

10;12

Повышение качества винтового электронного потока и КПД гиротрона при регулировании распределения электрического поля в области магнетронно-инжекторной пушки

© О.И. Лукша, Д.Б. Самсонов, Г.Г. Соминский, А.А. Цапов

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

(Поступило в Редакцию 7 сентября 2011 г.)

Разработан метод регулирования распределения электрического поля в прикатодной области магнетронно-инжекторной пушки. Изучена теоретически и экспериментально возможность повышения качества винтового электронного потока при оптимизации распределения электрического поля в импульсном гиротроне 4 мм диапазона длин волн. Определены распределения полей, при которых уменьшены разброс скоростей электронов в пучке, коэффициент отражения электронов от магнитной пробки и интенсивность паразитных низкочастотных колебаний. Продемонстрирована возможность повышения КПД гиротрона в результате повышении качества пучка при оптимизированном распределении электрического поля.

Введение

В настоящее время наиболее эффективными мощными генераторами когерентного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн являются гиротроны, представляющие собой электронные лазеры на циклотронном резонансе с винтовыми электронными пучками и открытыми резонаторами. Важнейшей особенностью применения гиротронов является нагрев плазмы и управление током в установках управляемого термоядерного синтеза. Кроме этого, они используются для дальней радиолокации, ускорения заряженных частиц, коротковолновой спектроскопии, диагностики плазмы, модификации свойств материалов и в ряде других приложений (например, [1–3]).

Эффективность и предельные достижимые параметры гиротронов определяются качеством винтового электронного потока (ВЭП), в котором должны сочетаться высокие значения тока и осцилляторной энергии электронов с малым разбросом скоростей и требуемой поперечной структурой пучка. Негативное влияние на качество ВЭП могут оказывать колебательные процессы в электронном пространственном заряде, которые являются следствием развития неустойчивостей различного типа как высокочастотных с частотой, близкой к электронной циклотронной частоте, так и низкочастотных с частотой в диапазоне десятков–сотен мегагерц (см., например, [4–7]). Среди механизмов возникновения низкочастотных колебаний (НЧК) в ВЭП можно выделить неустойчивость, которая развивается в объемном заряде, захваченном в специфическую ловушку между катодом и магнитной пробкой — конечным участком области перемagnичивания пучка перед его поступлением в резонатор. Переменные поля, связанные с развитием паразитных колебаний, обуславливают дополнительный разброс компонент (продольной и поперечной) скорости электронов в ВЭП, вызывают появление разброса по

полной скорости (энергетический разброс), изменяют поперечную структуру пучка, приводят к электронной бомбардировке поверхности катода и появлению вторичных электронов [4–9]. Добиться требуемого качества пучка, поступающего в резонатор, возможно в том случае, когда подавлены паразитные колебательные процессы в электронном пространственном заряде. В частности, при условии подавления паразитных НЧК в ловушке может быть увеличено рабочее значение питч-фактора,¹ что при сохранении на низком уровне скоростного и энергетического разбросов позволит реализовать работу гиротронов с повышенным КПД.

Методы подавления паразитных колебаний пространственного заряда, основанные на оптимизации распределений электрического и магнитного полей в области формирования ВЭП, были экспериментально исследованы на кафедре физической электроники СПбГПУ с использованием импульсного гиротрона с длиной волны излучений 4 мм и выходной мощностью ~ 100 кВт [5,11]. Один из таких методов связан с увеличением угла наклона образующей конической части катода (катодного угла) магнетронно-инжекторной пушки (МИП) в области над эмитирующим пояском. Подобная модификация катодной системы позволяет снизить отражение первичного ВЭП от магнитной пробки за счет изменения вида функции распределения электронов по скоростям, а также ослабить влияние вторичных электронов с катода на накопление пространственного заряда в ловушке гиротрона (см., например, [12]). Гиротронные катоды с увеличенным катодным углом в области

¹ Величиной питч-фактора $\alpha = v_{\perp}/v_{\parallel}$ (v_{\perp} и v_{\parallel} — поперечная и продольная компоненты скорости электрона) принято характеризовать долю сосредоточенной в поперечном движении электронов энергии, из которой „черпается“ энергия выходного СВЧ-излучения в гирорезонансных приборах. Как правило, значения среднего по ансамблю электронов питч-фактора в рабочих режимах мощных гиротронов не превышают 1.2–1.4 (см., например, [10]).

