

10;11;12

## Электронно-оптическая система гиротрона с большой орбитой

© В.Л. Братман, Ю.К. Калынов, В.Н. Мануилов, С.В. Самсонов

Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 28 января 2005 г.)

Разработана термоэмиссионная электронно-оптическая система, формирующая прямолинейный или винтовой электронный пучок с параметрами  $250 \text{ keV}/4 \text{ A}/10 \mu\text{s}$  с высокой степенью компрессии. В прямолинейном пучке достигается компрессия 4400 и плотность тока  $25 \text{ kA}/\text{cm}^2$ . При формировании винтового пучка электроны приобретают начальную вращательную скорость вокруг оси системы (приосевой пучок) в поперечном магнитном поле кикера. Затем их питч-фактор увеличивается до рабочего значения в адиабатически нарастающем магнитном поле. В предварительных экспериментах при использовании такого винтового пучка в гиротроне с большой орбитой получена генерация на 2-й циклотронной гармонике на частоте 223 GHz.

### Введение

Одной из актуальных задач электроники СВЧ является создание мощных и доступных источников когерентного излучения на субмиллиметровых волнах. Соответствующие приборы открыли бы новые возможности в спектроскопии, физике твердого тела, технологии, медицине и ряде других областей науки и техники. Наряду с уже реализованными уникальными источниками — традиционными гиротронами с сильными магнитными полями [1–5] и лазерами на свободных электронах (ЛСЭ) [6,7] на субмиллиметровых волнах представляются перспективными, а возможно, и значительно более простыми так называемые гиротроны с большой орбитой (ГБО) [8–11], которые до сих пор работали на сантиметровых и миллиметровых волнах. В отличие от традиционного гиротрона в ГБО в качестве активной среды используется не поливинтовой, а моновинтовой электронный пучок, все частицы которого в своем движении вдоль оси резонатора совершают ларморовское вращение вокруг нее. В силу симметрии такой приосевой пучок способен возбудить в аксиально-симметричной электродинамической системе лишь моды с азимутальным индексом, совпадающим с номером резонансной циклотронной гармонике [12–17]. Это правило отбора значительно прореживает спектр мод и тем самым упрощает селективное возбуждение высоких циклотронных гармоник по сравнению со случаем традиционного гиротрона. Работа на высоких гармониках позволяет значительно уменьшить величину рабочего магнитного поля.

Необходимые для работы ГБО приосевые электронные пучки принципиально не могут быть получены в аксиально-симметричных магнетронно-инжекторных пушках, использующихся в большинстве традиционных гиротронов. Поэтому при реализации ГБО центр тяжести проблемы перемещается на создание электронно-оптических систем (ЭОС), способных формировать приосевые пучки с достаточно большими значениями тока и вращательной скорости частиц при малом разбросе их скоростей и ведущих центрах. К настоящему

времени в ГБО использовались три типа ЭОС, в каждой из которых сначала формировался прямолинейный электронный пучок, а затем частицам сообщалась вращательная скорость. В первых экспериментах [18,19] накачка вращательной энергии происходила в высокочастотном электромагнитном поле, создаваемом в специальном резонаторе развертки (аналогичная ЭОС используется в магнконах [20]). При этом в выходной резонатор поступал модулированный пучок и прибор работал как усилитель. В генераторных схемах прямолинейный пучок неадиабатически раскачивался поперечным магнитостатическим полем. В ГБО сантиметрового диапазона длин волн [15] частицы прямолинейного трубчатого пучка приобретали вращательную скорость, проходя через область, где ведущее магнитное поле резко меняло свое направление (реверс, или касп, магнитного поля). В релятивистском ГБО коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, работавшем на 3- и 4-й циклотронных гармониках [10], прямолинейный пучок формировался в термоэмиссионной ЭОС, а первоначальная поперечная скорость, сообщаемая частицам кикером, увеличивалась затем до требуемой величины в адиабатическом нарастающем магнитном поле. В данной работе обсуждается модификация ЭОС последнего типа, разработанная для генератора субмиллиметрового диапазона длин волн, и приведены результаты первых экспериментов.

