

Динамические процессы в винтовых электронных потоках гиротронов

© О.И. Лукша, Д.Б. Самсонов, Г.Г. Соминский, С.В. Сёмин

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: louksha@rphf.spbstu.ru

(Поступило в Редакцию 27 июня 2012 г.)

Обобщены результаты теоретического и экспериментального исследований коллективных процессов в винтовых электронных потоках устройств гиротронного типа. Основное внимание уделено низкочастотным колебаниям, связанным с развитием неустойчивости в пространственном заряде, захваченном в ловушку между катодом и пробкой магнитного поля. Обоснован механизм развития неустойчивости и исследовано влияние колебаний на основные характеристики электронного потока, определяющие его качество. Приведены данные по подавлению низкочастотных колебаний и повышению на этой основе КПД гиротрона.

Введение

Важнейший этап в освоении коротковолновой части сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона длин волн связан с открытием механизма когерентного излучения электронов-осцилляторов, вращающихся в постоянном магнитном поле [1,2]. Данный механизм лежит в основе работы устройств, получивших название мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) или гирорезонансных приборов (гиросприборов). Уникальные возможности гиросприборов в наибольшей степени проявляются в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн (например, [3–6]), где с их помощью был достигнут уровень выходной мощности, значительно превышающий мощность „классических“ вакуумных СВЧ-приборов (клистронов, магнетронов, ЛБВ и др.). Важной областью применения гиротронов как наиболее эффективных представителей мощных МЦР является нагрев плазмы и управление током в установках управляемого термоядерного синтеза. В настоящее время для этих целей требуются гиротроны с частотой 110–170 GHz и выходной мощностью ~ 1 MW и более, работающие в квазинепрерывном режиме с длительностью импульса в десятки минут (например, [5–7]). Сфера применения гиросприборов включает также дальнюю радиолокацию, обработку материалов, спектроскопию высокого разрешения, ускорение заряженных частиц и другие приложения.

Эффективность и предельные достижимые параметры гиросприборов определяются качеством формируемого в них электронного потока. Применительно к мощным МЦР требуются винтовые электронные потоки (ВЭП), сочетающие высокие значения тока и осцилляторной энергии¹ электронов с малым разбросом скоростей

¹ Долю сосредоточенной в поперечном движении электронов энергии, из которой „черпается“ энергия выходного СВЧ-излучения в гирорезонансных приборах, принято характеризовать величиной питч-фактора $\alpha = v_{\perp}/v_{\parallel}$ (v_{\perp} и v_{\parallel} — поперечная и продольная компоненты скорости электрона). Как правило, значения среднего по ансамблю электронов питч-фактора в рабочих режимах мощных гиротронов не превышают 1.2–1.4 (например, [8]).

и требуемой поперечной структурой пучка. Несмотря на специфику различных типов электронно-оптических систем (ЭОС) для гиросприборов, закономерности формирования высококачественных ВЭП в этих системах достаточно общи. В частности, в хорошо спроектированных и отъюстированных системах основной фактор, определяющий качество ВЭП, связан с действием собственного поля пространственного заряда электронов (например, [9]). Переменная составляющая этого поля является результатом развития различного рода паразитных неустойчивостей: как высокочастотных с частотой, близкой к электронной циклотронной частоте, так и низкочастотных с частотой в диапазоне десятков–сотен мегагерц.

Нарастание высокочастотного поля в резонаторе гиротрона может быть описано с точки зрения развития неустойчивости, которую называют МЦР-неустойчивость [2,4]. Однако она может развиваться и в области формирования пучка, если какая-то часть канала дрейфа выступает в роли своеобразного резонатора. Распространенным способом борьбы с возбуждением паразитных мод в канале дрейфа пучка является установка в этой области специальных поглотителей (например, [10]). В отсутствие окружающих ВЭП металлических электродов в нем может возбуждаться электростатическая циклотронная неустойчивость [11–13], которая, как и МЦР неустойчивость, по сути является неустойчивостью отрицательной массы [14]. Особое внимание в исследованиях было уделено влиянию электростатической циклотронной неустойчивости на энергетический разброс электронов в ВЭП. Следует отметить, что даже небольшой разброс энергий электронов, составляющий несколько процентов, приводит к заметному падению КПД гиротронов [8,15,16]. Показано в расчетах, что энергетический разброс, обусловленный электростатической циклотронной неустойчивостью, может составлять 2–4% в типичных режимах мощных коротковолновых гиротронов (например, [17,18]). Частота колебаний для указанных неустойчивостей близка к электронной циклотронной частоте или ее гармоникам.

Более низкими частотами характеризуются коллективные процессы в пространственном заряде, накопленном в специфической ловушке между катодом и магнитной пробкой в ЭОС гироприборов (например, [9,19–21]). Отражение электронов от пробки неизбежно сопутствует формированию ВЭП, в котором достаточно велики значения разброса скоростей электронов и пичфактора. Паразитные низкочастотные колебания (НЧК), развивающиеся в захваченном в ловушку объемном заряде, препятствуют достижению высокой поперечной энергии электронов в ВЭП и, как следствие, большого КПД гиротронов. К разряду низкочастотных относятся также диокотронная [22,23] и многопучковая [9,19,23,25] неустойчивости, развитию которых может способствовать присутствие захваченных в ловушку электронов, многократно проходящих область между катодом и магнитной пробкой.

Подробные теоретическое и экспериментальное исследование низкочастотных коллективных процессов в ВЭП и влияния этих процессов на работу гироприборов были выполнены в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете [19,20,26–32]. В настоящей работе обобщаются полученные в рамках этого исследования основные результаты, а также производится их сравнение с данными других авторов.

