, около 30 %, при токе 32 А. Дальнейшее повышение тока приводило сначала к снижению КПД, а затем и мощности излучения [21]. Это не соответствует результатам численного моделирования, где при сохранении качества пучка КПД и мощность выходного излучения продолжают расти вплоть до тока 120 А. Как показали последующие исследования, падение мощности и КПД, возможно, связано с проявлением разрядных процессов.

Необходимо отметить, что в прилегающем диапазоне магнитных полей (см. рис. 1) наблюдалось возбуждение паразитной моды $TE_{4,2}$ на основной циклотронной гармонике с частотой излучения 29,67 ГГц, от которого можно было полностью отстроиться небольшим понижением магнитного поля.

Исследования в режиме с импульсами длительности 10 мкс показали, что при такой длительности питающего импульса нет ограничения длительности излучения, если мощность не превышает 500 кВт. При увеличении мощности выходного излучения происходил срыв генерации, кото-

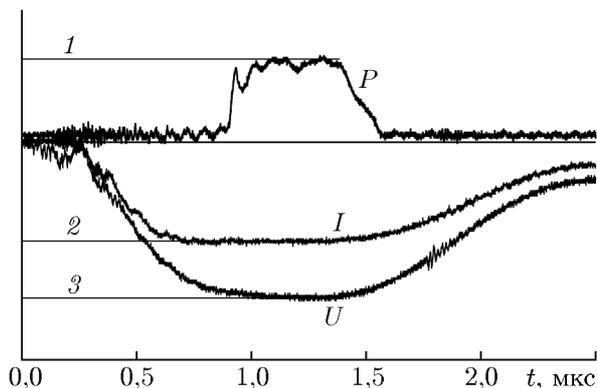


Рис. 5. Осциллограммы сигналов в режиме максимального КПД: U — напряжение; I — ток пучка; P — мощность СВЧ излучения. Уровень 1 соответствует $P = 2,0$ МВт (КПД 28%), уровни 2 и 3 — значениям $I = 32,5$ А и $U = 220$ кВ

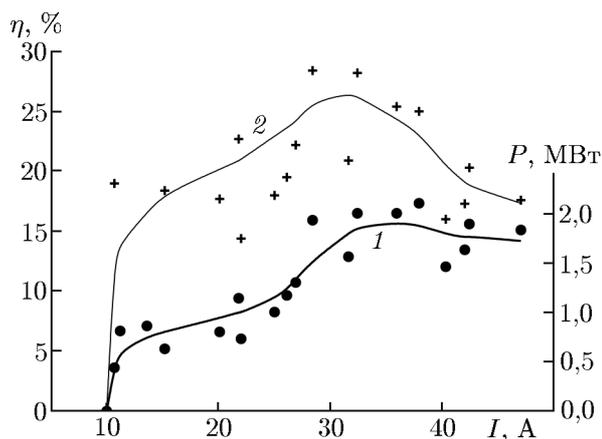


Рис. 6. Зависимости мощности выходного излучения P (кружки и линия 1) и КПД гиротрона η (символы + и линия 2) от тока пучка I

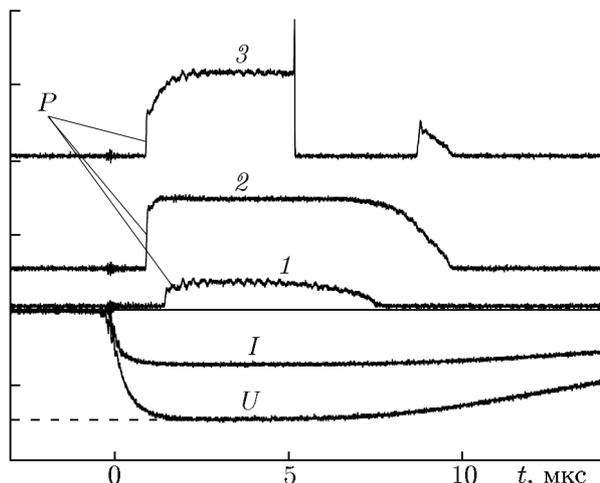


Рис. 7. Осциллограммы сигналов при различных токах пучка: $I = 24$ А, $P = 0,4$ МВт, $\eta = 7\%$ (линия 1); $I = 33$ А, $P = 1,6$ МВт, $\eta = 20\%$ (2); $I = 36$ А, $P = 1,9$ МВт, $\eta = 23\%$ (3). Штриховая линия соответствует уровню $U = 240$ кВ