### Особенности модифицированной электронно-оптической системы

Согласно теории [17], селективная работа ГБО на сравнительно высоких циклотронных гармониках с номерами  $s = 3–5$  возможна при энергии частиц больше  $30 \text{ keV}$  и при условии, что разброс ведущих центров электронов  $\Delta R_0$  и смещение пучка от оси не превышают  $0.2\lambda$ , где  $\lambda$  — длина излучаемой волны. При этом для достижения достаточно высокого электронного КПД средний питч-фактор электронов  $g = v_{\perp}/v_{\parallel}$  должен быть не меньше величины 1.0–1.2 при допустимом раз-

бросе поперечных скоростей 20–30%. Здесь  $v_{\perp}$  и  $v_{\parallel}$  — вращательная и поступательная компоненты скорости частицы. При энергии электронов 30–300 кэВ поперечное сечение пучка в рабочем пространстве ГБО представляет собой кольцо со средним радиусом  $(0.1-0.5)\lambda$  и шириной  $(0.2-0.25)\lambda$ . При работе на гармониках  $s = 3-5$  и разумной длине резонатора ГБО необходим пучок с током порядка нескольких ампер. Соответственно в субмиллиметровом диапазоне такой пучок имеет очень высокую плотность порядка 3–10 кА/см<sup>2</sup>. При использовании термокатодов с типичной плотностью тока эмиссии  $j_k < 5 \text{ A/cm}^2$  это означает необходимость сильной компрессии электронного пучка.

В данной работе исследуется ЭОС релятивистского ГБО с рабочей частотой 375 ГГц [21], разработанного на базе существующей высоковольтной установки. Ранее на этой установке уже был получен плотный винтовой пучок с энергией частиц 250 кэВ, током до 10 А, питч-фактором 1.2 и длительностью 10 мкс [10]. При использовании этого пучка была получена селективная генерация на модах  $TE_{3,2}$  на 3-й и  $TE_{4,2}$  на 4-й циклотронных гармониках с частотами 115 и 130 ГГц соответственно при выходной мощности излучения до 100 кВт и КПД до 4%. В ЭОС этого генератора использовалась двухступенчатая схема формирования винтового электронного пучка (ВЭП). Сначала в диодной квазипирсовской пушке со сферическим термокатодом формировался пучок с прямолинейными траекториями частиц (рис. 1, а), а затем электроны приобретали вращательную скорость в поперечном магнитном поле кикера, образованного двумя парами прямоугольных рамок, расположенных вдоль движения пучка на расстоянии около половины ларморовского шага по обе стороны от пучка (рис. 1, б). Импульсный ток в рамках кикера длительностью около 1 нс создавался при разряде через них конденсатора, зарядное напряжение на котором  $U_{\text{kick}}$  определяло рабочую поперечную скорость электронов. После кикера частицы попадали в адиабатически нарастающее магнитное поле, где их вращательная скорость увеличивалась до требуемой величины. При этом полное сжатие пучка (компрессия) по площади достигало 1100 раз, а плотность прямолинейного пучка превышала 3 кА/см<sup>2</sup>. Успешное формирование такого плотного пучка позволило рассчитывать на то, что при определенной модификации подобная система может быть использована и на более коротких волнах.

При переходе к значительно более высокой частоте для уменьшения омических потерь в стенках резонатора ГБО приходится увеличивать радиальный индекс рабочей моды настолько, насколько это допустимо с точки зрения селекции мод. При использовании традиционного гиротронного резонатора и работе на 3-й циклотронной гармонике радиальный индекс может быть увеличен с 2 до 5–8. В то же время на четвертой гармонике уже мода с радиальным индексом 3 имеет значительно больший стартовый ток и омические потери, а с увеличением радиального индекса возникает опасность возбуждения