1. Экспериментальные приборы и методы измерения

В экспериментах были использованы несколько устройств гиротронного типа. Большая часть измерений была выполнена в импульсном гиротроне 4-мм диапазона длин волн и среднего (около 100 kW) уровня выходной СВЧ мощности [20,30,31]. Расчетный рабочий режим этого гиротрона характеризовался следующими основными параметрами: ускоряющее напряжение $U_0 = 30$ kV, ток пучка $I_b = 10$ А, индукция магнитного поля в области резонатора $B_0 = 2.75$ Т, индукция магнитного поля у катода $B_c = 0.152$ Т, рабочая частота $f_0 = 74.2$ GHz, рабочая мода $TE_{12,3}$, расчетный пичфактор в области резонатора $\alpha = 1.28$. Кроме этого, использовались приборы, представляющие собой ЭОС гиротронного типа без высокодобротного резонатора. Прибор ЭОСГ-1 (например, [26]) был подобен гиротронам, применяемым в технологических комплексах. Приборы ЭОСГ-2 и ЭОСГ-3 (например, [19,26,27,29]) были аналогичны ЭОС мощных мегаваттных гиротронов и работали в режимах, которые являлись моделируемыми по отношению к рабочим режимам этих мощных гиротронов.

В экспериментальных приборах были реализованы слабозмущающие диагностики, позволяющие определять основные параметры ВЭП. В совокупности разработанные методы образуют уникальный диагностический комплекс, предназначенный для измерения:

— эмиссионных характеристик термокатодов магнетронно-инжекторных пушек (МИП) на основе анализа

пространственного распределения электронного тока и потоков ионов с эмитирующей поверхности;

— параметров распределения электронов ВЭП по компонентам скорости и по энергии с помощью анализаторов с тормозящим полем, установленных в коллекторной области приборов;

— пространственной структуры ВЭП при регистрации излучения, возникающего при взаимодействии электронов с мишенью из малых частиц люминофора, и при измерении азимутального распределения плотности тока пучка в области его осаждения на коллекторе;

— амплитудно-частотных и пространственно-временных характеристик динамических процессов в объемном заряде ВЭП в диапазоне частот 10–1500 МГц с помощью зондов, локально связанных с электронным пучком, и антенн, расположенных вне вакуумной оболочки приборов;

— плотности тока и энергетического спектра электронов в потоке, бомбардирующем поверхность катода.

В конструкцию экспериментальных приборов были включены дополнительные управляющие электроды и магнитные катушки, предназначенные для регулирования распределений электрического и магнитного полей в области МИП и на участке магнитной компрессии пучка. Такое регулирование использовалось в экспериментах как метод повышения качества формируемого электронного потока.

2. Методика моделирования низкочастотных коллективных процессов в электронном пространственном заряде гиротронов

Для моделирования динамических процессов, связанных с накоплением пространственного заряда в ловушке между катодом и магнитной пробкой, была разработана методика расчета, основанная на методе крупных частиц [28,32]. Используемый в ней упрощенный подход к моделированию, в рамках которого применяется адиабатическое приближение, позволяет ограничиться анализом самосогласованного одномерного движения ведущих центров электронных орбит вдоль силовой линии магнитного поля. Данный подход ориентирован на изучение низкочастотных динамических процессов, характерный период которых сопоставим с периодом осцилляций единичного электрона в ловушке.

Принятые в данной модели допущения позволяют анализировать динамику пространственного заряда в ЭОС гироприборов в течение длительного времени, составляющего сотни периодов осцилляций электронов в ловушке. Этого времени достаточно для накопления и группировки объемного заряда в ловушке для типичных режимов работы различных гирорезонансных приборов, в том числе мегаваттных гиротронов, предназначенных для применения в установках управляемого термоядерного синтеза. Возможность анализа

длительных процессов принципиально отличает разработанную методику моделирования от двумерных моделей (например, [9,21,33]), в которых для снижения затрат машинного времени задают довольно большое начальное отражение электронов от магнитной пробки и ограничиваются временем анализа в несколько десятков периодов осцилляций электронов в ловушке.

Следует отметить, что подход к моделированию электронных процессов, во многом схожий с описанным выше, был использован в работе [34], в которой авторы анализируют нелинейную динамику пространственного заряда в ловушке применительно к ЭОС 1.5 MW, 110 GHz гиротрона. Полученные расчетные данные позволили удовлетворительно интерпретировать результаты экспериментальных исследований паразитных низкочастотных колебаний, обнаруженных в данном гиротроне.

3. Характеристики низкочастотных колебаний в ЭОС гироприборов

Подробное экспериментальное исследование низкочастотных ($f_{LFO} = 20\text{--}160$ MHz) колебаний, выполненное в приборах с различающимися геометрией и режимами работы, показало связь этих колебаний с продольным движением сгустков заряда в электронном облаке, захваченном в ловушку между катодом и магнитной пробкой. Характерное время достижения самосогласованного состояния, в котором амплитуда колебаний изменяется незначительно, составляло 50–100 периодов продольных осцилляций единичного электрона в ловушке. Преимущественно локализованные в области магнитной компрессии ВЭП, низкочастотные колебания присутствовали также и в потоке электронов, прошедших через магнитную пробку и поступающих в область резонатора.

Типичные зависимости амплитуды колебаний A_{LFO} и выходной СВЧ-мощности P_0 на рабочей моде $TE_{12,3}$, измеренные при рабочих значениях параметров U_0 , I_b , B_0/B_c в 4-мм гиротроне, а также рассчитанного с помощью кода EGUN [35] питч-фактора α от индукции

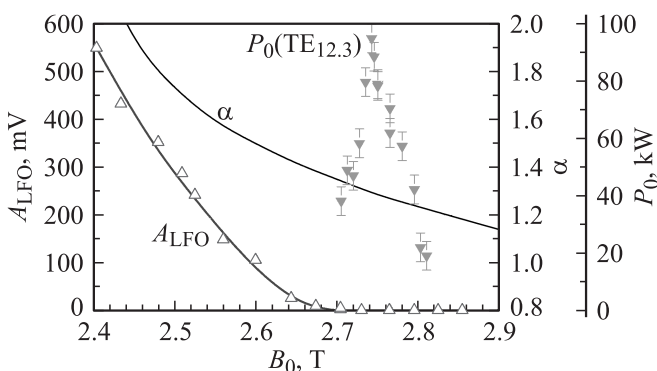


Рис. 1. Зависимости амплитуды колебаний A_{LFO} , выходной мощности P_0 на рабочей моде $TE_{12,3}$, а также рассчитанного питч-фактора α от индукции магнитного поля B_0 ($U_0 = 30$ kV, $I_b = 10$ A, $B_0/B_c = 18.02$).