рая в ряде случаев успевала восстановиться за время действия питающего импульса. Такое поведение прибора можно было объяснить СВЧ пробоями или неустойчивостью электронного пучка, вызванной появлением и накоплением в электронной пушке пробочных электронов. Согласно расчётам, при таком уровне мощности рабочей волны максимальная напряжённость электрического высокочастотного поля в резонаторе будет составлять около 44 кВ/см, что первоначально казалось допустимой величиной, не приводящей к СВЧ пробоям. В то же время качество используемого электронного пучка было подтверждено в эксперименте, в котором путём небольшого изменения величины магнитного поля была возбуждена мода $TE_{4,2}$ на основной гармонике. Поперечная структура моды $TE_{4,2}$ такова, что при той же мощности её электрическое поле на стенке резонатора примерно в пять раз меньше, чем у рабочей моды. Эксперимент показал, что практически при тех же параметрах пучка никакого ограничения длительности генерации на моде $TE_{4,2}$ не наблюдается. Более того, за счёт увеличения тока пучка удалось довести мощность излучения на этой моде до 2 МВт без ограничения длительности импульса, что свидетельствовало о высоком качестве электронного пучка. При этом напряжённость высокочастотного электрического поля при мощности 2 МВт по расчётам не превышала 33 кВ/см. Таким образом, приходим к выводу, что электропрочность резонатора на рабочей моде $TE_{11,2}$, по-видимому, недостаточна.

Для повышения электропрочности резонатора класс шероховатости его поверхности $R_a = 1,6$ мкм был повышен с помощью полировки до $R_a = 0,16$ мкм. В эксперименте с полиро-

ванным резонатором мощность выходного излучения гиротрона на второй циклотронной гармонике в длинном импульсе была повышена почти до 2 МВт с энергией в импульсе 14 Дж (см. рис. 7). Дальнейшее увеличение мощности выходного излучения ограничивалось СВЧ пробоями (см. рис. 7, кривая 3; отметим, что возбуждения паразитных мод в промежутке после срыва генерации не наблюдалось). Путём перехода в режим с импульсами длительности 1 мкс удалось довести мощность выходного излучения до 2,5 МВт, а попытки дальнейшего её повышения при токах пучка выше 38 А приводили к нарушению селективной работы прибора: возбуждение моды $TE_{4,2}$ на основной циклотронной гармонике происходило одновременно с возбуждением рабочей моды или даже опережало его. На возможность такого нарушения селективности указывают и результаты расчётов (см. рис. 2).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведённые эксперименты показали, что для повышения уровня мощности выходного излучения требуется противодействовать развитию СВЧ пробоев и улучшать селективные свойства прибора. Максимальная напряжённость электрических СВЧ полей при мощности излучения 2 МВт составляет $80 \div 90$ кВ/см, что ниже уровня предельных полей, достигнутых нами с применением той же вакуумной технологии и технологии обработки поверхностей в экспериментах с релятивистской лампой обратной волны [16]. Возможно, возникновение СВЧ пробоя при таком относительно невысоком уровне полей может быть инициировано мультипакторным разрядом.

Действительно, в слабoreлятивистском случае при работе гиротрона на второй циклотронной гармонике условие циклотронного резонанса совпадает с резонансным условием развития основной моды мультипакторного разряда на поверхности резонатора (в скрещённых радиальном СВЧ электрическом и продольном магнитном полях), а именно $\omega \approx 2\omega_c$, где ω — частота СВЧ колебаний, ω_c — циклотронная частота. Как показали недавние исследования [22], мультипактор может поглощать значительную часть энергии излучения даже в условиях, когда используются моды со сложной структурой СВЧ полей. Расчёты показывают, что при полях больше 40 кВ/см электроны разряда в резонаторе могут набирать энергию бомбардировки больше 50 эВ (когда коэффициент вторичной эмиссии становится больше единицы).