над эмитирующим пояском получили название катодов с „юбкой“. В экспериментах при использовании катода с „юбкой“, геометрия которого была выбрана на основе данных траекторного анализа, удалось добиться подавления паразитных НЧК, что позволило в их отсутствие реализовать режимы работы гиротрона с большим питч-фактором и высоким КПД [11]. Основанный на данных траекторного анализа выбор фиксированного катодного угла, очевидно, не оставляет возможности варьировать распределение электрического поля в области МИП непосредственно в процессе измерений. Однако такое варьирование может привести к дополнительному подавлению паразитных колебаний, если иметь в виду, что траекторный анализ не учитывает ряд важных эффектов, способных повлиять на развитие этих колебаний. В частности, это касается влияния неоднородностей эмиссии с катода на отражение электронов от магнитной пробки. Отметим при этом, что динамика пространственного заряда в ловушке в принципе не анализируется при решении статической задачи траекторного анализа.

Метод повышения качества ВЭП, связанный с регулированием распределения электрического поля в прикатодной области МИП, получил свое развитие в исследованиях, описанных в настоящей работе. В ней представлены теоретические и экспериментальные результаты по управлению характеристиками электронного пучка и параметрами выходного излучения гиротрона при использовании пушки с изолированным от катодного блока управляющим электродом.

Траекторный анализ винтового электронного потока в электронно-оптической системе гиротрона с управляющим катодным электродом

Расчет характеристик ВЭП был выполнен в рамках решения самосогласованной задачи траекторного анализа с помощью катода EGUN [13] применительно

Основные геометрические параметры и характеристики рабочего режима экспериментального гиротрона

Параметр	Значение
Радиус резонатора R_{cav}	14.45 mm
Средний радиус пучка в резонаторе R_b	8.43 mm
Средний радиус эмитирующего пояса катода R_c	35 mm
Катодный угол ϕ_c	$35^\circ/50^\circ$
Рабочая мода	TE _{12,3}
Рабочая частота f_0	74.2 GHz
Ускоряющее напряжение U_0	30 kV
Ток электронного пучка I_b	10 A
Индукция магнитного поля в области резонатора B_0	2.75 T
Индукция магнитного поля у катода B_c	0.152 T
Питч-фактор в области резонатора α	1.28

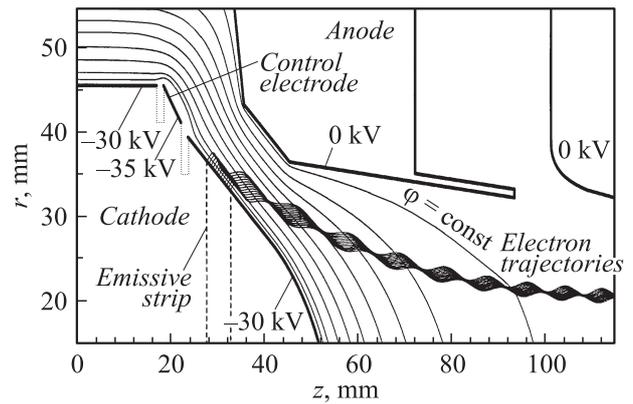


Рис. 1. Область магнетронно-инжекторной пушки гиротрона с управляющим катодным электродом. Изображены рассчитанные траектории электронов и эквипотенциальные линии $\phi = \text{const}$ ($U_0 = 30 \text{ kV}$, $B_0 = 2.75 \text{ T}$, $I_b = 10 \text{ A}$, $B_0/B_c = 18.02$, $U_{\text{cont}} = -5 \text{ kV}$).

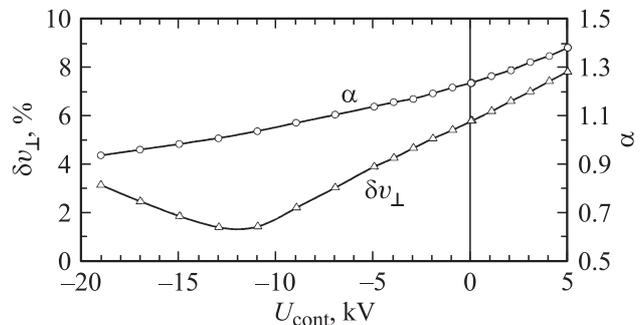


Рис. 2. Рассчитанные зависимости разброса поперечных скоростей δv_{\perp} и среднего питч-фактора α от напряжения на управляющем электроде U_{cont} ($U_0 = 30 \text{ kV}$, $B_0 = 2.75 \text{ T}$, $I_b = 10 \text{ A}$, $B_0/B_c = 18.02$).