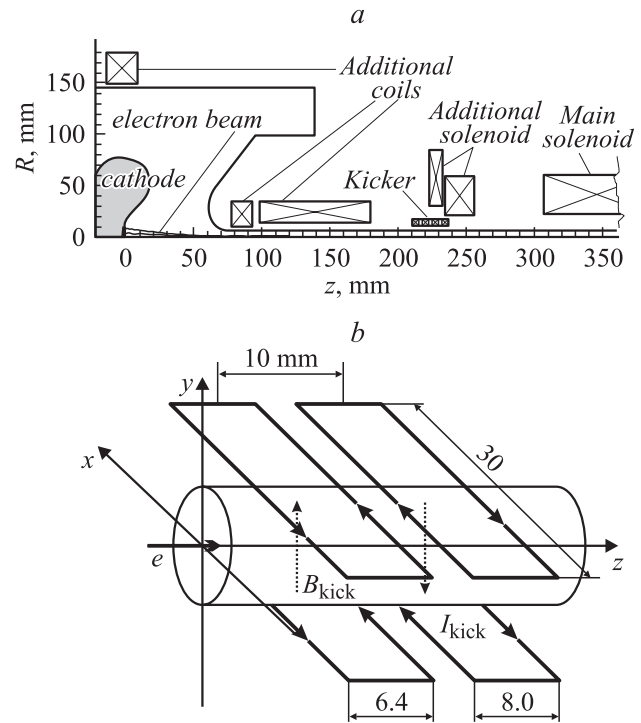


Рис. 1. Модифицированная электронно-оптическая система: а — общая конфигурация, б — схема кикера.

паразитных мод. Поэтому в проекте субмиллиметрового ГБО в качестве рабочей выбрана третья циклотронная гармоника, а в качестве рабочих мод — моды  $TE_{3,p}$  с высоким радиальным индексом  $p = 5-8$ . При этом для достижения частоты 375 ГГц при той же энергии частиц 250 кэВ, что и ранее, необходимо увеличить магнитное поле в рабочем пространстве ГБО до  $B_0 = 6.6 \text{ Т}$ , т.е. почти в четыре раза по сравнению с ранее реализованной системой.

Расчеты показывают, что при питч-факторе электронов  $g = 1$  для эффективной работы генератора на указанных модах достаточен ток пучка 3 А. Для получения такого тока в приосевом пучке с допустимым разбросом ведущих центров при плотности эмиссии 4 А/см<sup>2</sup> требуется компрессия около 4000. При этом, как и в ранее реализованном варианте, магнитное поле на катоде имеет очень малую величину порядка 1.5 мТ. Соответственно ларморовский шаг электронов в прикатодной области составляет десятки сантиметров, а циклотронная частота электронов меньше плазменной частоты пучка. В таких условиях движение частиц на участке нарастания магнитного поля является неадиабатическим, что требует детального численного расчета с учетом сил пространственного заряда. Для анализа пучка в прикатодной области использовалась программа EPOS, позволяющая адекватно рассчитывать траектории частиц при заданной конфигурации осесимметричной ЭОС с учетом статических электрического и магнитного полей пространственного заряда. Более подробно особенности

данной программы рассмотрены в работе [22]. С ростом магнитного поля вдоль продольной координаты отношение квадрата плазменной частоты к циклотронной, а также ларморовский шаг уменьшаются обратно пропорционально полю (с учетом соответствующей компрессии пучка). Начиная со значения поля  $B_a$ , при котором циклотронная частота сравнивается с плазменной, а ларморовский шаг становится в несколько раз меньше характерного масштаба изменения ведущего поля, движение частиц можно рассчитывать по адиабатической теории (кроме области кикера).

На выходе из прикатодной области неидеальность пучка можно характеризовать величиной его радиальных пульсаций или максимальной поперечной скоростью  $v_{\perp a}$ , которой обладают периферийные электроны. В рассматриваемой ЭОС кикер находится вне прикатодной области  $B_k > B_a$ , где  $B_k$  — ведущее поле в месте нахождения кикера. Для оценки относительного разброса поперечных скоростей частиц после их раскачки в кикере можно воспользоваться простой оценкой [23]

$$\delta v_{\perp} = 2v_{\perp p}/v_{\perp k}, \quad (1)$$

где  $v_{\perp p}$  — максимальная паразитная поперечная скорость электронов перед кикером;  $v_{\perp k}$  — поперечная скорость, сообщаемая кикером электрону, движущемуся вдоль оси.

Согласно адиабатической теории, такой же относительный разброс имеет место и в рабочем пространстве ГБО. Учитывая, что паразитная поперечная скорость в области кикера определяется соотношением

$$v_{\perp p} = v_{\perp a}(B_k/B_a)^{1/2}, \quad (2)$$

а рабочая поперечная скорость  $v_{\perp 0}$  равна

$$v_{\perp 0} = v_{\perp k}(B_0/B_k)^{1/2}, \quad (3)$$

можно выразить относительный разброс через рабочие параметры и параметры на выходе из прикатодной области