В нашем случае существенно релятивистских энергий электронов пучка магнитные поля, требуемые для обеспечения синхронизма в гиротроне и для возникновения мультипакторного разряда отличаются в полтора раза (релятивистский фактор $\gamma = 1,45$). Однако эти условия не жёсткие. При работе гиротрона с большими токами пучка и для достижения высоких КПД требуется понижать величину рабочего магнитного поля, т. е. увеличивать расстройку между частотой сигнала и циклотронной частотой примерно на 10%. В то же время и зона существования (по магнитному полю) мультипакторного разряда при больших разрядных токах и высоком коэффициенте вторичной эмиссии может расширяться, в частности в сторону больших магнитных полей, до $0,6 \div 0,7$ от величины циклотронного магнитного поля [23, 24]. Эти смещения идут навстречу друг другу, так что и в рассматриваемом, умеренно релятивистском, гиротроне могут выполняться формальные условия для развития мультипакторного разряда (формальные, т. к. на таких высоких частотах мультипакторный разряд пока не наблюдался).

Полировка поверхности, которая входит в арсенал приёмов повышения электропрочности [16], по-видимому, в первую очередь понижает уровень автоэмиссионных токов, которые, в принципе, могут самостоятельно приводить к СВЧ пробоям, а также ускорять процесс развития мультипакторного разряда. Кроме того, полировка снижает удельную сорбционную ёмкость поверхности и вероятность трансформации электронного разряда в плазменный разряд [25]. Возможно, именно это происходило в эксперименте в режиме коротких импульсов, где с ростом тока наблюдалось

понижение мощности и КПД гиротрона, причём возникающие разряды не успевали перерасти в СВЧ пробой.

Для выяснения причин низкой электропрочности рассматриваемого гиротрона и поиска путей её повышения требуются дополнительные исследования. Как уже было сказано, одной из этих причин может быть мультипакторный разряд. Однако независимо от этих причин для повышения мощности выходного излучения представляется целесообразным переход в гиротроне на второй циклотронной гармонике к такой структуре рабочей волны (объёмного типа), которая имеет пониженные поля на стенке резонатора. Тогда, если причина низкой электропрочности именно в мультипакторном разряде, можно предотвратить вторичную эмиссию электронов, удерживая величину электрической компоненты СВЧ поля на стенке резонатора ниже необходимого предела.

На пути увеличения мощности выходного излучения гиротрона при возбуждении рабочей моды в импульсном режиме возникают специфические препятствия. Как уже было отмечено, на достаточно плавном фронте питающего импульса может иметь место более раннее возбуждение паразитных мод, которые при достижении расчётных параметров пучка продолжают своё существование, подавляя расчётную моду. Поэтому рекомендуется применять такие схемы питания, которые сразу приводят к возбуждению рабочей моды [15]. Пример такого подхода описан в статье [26], где подавление возбуждения паразитных мод на фронте питающего импульса было осуществлено за счёт задержки подачи потенциала на первый анод трёхэлектродной электронной пушки.

Для рассматриваемого гиротрона предлагается применить другой метод «включения» электронного пучка. Формирование ламинарного винтового электронного пучка в неадиабатической электронной пушке [20] позволяет на входе пучка в резонатор использовать диафрагму, пропускающую пучок в резонатор только при достижении номинального напряжения, когда электроны набирают достаточную для огибания диафрагмы амплитуду поперечных колебаний. Если при этом напряжении стартовый ток рабочей моды имеет наименьшую величину, то именно эта мода будет возбуждаться. Предварительное тестирование этого способа селекции показало его перспективность [27]. Кроме того, диафрагма позволяет увеличить питч-фактор винтового электронного пучка, устраняя электроны, накапливающиеся в области формирования (прямой поток электронов огибает диафрагму, отражённый оседает на её обратной стороне) [20]. Также ведутся исследования, направленные на повышение селективности самого резонатора гиротрона для работы, в частности, с использованием фазового корректора [28].

Таким образом, в гиротроне на релятивистском электронном пучке на второй циклотронной гармонике реализовано мощное излучение двухмегаваттного уровня мощности на длине волны 5,5 мм с достаточно высокой эффективностью около 30 %, что показывает перспективность релятивистских гиротронов, работающих на гармониках выше первой, с точки зрения их применения в более коротковолновом диапазоне.

Работа поддержана РФФИ (проекты 15-02-08016 и 15-02-09130).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rzesnicki T., Piosczyk B., Kern S., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38, No. 6. P. 1141.
2. Thumm M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. V. 42, No. 3. P. 590.
3. Гольденберг А. Л., Денисов Г. Г., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 6. С. 635.
4. Запевалов В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 10. С. 864.