к электронно-оптической системе гиротрона СПбГПУ. Основные геометрические параметры и характеристики расчетного рабочего режима данного прибора указаны в таблице. Катодный узел гиротрона был дополнен специальным управляющим электродом, расположенным над эмитирующим пояском (см. рис. 1). Распределение электрического поля в области МИП варьировалось при изменении напряжения U_{cont} между этим электродом и катодным блоком. На рис. 1 показаны траектории электронов и эквипотенциальные линии, рассчитанные для рабочего режима гиротрона при напряжении $U_{\text{cont}} = -5 \text{ kV}$. Следует отметить, что поскольку возможности кода EGUN позволяют проводить лишь двумерное моделирование, то в расчетах рассматривали аксиально-симметричную систему, в которой протяженность управляющего электрода по азимуту составляла 360° . Рассчитанные значения питч-фактора α и разброса поперечных скоростей δv_{\perp}^2 в зависимости

² Разброс поперечных скоростей электронов определялся как относительное среднеквадратичное отклонение величины v_{\perp} от ее среднего значения.

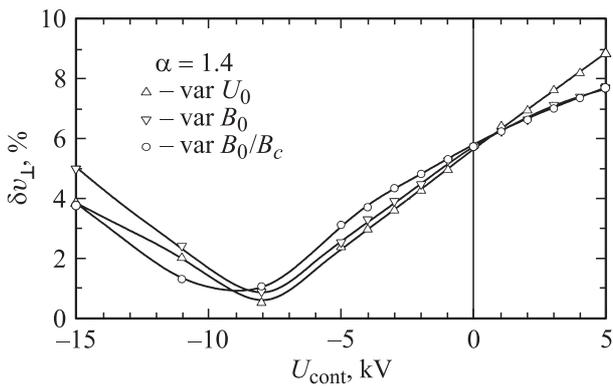


Рис. 3. Рассчитанные зависимости разброса поперечных скоростей δv_{\perp} от напряжения на управляющем электроде U_{cont} при постоянном значении пичч-фактора $\alpha = 1.4$, поддерживаемом за счет изменения ускоряющего напряжения U_0 , индукции магнитного поля B_0 или коэффициента магнитной компрессии B_0/B_c .

от напряжения U_{cont} приведены на рис. 2. Уменьшение управляющего напряжения приводит, очевидно, к снижению среднего пичч-фактора в пучке вследствие уменьшения поперечной компоненты электрического поля в области МИП. При этом минимум разброса поперечных скоростей достигается при $U_{cont} \approx -12$ kV.

Представляет интерес зависимость скоростного разброса от управляющего напряжения при постоянном среднем пичч-факторе. В расчетах пичч-фактор поддерживался неизменным за счет варьирования ускоряющего напряжения, магнитного поля на полке или коэффициента магнитной компрессии. Соответствующие зависимости показаны на рис. 3. Видно, что изменением напряжения U_{cont} можно добиться заметного снижения скоростного разброса электронов в ВЭП по сравнению с исходным состоянием при $U_{cont} = 0$. Перспективной с точки зрения повышения качества пучка является подача на управляющий электрод отрицательного напряжения, что может привести к уменьшению отражения электронов от магнитной пробки и, следовательно, к снижению интенсивности паразитных НЧК при сохранении среднего пичч-фактора в пучке на достаточно высоком уровне.

Методика измерений и экспериментальные результаты

Измерения были выполнены в экспериментальном гиротроне (см. таблицу), который был оснащен набором диагностик для определения основных характеристик электронного потока (например, [5]). Для формирования магнитного поля в приборе использовалась система соленоидов, работающих при комнатной температуре. Источником электронов являлся гексаборид-лантановый термоэмиттер, работающий в типичном для мощных гирорезонансных устройств режиме ограничения тока температурой. Гиротрон эксплуатировался в режиме

разовых импульсов длительностью $40 \mu s$, минимальная пауза между которыми определялась временем зарядки емкостного накопителя магнитной системы и составляла примерно 2 min. Динамические процессы в пространственном заряде ВЭП в диапазоне частот 10–350 MHz исследовались с помощью ВЧ-зонда, локально связанного с электронным пучком, и внешней ВЧ-антенны. Пространственные неоднородности термоэлектронной эмиссии с катода определялись при регистрации тока электронов, прошедших через малое отверстие в аноде, в зависимости от азимутального положения катодного блока в отсутствие приложенного магнитного поля.