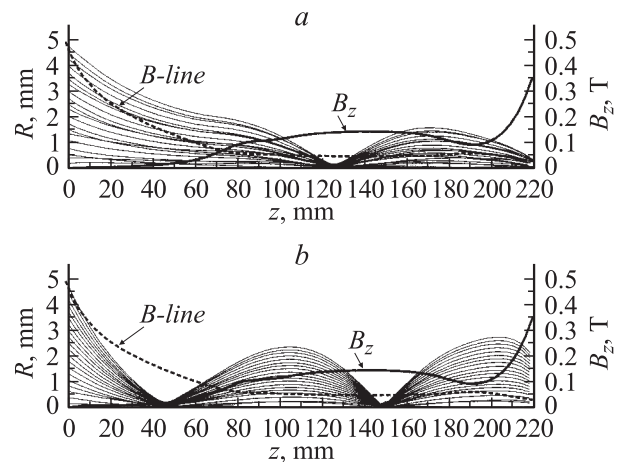
$$\delta v_{\perp} = \frac{2v_{\perp a}}{v_{\perp 0}} \sqrt{\frac{B_0}{B_a}}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что в случае сохранения параметров  $v_{\perp a}$  и  $B_a$  в прикатодной области при увеличении рабочего поля в 4 раза разброс поперечных скоростей возрастает вдвое. При этом место расположения кикера на участке нарастания магнитного поля после прикатодной области не влияет на скоростной разброс. Для уменьшения необходимого поля кикера и увеличения размеров рамок целесообразно располагать кикер в области возможно меньшего ведущего поля. В ранее реализованной системе кикер помещался в область, близкую к границе прикатодной области, где  $B_0 = 0.4$  Т, а максимальная поперечная скорость частиц составляет  $v_{\perp a} = 0.06c$ . Уменьшение тока пучка в новой ЭОС до 3 А позволяет в два раза уменьшить диаметр

эмиттера катода и таким образом сохранить величину скоростного разброса близкой к величине, полученной ранее в [10].

Кроме паразитной поперечной скорости на разброс скоростей, возникающих при их раскачке в кикере, влияет и разброс радиусов ведущих центров частиц (позиционный разброс), равный для сфокусированного приосевого пучка его радиусу. При наличии регулярных радиальных пульсаций в ламинарном пучке кикера целесообразно располагать таким образом, чтобы точка минимума поперечного поля на оси системы (центр кикера) совмещалась с точкой минимального радиуса пучка. Для этого при фиксированном положении кикера оптимальная фаза пульсаций подбиралась небольшим варьированием величины ведущего магнитного поля в прикатодной области.

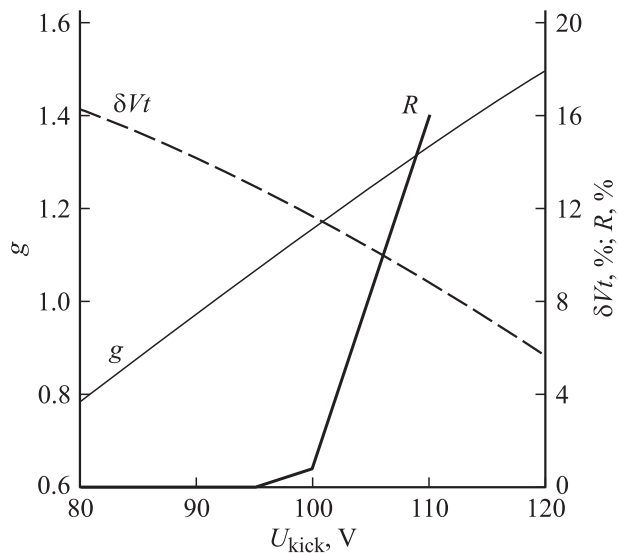
В соответствии с изложенным в модифицированной конструкции магнитная система, формирующая поле в прикатодной области, конфигурация электродов пушки, а также кикер и его расположение оставлены такими же, как и в ранее реализованной ЭОС. Диаметр эмиттера уменьшен вдвое (до 10 мм), изменены параметры соленоида, формирующего рабочее магнитное поле в области резонатора, и введен дополнительный соленоид, согласующий магнитное поле в области пушки и кикера с увеличенным в четыре раза рабочим магнитным полем (рис. 1, а). При плотности эмиссии  $4 \text{ А/см}^2$  расчетный ток пучка составляет 3 А, а пушка должна работать в режиме температурного ограничения эмиссии. Для получения оптимальной фазы электронных паразитных пульсаций не входе в кикер (область  $B < B_a$ ) магнитное поле в прикатодной области было увеличено при сохранении его величины на катоде около 1.5 мТ. В этом случае, согласно траекторному анализу (рис. 2, а), максимальная скорость паразитных осцилляций составляет  $v_{\perp a} = 0.033c$ , а пучок в кикере имеет минимальное сечение, что снижает влияние позиционного разброса.