магнитного поля B_0 приведены на рис. 1. Измерения показали, что изменение амплитуды и порога возникновения НЧК при варьировании параметров B_0 , U_0 , и B_0/B_c определяется тем, как при этом меняется величина питч-фактора. Причем о качестве формируемого в выбранной ЭОС гироприбора винтового пучка можно судить по значению порогового питч-фактора α_{thr} , при превышении которого в электронном пространственном заряде существуют данные колебания. В экспериментах порог возникновения НЧК фиксировался по уровню, вдвое превышающему уровень шума приемной аппаратуры (осциллографа или анализатора спектра). Для приведенных на рис. 1 зависимостей пороговый питч-фактор $\alpha_{thr} \approx 1.31$. Подобные зависимости были характерны для гиротрона с достаточно однородным катодом (коэффициент эмиссионной неоднородности δj_e^2 менее 20–25%). Для таких катодов в рабочем режиме при $\alpha = 1.28$ экспериментальные значения выходной мощности и КПД приблизительно совпадали с их расчетными значениями, полученными при моделировании процессов взаимодействия электронов с ВЧ-полем в резонаторе гиротрона.

Однако при ухудшении качества ВЭП, вызванном повышением степени эмиссионной неоднородности, наблюдались возрастание амплитуды НЧК при фиксированных значениях параметров B_0 , U_0 , I_b , B_0/B_c , а также снижение порогового питч-фактора α_{thr} . Полученные значения величины α_{thr} были использованы для оценки разброса поперечных скоростей $\delta v_{\perp rms}$ электронов в ВЭП, формируемых разными катодами. Величина $\delta v_{\perp rms}$ при этом определялась как относительное среднеквадратичное отклонение скорости от среднего значения. Оценки были выполнены в предположении, что в данной конфигурации ЭОС НЧК возбуждаются при некотором пороговом коэффициенте отражения электронов от пробки R_{thr} , одинаковом для разных катодов. Значение R_{thr} для рабочего режима 4-мм гиротрона, равное примерно $1.7 \cdot 10^{-3}$, было определено из сопоставления измеренных и рассчитанных энергетических спектров электронов в отработанном пучке [20]. Соответствующая зависимость $\delta v_{\perp rms}(\delta j_e)$ приведена на рис. 2. Рост эмиссионной неоднородности катода сопровождался также падением максимального КПД гиротрона на рабочей моде. Снижение КПД могло быть следствием возрастания скоростного разброса, появления энергетического разброса и ухудшения пространственной структуры пучка в присутствии паразитных колебаний (см. разд. 4), а также перераспределения энергии между рабочей и паразитными модами в резонаторе.

Эксперименты, проведенные в гиротроне, показали, что с ростом отражения от пробки происходит усложнение спектра НЧК, а при интенсивном потоке электронов в ловушку захваченный в нее объемный заряд

² Коэффициент δj_e определялся по измеренной зависимости плотности тока эмиссии от азимутальной координаты $j_e(\theta)$ как относительное среднеквадратичное отклонение величины j_e от среднего значения (например, [20]).

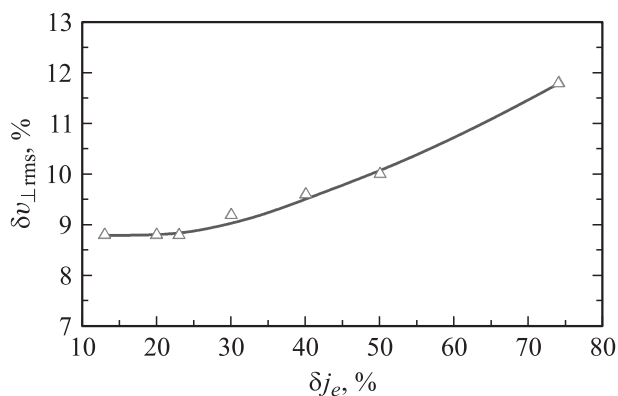


Рис. 2. Зависимость разброса поперечных скоростей электронов $\delta v_{\perp, rms}$ от коэффициента эмиссионной неоднородности катода δj_e .

является источником широкополосных хаотических сигналов. Была проанализирована связь НЧК с внешними цепями, соединяющими лампу с источниками питания и измерительной аппаратурой. В отличие от полученных в других гиротронах данных [9,36] в 4-мм гиротроне не было зафиксировано заметного изменения амплитудно-частотных характеристик НЧК при варьировании в широких пределах резонансной частоты и добротности внешнего контура. Наблюдалось плавное изменение основной частоты в спектре колебаний при варьировании ускоряющего напряжения. Отсутствие влияния внешних цепей на характеристики НЧК в данном гиротроне объясняется спецификой геометрии МИП и особенностями конструкции его катодного и анодного блоков.

Результаты измерений характеристик НЧК, которые были выполнены во всех описанных выше экспериментальных приборах (см. разд. 1), подтверждаются данными численного моделирования динамики пространственного заряда в ЭОС гиротронного типа. Остановимся кратко на данных расчетов применительно к геометрии и режимам работы 4-мм гиротрона. Основным парамет-

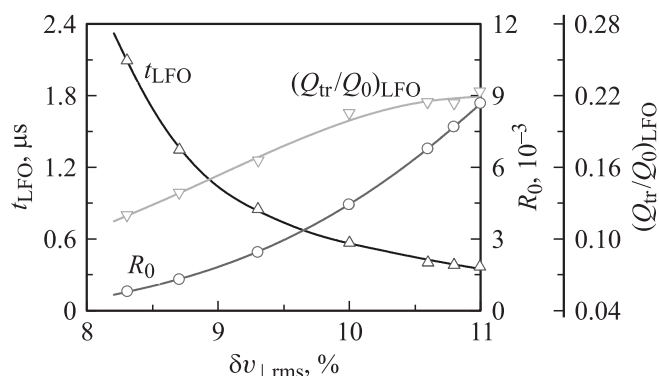


Рис. 3. Рассчитанные коэффициент отражения от пробки R_0 , время появления НЧ-колебаний t_{LFO} и соответствующее этому времени отношение захваченного в ловушку заряда к заряду первичного пучка $(Q_{tr}/Q_0)_{LFO}$ как функции относительного разброса поперечных скоростей $\delta v_{\perp, rms}$ при $\alpha_0 = 1.3$.