Для регулирования распределения электрического поля в области МИП часть элемента катодного узла („юбки“), расположенного над эмитирующим пояском и имеющего увеличенный угол наклона к оси, была заменена управляющим электродом, изолированным от других элементов катодной системы (рис. 4). Длина управляющего электрода в азимутальном направлении составляла примерно 1/4 от длины окружности эмитирующего пояска. Элемент катодного узла с управляющим электродом был соединен через керамический изолятор с неподвижным анодом. Остальные элементы катодной системы, включая эмитирующий поясок, имели возможность вращаться по азимуту. При вращении катода можно было располагать управляющий электрод вблизи областей катода с разной эмиссионной активностью. Таким образом, в эксперименте воздействие управляющего напряжения распространялось лишь на $\sim 1/4$ от первичного пучка. Однако при этом открывались дополнительные возможности влияния на отражение электронов от магнитной пробки и интенсивность паразитных НЧК, что связано, в частности, с трехмерно-неоднородным распределением плотности тока и электрического поля в области МИП, имеющим место при неоднородностях эмиссии с катода. Эти возможности не могли быть верифицированы в рамках двумерного траекторного анализа, описанного выше.

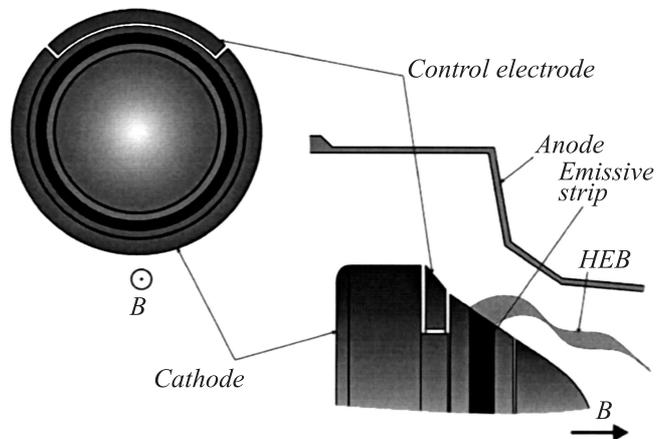


Рис. 4. Схематическое изображение области магнетронно-инжекторной пушки экспериментального гиротрона с катодной системой, оснащенной управляющим электродом.

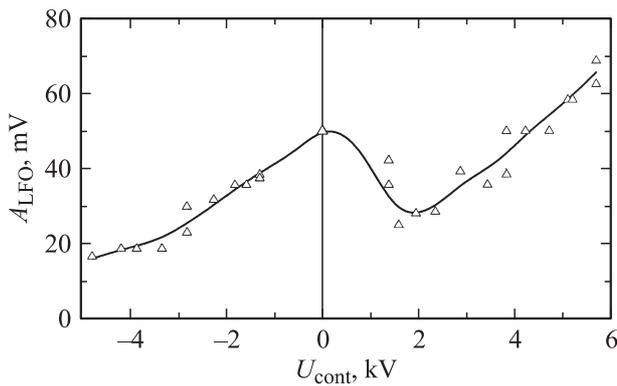


Рис. 5. Зависимость амплитуды низкочастотных колебаний A_{LFO} от напряжения на управляющем электроде U_{cont} ($U_0 = 22 \text{ kV}$, $B_0 = 2.18 \text{ T}$, $I_b = 3 \text{ A}$, $B_0/B_c = 18.02$).

Эксперименты по влиянию управляющего напряжения на паразитные НЧК были выполнены при разных значениях ускоряющего напряжения U_0 и тока пучка I_b , включая рабочие значения данных параметров $U_0 = 30 \text{ kV}$ и $I_b = 10 \text{ A}$. Основное внимание в исследованиях было уделено режимам работы гиротрона с относительно малой амплитудой колебаний (A_{LFO}) вблизи порога их возбуждения. В таких режимах, добившись подавления НЧК и увеличения порогового питч-фактора их возбуждения, можно было рассчитывать на достижение высокого КПД гиротрона. Характер зависимостей амплитуды колебаний A_{LFO} от напряжения U_{cont} в этих режимах был подобен для разных значений U_0 и I_b . Типичная зависимость $A_{\text{LFO}}(U_{\text{cont}})$ приведена на рис. 5. Как видно на рисунке, можно добиться снижения амплитуды колебаний как при отрицательной, так и при положительной полярности напряжения U_{cont} , если сравнивать с исходным состоянием при $U_{\text{cont}} = 0$. Повышение A_{LFO} , наблюдаемое при увеличении U_{cont} (в областях $U_{\text{cont}} < 0$ и $U_{\text{cont}} > 2 \text{ kV}$), по-видимому, является результатом увеличения среднего питч-фактора и скоростного разброса в пучке (см. рис. 2).