5. Гинзбург Н. С., Кременцов В. И., Петелин М. И. и др. // ЖТФ. 1979. Т. 49, № 2. С. 378.
6. Gold S. H., Fliflet A. W., Manheimer W. M., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1988. V. 16, No. 2. P. 142.
7. Bratman V. L., Ginzburg N. S., Nusinovich G. S., et al. // Int. J. Electron. 1981. V. 51, No. 4. P. 541.
8. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Моисеев М. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44, № 4. С. 345.
9. Zaitsev N. I., Pyakov E. V., Korablyov G. S., Kulagin I. S. // Proc. XVI Int. Symp. Discharges Electrical Insulation Vacuum, May 23–30, 1994. Moscow–St.-Petersburg, Russia. Proc. SPIE 2259. P. 573.
10. Зайцев Н. И., Гинзбург Н. С., Завольский Н. А. и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27, № 7. С. 8.
11. Зайцев Н. И., Завольский Н. А., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 10. С. 914.
12. Bratman V. L., Botvinnik I. E., Grom Yu. D., et al. // Proc. XVI Int. Symposium Discharges Electrical Insulation Vacuum, May 23–30, 1994. Moscow–St. Petersburg, Russia. Proc. SPIE 2259. P. 538.
13. Абубакиров Э. Б., Гузнов Ю. М., Денисов Г. Г. и др. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2015. Т. 23, № 2. С. 94.
14. Litvak A. G., Myasnikov V. E., Usachev S. V. et al. // Conference Digest of the Joint 29th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves and 12th Int. Conf. Terahertz Electronics, Sept. 27–Oct. 1, 2004, Karlsruhe, Germany. P. 111.
15. Запевалов В. Е., Малыгин С. А., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1993. Т. 36, № 6. С. 543.
16. Pyakov E. V., Korablyov G. S., Kulagin I. S., Zaitsev N. I. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26, No. 3. P. 332.
17. Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Кораблёв Г. С. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1995. Вып. 3. С. 138.
18. Завольский Н. А., Иляков Е. В., Кулагин И. С. // Труды XV Научно-технич. конф. «Вакуумная наука и техника». 5–12 октября 2008 г. Дагомыс, Краснодарский край, Россия. С. 96.
19. Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Ковнеристый Ю. К. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 2. С. 153.
20. Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Кулагин И. С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 5–6. С. 453.
21. Завольский Н. А., Иляков Е. В., Калынов Ю. К. и др. // Труды XXIV научно-технич. конф. «Вакуумная наука и техника», 15–23 сентября. 2017 г., Судак, Крым, Россия. С. 81.
22. Иляков Е. В., Кулагин И. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 10. С. 758.
23. Ганичев Д. А., Филатов В. А., Фридрихов С. А. // Радиотехника и электроника. 1972. Т. 17, № 8. С. 1639.
24. Иляков Е. В., Кулагин И. С., Ли И. П. // Труды XXII научно-технич. конф. «Вакуумная наука и техника», 26 сентября–4 октября 2015 г., Феодосия, Крым, Россия. С. 41.
25. Александров А. Ф., Бляхман Л. Г., Галузо С. Ю., Нечаев В. Е. // Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 3. Горький: ИПФ АН СССР, 1983. С. 219.
26. Зайцев Н. И., Запевалов С. А., Малыгин А. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 3. С. 196.
27. Завольский Н. А., Иляков Е. В., Калынов Ю. К. и др. // Труды XXIII научно-технич. конф. «Вакуумная наука и техника», сентябрь 2016, Судак, Крым, Россия. С. 29.

28. Bandurkin I. V., Kalynov Yu. K., Osharin I. V., Savilov A. V. // Phys. Plasmas. 2016. V. 23, No. 1. Art. no. 013113.

Поступила в редакцию 9 ноября 2017 г.; принята в печать 26 января 2018 г.

HIGH-POWER RELATIVISTIC MILLIMETER-WAVE GYROTRON OPERATING AT THE SECOND CYCLOTRON HARMONIC

N. A. Zavolsky, E. V. Ilyakov, Yu. K. Kalynov, I. S. Kulagin, V. N. Manuilov, and A. S. Shevchenko

We present the results of the theoretical and experimental studies, which are aimed at developing pulsed gyrotrons with relativistic electron beams operating in the millimeter-wave range and retaining the multimewatt power level. The use of the interaction at the second gyrofrequency harmonic, which is characterized by sufficiently high efficiency and availability of the solution for the mode selection problem, allows one to double the generation frequency without increasing the induction of the magnetic field. In the corresponding experiment, the output radiation power exceeded 2 MW, and the efficiency was about 30% at a wavelength of 5.5 mm.