ром, характеризующим пороговые условия возбуждения и интенсивность развивающихся в ловушке колебаний, является величина коэффициента отражения электронов от пробки R . В расчетах были определены значения времени возникновения колебаний t_{LFO} и суммарного электронного заряда Q_{tr} , накопленного в ловушке к этому моменту времени, по отношению к заряду первичного ВЭП Q_0 в зависимости от коэффициента отражения R_0 в „холодном“ пучке. Полученные данные характеризует рис. 3, на котором показано изменение указанных величин в зависимости от разброса поперечных скоростей при постоянном питч-факторе в „холодном“ ВЭП. Для данной расчетной конфигурации НЧК на частоте $f_{LFO} \approx 130$ МГц появились, когда отношение Q_{tr}/Q_0 достигало 0.1–0.25. Причем чем больше времени требовалось для возбуждения НЧК, тем при меньшей величине накопленного заряда они возникали. В расчетах не были зафиксированы возбуждения регулярных колебаний, когда коэффициент отражения R_0 был меньше $\sim 5 \cdot 10^{-4}$. Для сравнения в расчетной конфигурации прибора ЭОСГ-1, соответствующей технологическому гиротрону, в режиме с малым током пучка $I_b = 0.2$ А появление НЧК было зафиксировано в момент времени, когда захваченный в ловушку заряд был примерно равен заряду первичного ВЭП. Следовательно, влияние паразитных НЧК на работу мощных гиротронов с большим током пучка может проявляться при меньшем отражении от пробки (т.е. при меньшем питч-факторе в случае одинакового скоростного разброса) по сравнению со слаботочными гиротронами, применяемыми, например, для обработки материалов.

Полученные экспериментальные и расчетные данные о характеристиках НЧК позволили предположить, что развитие неустойчивости в захваченном в ловушку пространственном заряде связано с неизохронностью осцилляторного движения электронов в области между катодом и магнитной пробкой. Такая неустойчивость подобна неустойчивости отрицательной массы (например, [2,4,11–14]). „Притяжение“ электронов к возмущению плотности заряда имеет место в среде долгоживущих осцилляторов, если $d\omega/d\varepsilon < 0$, где ω и ε — частота осцилляций и энергия осциллирующих частиц соответственно. Следовательно, инкремент неустойчивости определяется формой своеобразной „потенциальной“ ямы между катодом и полкой магнитного поля, зависящей в свою очередь от распределений электрического и магнитного полей в этой области.

В расчетах был проанализирован способ воздействия на инкремент развития неустойчивости объемного заряда в ловушке при регулировании продольного распределения магнитного поля $B(z)$ в области компрессии пучка. Для ЭОС приборов, в которых были исследованы паразитные НЧК, были определены оптимизированные распределения $B(z)$ с учетом возможности их реализации в эксперименте. Спектры НЧК, рассчитанные для начального и оптимизированного распределений $B(z)$ в 4-мм гиротроне, показаны на рис. 4. Видно, что переход к оптимизированному распределению приводит

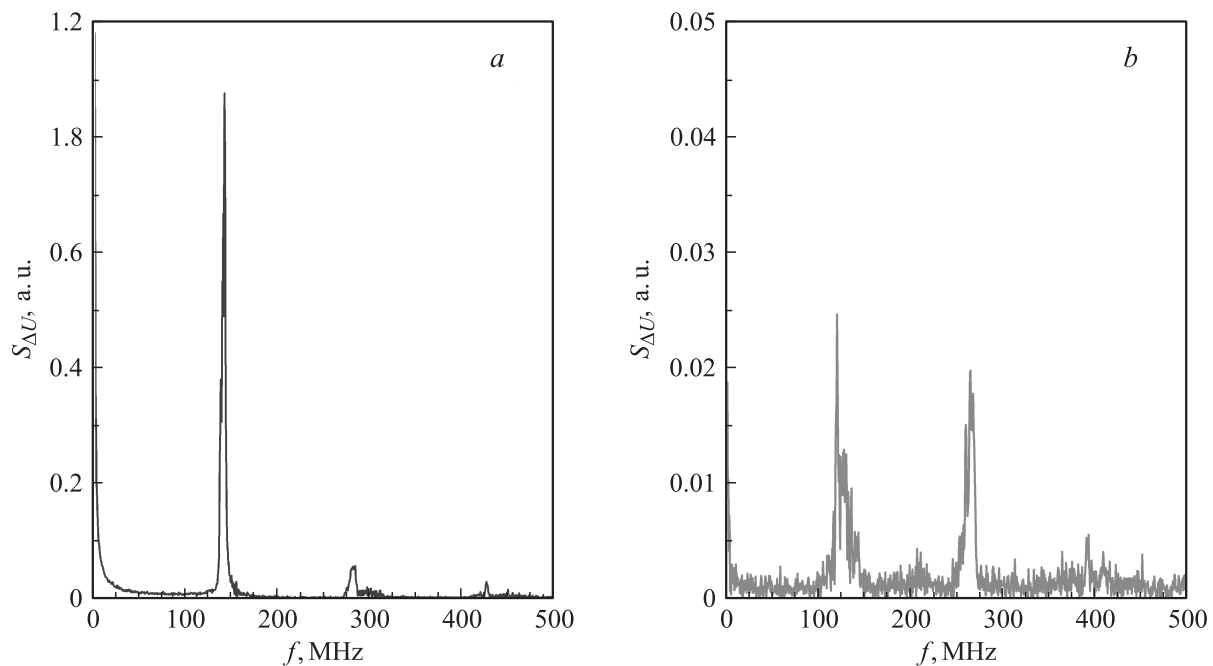


Рис. 4. Частотные спектры колебаний потенциала пучка $S_{\Delta U}(f)$ для начального (а) и оптимизированного (б) распределений магнитного поля.