Наряду с этим обращает на себя внимание пониженная интенсивность колебаний в области малых положительных значений управляющего напряжения (рис. 5). Причина подавления колебаний в этой области может быть связана с появлением дополнительных потерь электронов из ловушки. Длительное время, находясь в ловушке, электроны могут дрейфовать в радиальном и азимутальном направлениях под действием статических или меняющихся во времени полей. Как следствие, они могут сместиться в область действия вытягивающего поля управляющего электрода и осесть на нем. Потери частиц из ловушки приведут к уменьшению плотности захваченного пространственного заряда и снижению интенсивности паразитных колебаний.

В экспериментах было отмечено, что степень подавления НЧК, достигаемая при малом положительном напряжении U_{cont} , зависит от азимутального положения

управляющего электрода по отношению к эмитирующему пояску. Азимутальное распределение плотности тока эмиссии используемого гексаборид-лантанового катода было типичным для катодов такого типа и характеризовалось как мелкомасштабными неоднородностями с размером порядка нескольких миллиметров, так и крупномасштабными неоднородностями, вызванными неравномерностью нагрева термопояска (см., например, [5]). Максимальное подавление колебаний было зафиксировано, когда управляющий электрод располагался вблизи участка катода с повышенной плотностью тока эмиссии. Отсюда можно предположить, что причина уменьшения интенсивности колебаний в области малых положительных напряжений U_{cont} может быть также связана с подавлением негативного влияния эмиссионной неоднородности на параметры ВЭП, определяющие отражение электронов от магнитной пробки, — средний питч-фактор, скоростной разброс, вид функции распределения по скоростям. При положительном напряжении на управляющем электроде мы компенсируем влияние аномальной (в нашем случае повышенной) плотности тока с близлежащей к нему области термокатода на распределение электронов по скоростям в ВЭП. Это приводит к тому, что уменьшается отражение электронов от магнитной пробки при условии, что средний питч-фактор в пучке возрастает по сравнению с исходным режимом при $U_{\text{cont}} = 0$.

В ходе дальнейших исследований определялось влияние управляющего напряжения на выходную СВЧ-мощность и КПД гиротрона. Основное внимание было сконцентрировано на возможности реализации режимов работы прибора с большим питч-фактором в отсутствие паразитных НЧК. Измерение параметров выходного излучения гиротрона осуществлялось двумя способами: с помощью 4 мм анализатора спектра, позволяющего регистрировать импульсы выходной мощности и частоту выходного излучения, а также с помощью водяного калориметра-нагрузки [5]. Первая часть экспериментов была выполнена в режиме работы прибора, когда управляющее напряжение подавалось с задержкой $\sim 20 \mu\text{s}$ относительно переднего фронта импульса тока ВЭП. В этом случае в течение одного импульса тока пучка можно было производить сравнение исследуемых параметров — амплитуды НЧК и выходной СВЧ-мощности — при наличии напряжения на управляющем электроде и в его отсутствие. Измерения при разных значениях напряжения U_{cont} показали, что наиболее перспективным режимом для достижения наилучшего качества пучка и, следовательно, наибольшего КПД гиротрона является режим с $U_{\text{cont}} \approx 2 \text{ kV}$. Данный режим характеризовался уменьшенной амплитудой колебаний и увеличенной СВЧ-мощностью по сравнению с $U_{\text{cont}} = 0$.

Типичные зависимости КПД гиротрона η от индукции магнитного поля B_0 в области возбуждения рабочей моды, измеренные при $U_{\text{cont}} = 0$ и $U_{\text{cont}} = 2 \text{ kV}$, приведены на рис. 6. Эти данные были получены при измерении выходной СВЧ-мощности с помощью водяного

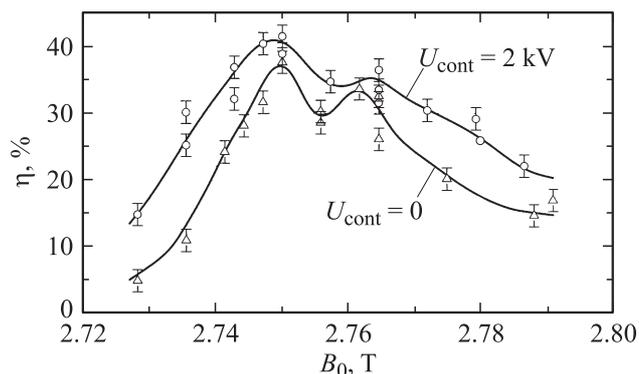


Рис. 6. Зависимости КПД экспериментального гиротрона η в области возбуждения рабочей моды $TE_{12,3}$ от индукции магнитного поля B_0 при $U_{\text{cont}} = 0$ и 2 кВ ($U_0 = 30$ кВ, $I_b = 10$ А, $B_0/B_c = 18.39$).