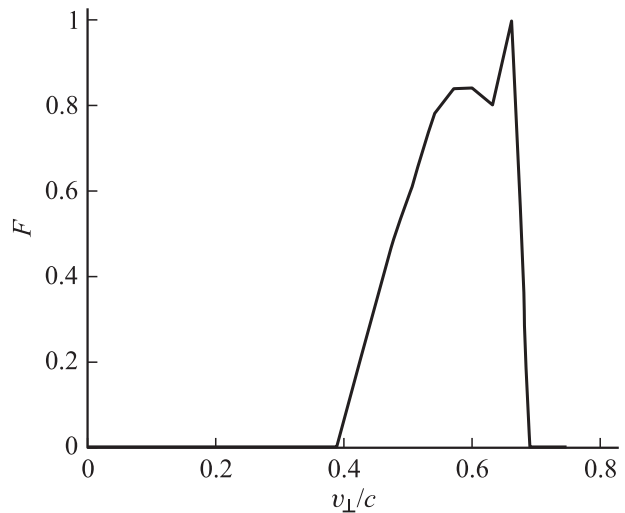
**Рис. 2.** Распределение магнитного поля в прикатодной области и расчетные траектории частиц при токе пучка 3 А (а), при исчезающе малом токе (б).

В области кикера влияние собственного поля пучка существенно слабее, чем в прикатодной области (соотношение квадратов плазменной и циклотронной частот составляет 0.3), поэтому расчет движения частиц в кикере и далее в канале транспортировки пучка вплоть до однородного участка магнитного поля осуществлялся без учета сил пространственного заряда. Это приближение существенно упрощает анализ и позволяет использовать модель, основанную на численном интегрировании уравнений движения электронов а заданном трехмерном магнитном поле. При этом в качестве начальных условий для трехмерного расчета использовались результаты, полученные при двумерном траекторном анализе ЭОС с детальным учетом пространственного заряда.

Согласно расчету, с увеличением тока в рамках кикера и при соответствующем росте питч-фактора электронов абсолютный разброс поперечных скоростей примерно сохраняется, а относительный разброс уменьшается (рис. 3). Конечная величина абсолютного разброса поперечных скоростей, определяемая прикатодной областью формирования пучка, не позволяет увеличивать рабочий питч-фактор частиц выше  $g_{\max} = 1.2$ . Дальнейшее увеличение напряжения на кикере приводит к тому, что слишком большая часть электронов, поперечная скорость которых в процессе последующей адиабатической компрессии достигает величины полной скорости, отражается от магнитной пробки. При напряжении на кикере, соответствующем среднему питч-фактору  $g = 1.15$ , когда число отраженных электронов составляет около 1%, относительный разброс поперечных скоростей частиц (среднеквадратичное отклонение) составляет 11.5%. При этом относительная ширина функции распределения поперечных скоростей по основанию составляет около 50% (рис. 4), что находится в



**Рис. 3.** Расчет раскачки пучка в кикере: питч-фактор  $g$ , разброс поперечных скоростей  $\Delta Vt$  и количество частиц, отраженных магнитной пробкой  $R$  в зависимости от напряжения на кикере.



**Рис. 4.** Расчетная функция распределения частиц по поперечным скоростям при напряжении на рамках кикера  $U_{\text{kick}} = 100 \text{ V}$ .

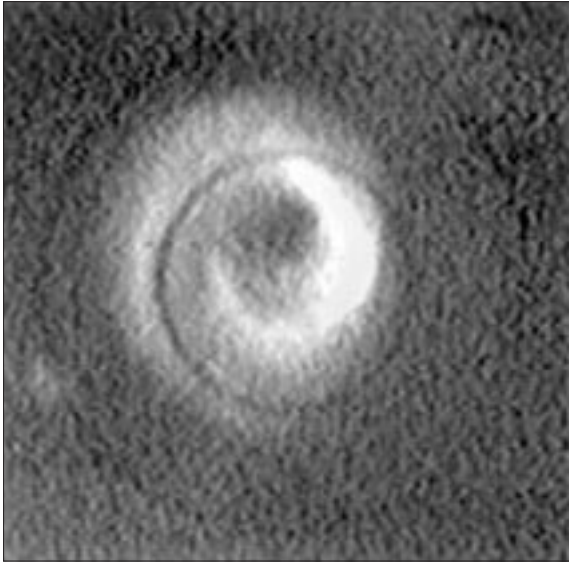
хорошем соответствии с приведенной выше оценкой (4). Расчет показывает, что модифицированная ЭОС должна позволить сформировать приемлемый пучок для ГБО с частотой 375 GHz.