к снижению амплитуды основного пика в спектре колебаний примерно в 30 раз.

Эксперименты показали, что в электронном потоке гироприборов могут также возбуждаться коллективные процессы иной природы, нежели рассмотренные выше низкочастотные колебания, связанные с развитием неустойчивости в захваченном в ловушку пространственном заряде. В экспериментальном приборе ЭОСГ-3 были обнаружены и исследованы относительно ВЧ-колебания с частотой в диапазоне 600–900 МГц [19,27]. Показано, что спектральные характеристики этих колебаний зависят от особенностей пространственного распределения плотности тока в поперечном сечении пучка. Полученные данные позволили связать эти колебания с конвективным усилением волн пространственного заряда на участке дрейфа ВЭП и обосновать возможность снижения их интенсивности при повышении эмиссионной однородности используемого терموкатода.

4. Влияние низкочастотных колебаний пространственного заряда на характеристики винтового электронного потока

Переменные поля, существующие в ВЭП при возбуждении в нем различных неустойчивостей, являются основным источником разброса электронов по энергии. Учитывая достаточно сильное влияние энергетического разброса на эффективность работы гироприборов, важно определить изменение этого параметра в зависимости от интенсивности колебательных процессов в простран-

ственном заряде ВЭП. Исследование влияния паразитных НЧК на энергетический разброс электронов было выполнено в экспериментах с помощью энергоанализатора, установленного в коллекторной области 4-мм гиротрона [20], а также в расчетах при численном моделировании динамики захваченного в ловушку объемного заряда [32].

Эксперименты показали, что даже при малой амплитуде НЧК вблизи порога их возбуждения уширение энергетического спектра электронов, вызванное действием переменных полей пространственного заряда, может характеризоваться разбросом энергий $\delta\varepsilon = 3\text{--}4\%$. Величина $\delta\varepsilon$ в данном случае определялась по полной ширине спектра электронов без учета фракций с наибольшими и наименьшими энергиями, количество частиц в которых составляет 10% от суммарного числа частиц в ВЭП. При увеличении амплитуды НЧК наблюдался рост энергетического разброса и в режимах с интенсивными колебаниями (при расчетном питч-факторе $\alpha \geq 1.7$), значения величины $\delta\varepsilon$ составляли 7–10%. Отметим, что в данных экспериментах предпринимались меры для подавления иных источников энергетического разброса, кроме низкочастотных колебаний пространственного заряда в области между катодом и полкой магнитного поля. В частности, для подавления возбуждения электромагнитного излучения на частотах циклотронного резонанса в гиротроне использовался специальный поглотитель, который был установлен в области полки магнитного поля вместо резонатора.

Данные экспериментов в целом удовлетворительно согласуются с результатами расчетов спектров энергий электронов в потоке, поступающем в область резонатора. Например, для рабочего режима 4-мм гиротрона

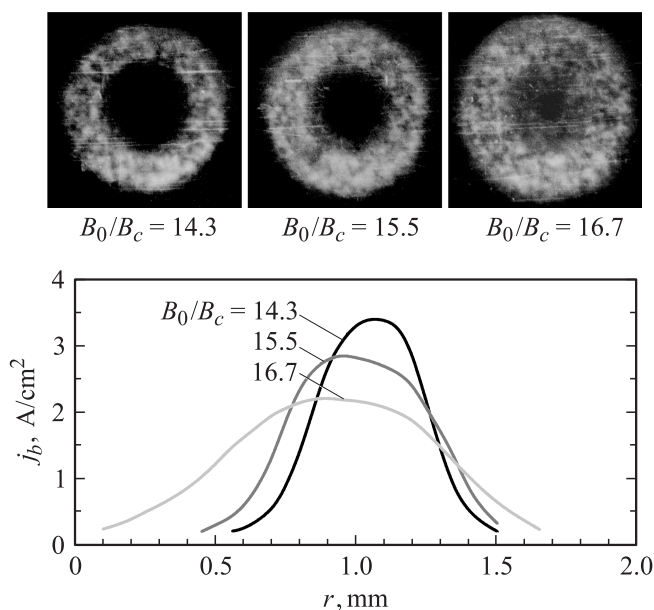


Рис. 5. Фотографии изображения ВЭП в приборе ЭОСГ-1 (а) и соответствующие радиальные распределения плотности электронного тока $j_b(r)$ (b) при разных значениях коэффициента магнитной компрессии B_0/B_c ($U_0 = 12$ kV, $B_0 = 2.35$ T, $I_b = 0.1$ A, $\tau = 20$ μ s).

при значениях пичт-фактора и скоростного разброса в „холодном“ пучке $\alpha_0 = 1.3$ и $\delta v_{\perp rms} = 10.6\%$ в состоянии насыщения, когда амплитуда колебаний изменялась незначительно с течением времени, разброс по энергии $\delta \epsilon$ составлял 3–3.5%. При этом важно, что спектры энергий характеризовались наличием нескольких максимумов. В данной расчетной модели это означает, что в потоке присутствуют выделенные „пучки“ с разными продольными скоростями, что может являться причиной двух- или многопучковой неустойчивости.