калориметра в режиме с длительностью импульса управляющего напряжения, равного длительности импульса тока ВЭП ($\tau = 40 \mu\text{s}$). Следует отметить, что кроме рабочей моды $TE_{12,3}$ с максимумом выходной мощности при $B_0 \approx 2.75$ Т в исследуемом диапазоне магнитных полей возбуждалась также мода $TE_{-9,4}$ ($B_0 \geq 2.76$ Т) на близкой с рабочей модой частоте. Для идентификации возбуждаемых мод были использованы данные расчетов взаимодействия ВЭП с электромагнитным полем в резонаторе и результаты измерения частоты выходного излучения гиротрона. Достигнутый максимальный КПД гиротрона при $U_{\text{cont}} = 0$ составляет примерно 37%, что на 5% меньше, чем было получено ранее в данном приборе при аналогичных распределениях электрического и магнитного полей [11]. Это различие авторы связывают с большей степенью эмиссионной неоднородности катода, который использовался в описанных выше экспериментах. На рис. 6 видно, что подача напряжения на управляющий электрод приводит к увеличению эффективности работы прибора. В области значений магнитного поля B_0 , соответствующих максимуму выходной мощности в пределах рабочей моды, КПД гиротрона при напряжении $U_{\text{cont}} = 2$ кВ примерно на 4% больше по сравнению с $U_{\text{cont}} = 0$ и составляет $\sim 41\%$.

Заключение

Таким образом, полученные экспериментальные и расчетные данные показывают перспективность разработанного метода повышения качества ВЭП при регулировании распределения электрического поля в прикатодной области МИП гиротрона. С помощью дополнительного управляющего электрода можно добиться оптимизации распределения электрического поля, при котором будет повышен средний пич-фактор в пучке, уменьшены скоростной разброс электронов, коэффициент отражения от магнитной пробки и амплитуда паразитных низкочастотных колебаний.

Проведенные первые эксперименты показали, что в результате применения разработанного метода улучшения качества ВЭП можно добиться повышения эффективности работы гирорезонансных устройств. В ходе дальнейших экспериментов предполагается проведение более детального исследования характеристик ВЭП и выходного излучения гиротрона в широком диапазоне изменения напряжения управляющего электрода при одновременном регулировании распределения неоднородного магнитного поля в области компрессии пучка.

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

Список литературы

- [1] Денисов Г.Г., Запелалов В.Е., Литвак А.Г., Мясников В.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 10. С. 845–858.
- [2] Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers, update 2008 // Report FZKA 7467, Forschungszentrum Karlsruhe, 2009. 114 p.
- [3] Bratman V., Glyavin M., Idehara T. et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2009. Vol. 37. N 1. P. 36–43.
- [4] Tsimring Sh.E. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2001. Vol. 22. N 10. P. 1433–1468.
- [5] Louksha O., Pioszyk B., Sominski G. et al. // IEEE Trans. Plasma Science. 2006. Vol. 34. N 3. P. 502–511.
- [6] Мануилов В.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 10. С. 872–879.
- [7] Pedrozzi M., Alberti S., Hogge J.P. et al. // Phys. Plasmas. 1998. Vol. 5. N 6. P. 2421–2430.
- [8] Louksha O.I., Sominskii G.G., Kas'yanenko D.V. // J. Comm. Tech. Electron. 2000. Vol. 45. N 1. P. S71–S75.
- [9] Лукаша О.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 5–6. С. 425–437.
- [10] Запелалов В.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 10. С. 864–871.
- [11] Louksha O., Pioszyk B., Samsonov D. et al. // Dig. Joint 32nd Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, and 15th Int. Conf. Terahertz Electronics, 3–7 September 2007, Cardiff, UK. P. 880–881.
- [12] Кривошеев П.В., Мануилов В.Н. // Прикладная физика. 2004. № 1. С. 101–104.
- [13] Hermannfeldt W.B. Electron trajectory program // SLAC Report 226, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, 1979. 119 p.