С использованием распределенной мишени, состоящей из малых частиц люминофора, в приборе ЭОСГ-1 была определена поперечная структура ВЭП при разной амплитуде паразитных НЧК [26]. Фотографии пучка в поперечном сечении и соответствующие им зависимости усредненной по азимуту плотности тока ВЭП от радиальной координаты, полученные при разных значениях коэффициента магнитной компрессии B_0/B_c , приведены на рис. 5. В отсутствие паразитных НЧК ($\alpha < \alpha_{thr}$) измеренные параметры пучка — средний радиус R_b и толщина стенки ΔR_b — примерно совпадали с рассчитанными в рамках адиабатической теории ЭОС гиротрона (например, [37]). Режим с $B_0/B_c = 14.3$ (рис. 5) характеризовался малой амплитудой НЧК ($\alpha \gtrsim \alpha_{thr}$). При повышении B_0/B_c с 14.3 до 16.7 амплитуда колебаний возрастала на ~ 20 dB, что сопровождалось увеличением стенки пучка примерно в 2 раза. Изменение геометрических параметров ВЭП было частично вызвано изменением коэффициента магнитной компрессии. Однако основная причина увеличения ΔR_b была связана с радиальным смещением электронов под дей-

ствием переменного поля объемного заряда. На основе полученных данных было определено возможное радиальное смещение электронов в присутствии НЧК для пучков различных систем гиротронного типа. При анализе использовались данные расчетов интенсивности колебательного процесса в ловушке, выполненных с использованием описанной выше методики численного моделирования. Показано, например, что в экспериментальном гиротроне в режимах с интенсивными НЧК величина ΔR_b может достигать значений $(0.5-0.7)\lambda$, где $\lambda = 4$ mm — длина волны выходного СВЧ-излучения. Подобное довольно значительное уширение пучка может быть причиной низкой эффективности генерации СВЧ-излучения в гироприборах (например, [38]).

В приборе ЭОСГ-3 были экспериментально определены плотность тока и спектр энергий электронов в потоке, бомбардирующем катод в присутствии паразитных НЧК. В измерениях использовался анализатор с тормозящим полем, установленный внутри катодного блока лампы [29]. В режимах с интенсивными колебаниями плотность тока бомбардировки составляла примерно 1% от плотности тока термоэмиссии с катода МИП, а максимальная энергия бомбардирующих электронов достигала ~ 400 eV при ускоряющем напряжении $U_0 = 7.8$ kV. В целом полученные в эксперименте данные подтвердили сделанные в рамках теоретического анализа выводы о необходимости учета вторичных электронов, эмитируемых с катода в присутствии НЧК, при моделировании физических процессов в объемном заряде ВЭП гироприборов [21,32].

5. Управление низкочастотными колебаниями пространственного заряда ВЭП

Способом управления развитием коллективных процессов в пространственном заряде ВЭП гироприборов может являться регулирование распределений электрического и магнитного полей, влияющих на траектории электронов в области между катодом и резонатором. Ниже приведены данные исследований, в которых регулирование полей было использовано для подавления паразитных низкочастотных колебаний в захваченном в ловушку пространственном заряде, для повышения на этой основе качества пучка и КПД гиротрона. Разработанные методы подавления НЧК были основаны:

- 1) на регулировании распределения электрического поля в прикатодной области МИП, в том числе при изменении потенциала управляющего электрода, изолированного от катодного блока гиротрона,
- 2) на изменении распределения магнитного поля на участке перемagnичивания пучка между катодом и резонатором.

Рассматривались два основных механизма подавления колебаний: за счет введения дополнительных потерь электронов из ловушки и в результате воздействия на

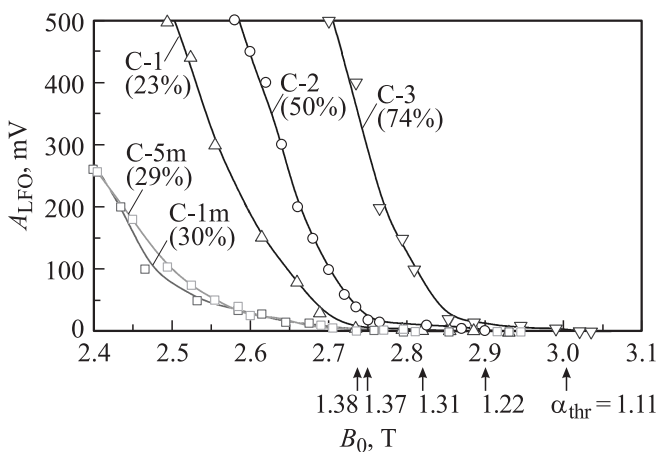


Рис. 6. Зависимости амплитуды НЧК A_{LFO} от индукции магнитного поля B_0 для стандартной (катоды С-1, С-2, С-3) и модифицированной (катоды С-1м и С-5м) катодных систем ($U_0 = 30$ кВ, $I_b = 10$ А, $B_0/B_c = 18.35$). Для каждого из катодов указаны значения коэффициента эмиссионной неоднородности δj_e (в скобках) и порогового питч-фактора α_{thr} возникновения НЧК.

инкремент развития неустойчивости в захваченном в ловушку пространственном заряде.

В результате проведенных исследований было дано экспериментальное подтверждение целесообразности использования для подавления паразитных НЧК модифицированной катодной системы с увеличенным углом наклона образующей конической части катода (катодным углом) в области над эмитирующим пояском, получившей название катода с „юбкой“ (например, [39]). Применение такого катодного узла позволяет уменьшить коэффициент отражения электронов от магнитной пробки за счет изменения вида функции распределения по поперечным скоростям и ослабить негативное влияние вторичных электронов с катода на скорость накопления заряда в ловушке. На рис. 6 сравниваются зависимости $A_{LFO}(B_0)$, измеренные при стандартной катодной системе с эмиттерами С-1, С-2 и С-3 и при модифицированной системе с эмиттерами С-1 и С-5 (обозначены как С-1м и С-5м). Для каждого из катодов указаны значения коэффициента эмиссионной неоднородности δj_e (в скобках) и порогового питч-фактора α_{thr} , соответствующего возникновению НЧК. Видно, что при использовании катода с „юбкой“ уменьшается амплитуда паразитных колебаний и увеличивается пороговый питч-фактор даже по сравнению с более однородными стандартными катодами.

Следующий шаг в развитии метода оптимизации распределения электрического поля в прикатодной области МИП состоял в использовании изолированного от катода управляющего электрода, с помощью которого можно было регулировать распределение поля непосредственно в процессе работы прибора [40]. Данным электродом служила часть элемента катодного узла („юбки“), расположенного над эмитирующим пояском.

В расчетах с помощью кода EGUN было показано, что при оптимальном отрицательном потенциале управляющего электрода относительно катода можно добиться заметного снижения скоростного разброса в пучке по сравнению с режимом, когда напряжение на электроде отсутствует, при сохранении среднего питч-фактора на постоянном уровне. В эксперименте же было отмечено уменьшение амплитуды паразитных колебаний при малых положительных напряжениях на управляющем электроде, когда питч-фактор в пучке был больше по сравнению со случаем отсутствия этого напряжения. Данный эффект мы связываем с дополнительным уходом электронов из ловушки на этот электрод и снижением плотности захваченного пространственного заряда.

Регулирование продольного распределения магнитного поля $B(z)$ в экспериментальных приборах осуществлялось с помощью управляющих катушек, установленных на участке компрессии ВЭП (например, [20,30]). Были реализованы распределения магнитного поля, при которых траектории ведущих центров электронных орбит приближены к трубе дрейфа в локальной области вблизи управляющей катушки. В случае таких распределений подавление НЧК было связано с осаждением на трубе дрейфа электронов, в первую очередь из ореола ВЭП, в котором сосредоточены захваченные в ловушку частицы. Работа экспериментальных приборов была также реализована при распределениях $B(z)$, соответствующих уменьшенному инкременту неустойчивости в захваченном в ловушку пространственном заряде. На рис. 7 показаны зависимости $A_{LFO}(B_0)$, измеренные при начальном распределении магнитного поля (кривая 1) и при распределении, полученном при попутном включении управляющей катушки и токе через эту катушку, равном току основного соленоида (кривая 2). При таких параметрах включения управляющей катушки было реализовано распределение $B(z)$, близкое к оптимизи-

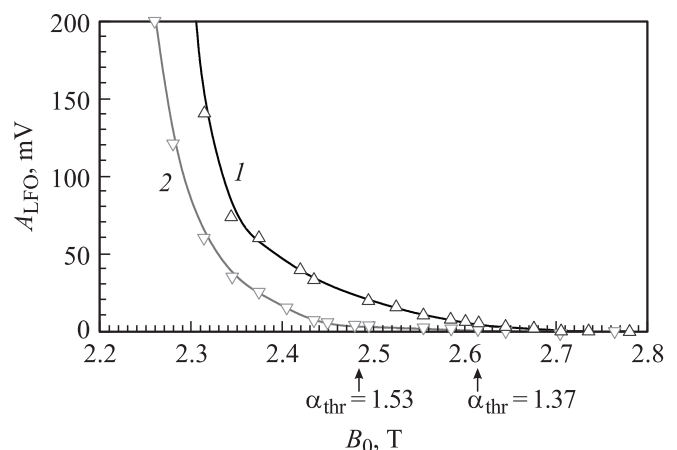


Рис. 7. Гиротрон с модифицированной катодной системой: зависимости амплитуды НЧК A_{LFO} от индукции магнитного поля B_0 при распределениях $B(z)$, полученных при выключенной (кривая 1) и включенной (кривая 2) управляющей катушке (катод С-1м, $U_0 = 30$ кВ, $I_b = 10$ А, $B_0/B_c = 17.73$). Отмечены пороговые значения питч-фактора α_{thr} .

рованному распределению, полученному при моделировании динамики пространственного заряда в ловушке (см. разд. 3). Приведенные на рис. 7 зависимости, полученные в гиротроне с установленным в нем катодом с „юбкой“, показывают, что переход к оптимизированному распределению магнитного поля позволяет обеспечить стабильную работу прибора в отсутствие паразитных НЧК при больших питч-факторах, превышающих 1.5.

Совместное применение разработанных методов подавления НЧК в экспериментальном гиротроне, оснащенном термокатодом с достаточной степенью эмиссионной однородности ($\delta j_e \approx 25\%$), позволило обеспечить высокое качество ВЭП в режимах с большим питч-фактором и добиться на этой основе повышенного КПД прибора [31]. При расчетном питч-факторе $\alpha \approx 1.55$ в отсутствие НЧК был зафиксирован КПД на рабочей моде $\eta \approx 42\%$, который примерно в 1.3 раза больше по сравнению с КПД гиротрона в расчетном режиме работы при $\alpha \approx 1.28$. Повышение же питч-фактора в режимах, когда существовали паразитные колебания, приводило к увеличению их амплитуды, что негативно сказывалось на качестве ВЭП и КПД прибора.

Заключение

Таким образом, исследования, выполненные в различных гиротронных системах, показали возможность возбуждения в электронном пространственном заряде таких систем динамических процессов различной природы в широком диапазоне частот. Важное место среди этих процессов отводится паразитной низкочастотной неустойчивости, развивающейся в объемном заряде, захваченном в ловушку между катодом и пробкой магнитного поля.

Детальное экспериментальное и теоретическое исследование НЧК, связанных с развитием данной неустойчивости, было выполнено в СПбГПУ с использованием различных приборов гиротронного типа и специально разработанной методики численного моделирования. В результате этого исследования были определены характеристики паразитных НЧК и показано, что они могут возбуждаться при значениях питч-фактора и скоростного разброса, близких к реализуемым в пучках мощных гиротронов. Введенная величина порогового питч-фактора возбуждения колебаний может служить удобным параметром контроля качества ВЭП в процессе эксплуатации гироприборов. На базе полученных данных обоснован механизм развития неустойчивости в ансамбле неизохронных электронных осцилляторов в ловушке, подобный неустойчивости отрицательной массы.

Исследовано влияние НЧК на основные характеристики ВЭП. Полученные данные позволяют определить снижение качества пучка вследствие повышения интенсивности НЧК, проявляющееся в:

- 1) увеличении энергетического разброса;

- 2) смещении электронов поперек силовых линий магнитного поля и, как следствие, размытии поперечной структуры ВЭП;

- 3) увеличении НЧ-модуляции плотности заряда и появлении выделенных „пучков“ с разными продольными скоростями;

- 4) возрастании плотности тока электронов, бомбардирующих катод, и уширении спектра их энергий.

Разработаны и реализованы методы подавления НЧК, основанные на оптимизации распределения электрического поля в прикатодной области МИП и распределения магнитного поля в области перемагничивания. С применением разработанных методов подавления колебаний была реализована работа 74.2 GHz, 100 kW гиротрона при больших питч-факторах (более 1.5) и высоком качестве ВЭП, что позволило увеличить примерно в 1.3 раза КПД данного прибора по сравнению с расчетным режимом работы.

Настоящая работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 11-02-01442) и Минобрнауки России в рамках договора № 11.G34.31.0041.

Список литературы

- [1] Гапонов А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 2. № 3. С. 450–462.
- [2] Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1414–1453.
- [3] Applications of high-power microwaves / Ed. by A.V. Gapov-Grekhov, V.L. Granatstein. Norwood, MA: Artech House. 1994. 364 p.
- [4] Nusinovich G.S. Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 2004. 352 p.
- [5] Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers, update 2010 // KIT Scientific Report 7575. Karlsruhe Institute of Technology, 2011. 124 p.
- [6] Запезалов В.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 8. С. 559–572.
- [7] Omori T., Henderson M.A., Albajar F. et al. // Fusion Engineering and Design. 2011. Vol. 86. N 6–8. P. 951–954.
- [8] Запезалов В.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 10. С. 864–871.
- [9] Tsimring Sh.E. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2001. Vol. 22. N 10. P. 1433–1468.
- [10] Gantenbein G., Dammertz G., Flamm J. et al. // IEEE Trans. Plasm. Sci. 2010. Vol. 38. N 6. P. 1168–1177.
- [11] Братман В.Л. // ЖТФ. 1976. Т. 46. Вып. 10. С. 2030–2036.
- [12] Bratman V.L., Dumbrajs O., Nikkola P., Savilov A.V. // IEEE Trans. Plasm. Sci. 2000. Vol. 28. N 3. P. 633–637.
- [13] Li H., Antonsen T.M. // Phys. Plasm. 1994. Vol. 1. N 3. P. 714–729.
- [14] Lau Y.Y. // IEEE Trans. Electron Devices. 1984. Vol. 31. N 3. P. 329–337.
- [15] Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Мусеев М.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 2. С. 121–133.
- [16] Dumbrajs O., Koponen J.P.T. // Phys. Plasmas. 1999. Vol. 6. N 6. P. 2618–2621.
- [17] Dumbrajs O., Nikkola P., Piosczyk B. // Int. J. Electron. 2001. Vol. 88. N 2. P. 215–224.

- [18] Братман В.Л., Глявин М.Ю., Гольденберг А.Л., Савилов А.В. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 4. С. 90–94.
- [19] Лукша О.И., Соминский Г.Г. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 11. С. 160–168.
- [20] Louksha O., Piosczyk B., Sominski G. et al. // IEEE Trans. Plasma. Sci. 2006. Vol. 34. N 3. P. 502–511.
- [21] Мануилов В.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 10. С. 872–879.
- [22] Лыгин В.К., Цимринг Ш.Е., Шевцов Б.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 4. С. 419–425.
- [23] Schuldt R., Borie E. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1995. Vol. 16. N 10. P. 1675–1700.
- [24] Yan R., Antonsen T.M., Nusinovich G.S. // Phys. Plasma. 2008. Vol. 15. N 10. P. 103 102–103 102–8 .
- [25] Иванов А.А., Кориунов С.М., Берюлева Н.С., Тарасов С.П. // ЖЭТФ. 1973. Т. 65. № 5. С. 1857–1865.
- [26] Лукша О.И., Цыбин О.Ю. // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (9-я зимняя школа-семинар инженеров). Саратов: Изд-во СГУ, 1993. С. 20–29.
- [27] Лукша О.И., Соминский Г.Г. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 2. С. 198–202.
- [28] Борзенков Д.В., Лукша О.И. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 9. С. 98–102.
- [29] Louksha O.I., Sominski G.G., Kas'yanenko D.V. // J. Comm. Tech. Electron. 2000. Vol. 45. Suppl. 1. P. 71–76.
- [30] Касьяненко Д.В., Лукша О.И., Пиосчик Б. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47. № 5–6. С. 463–470.
- [31] Louksha O., Piosczyk B., Samsonov D. et al. // Joint 32nd Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, and 15th Int. Conf. Terahertz Electronics, 3–7 September 2007, Cardiff, UK. V. 2. P. 880–881.
- [32] Лукша О.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 5–6. С. 425–437.
- [33] Мануилов В.Н., Полушкина С.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 10. С. 795–803.
- [34] Yan R., Antonsen T.M., Nusinovich G.S. // IEEE Trans. Plasma. Sci. 2010. Vol. 38. N 6. P. 1178–1184.
- [35] Hermansfeldt W.B. Electron trajectory program // SLAC Report 226, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, 1979. 119 p.
- [36] Piosczyk B., Arnold A., Dammertz G. et al. // IEEE Trans. Plasma. Sci. 2002. Vol. 30. N 3. P. 819–827.
- [37] Гольденберг А.Л., Панкратова Т.Б. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1971. № 9. С. 81–89.
- [38] Pu R., Nusinovich G.S., Sinityn O.V., Antonsen T.M., jr. // Phys. Plasmas. 2010. Vol. 17. N 8. P. 083 105–083 105-6.
- [39] Кривошеев П.В., Мануилов В.Н. // Прикладная физика. 2004. № 1. С. 101–104.
- [40] Лукша О.И., Самсонов Д.Б., Соминский Г.Г., Цапов А.А. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 6. С. 101–105.