## Экспериментальные результаты

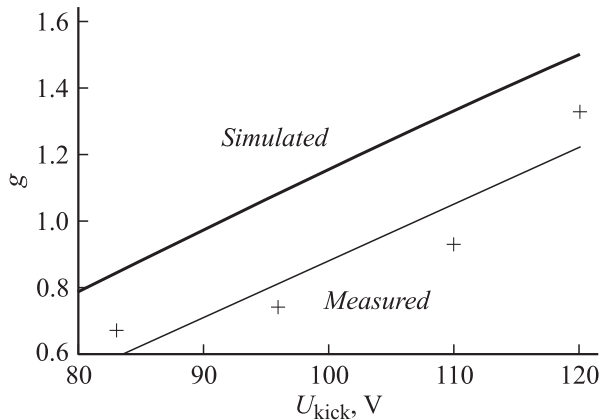
Модифицированная ЭОС была исследована предварительно в слаботочном режиме, позволяющем наблюдать поперечное сечение пучка по свечению люминофора, нанесенного на кварцевую мишень. В этом режиме потенциал и магнитное поле были уменьшены в 2 и в  $2^{1/2}$  раза соответственно по сравнению с рабочими значениями. При этом в отличие от обычного моделирования электронный ток был уменьшен не в  $2^{3/2}$  раза, а до очень малой величины порядка миллиампера, обеспечивающей светимость люминофора. Это связано с тем, что при большей величине тока люминофор не выдерживает тепловой нагрузки. Указанный выше небольшой коэффициент моделирования 2 выбран потому, что его увеличение приводило бы к слишком малой величине магнитного поля на катоде, сравнимой с полем Земли.

Сравнительные расчеты траекторий электронов в слаботочном (без пространственного заряда) (рис. 2, *b*) и рабочем (с током 3 А) (рис. 2, *a*) режимах показали существенное различие в поперечной скорости частиц перед кикером и в разбросе скоростей после кикера. При этом средние поперечные скорости частиц при раскачке пучка в кикере для обоих режимов достаточно близки. Поэтому слаботочный режим мог использоваться как для юстировки пучка, так и для оценки поперечной скорости при разных энергиях частиц.

При исследовании пучка мишень с люминофором устанавливалась на расстоянии 40 mm от центра кикера. Питч-фактор определялся по размеру следа (рис. 5). Пересчет измеренных в слаботочном режиме величин



**Рис. 5.** След винтового пучка на мишени с люминофором (диаметр темной внутренней окружности 1.5 mm).



**Рис. 6.** Сравнение результатов измерений в моделирующем режиме и расчета питч-фактора электронов в зависимости от напряжения на кикере.

на рабочий режим с параметрами 250 keV/6.6 T и различными значениями тока кикера удовлетворительно совпадает с расчетами, выполненными для рабочего режима (рис. 6).

Согласно полученным в рабочем режиме при разных температурах эмиттера вольт-амперным характеристикам ЭОС, максимальный ток пучка превысил 4 A. Таким образом, в прямолинейном пучке в области резонатора максимальная плотность тока составила около 25 kA/cm<sup>2</sup> и соответственно в пучке с питч-фактором 1.0 — около 2.3 kA/cm<sup>2</sup>.

В эксперименте с возбуждением резонатора ГБО полученным винтовым пучком излучение паразитной моды на фундаментальном циклотронном резонаторе затрудняло устойчивое возбуждение рабочей моды с высоким радиальным индексом  $TE_{3,8}$  на 3-й циклотронной

гармонике. В то же время наблюдалась устойчивая генерация моды  $TE_{2,5}$  на 2-й гармонике с частотой 223 GHz, выходной мощностью излучения 45 kW и с эффективностью 6%. Детальное сравнение выходных характеристик ГБО с вычислениями показало, что электронный пучок имел, по-видимому, довольно большой разброс поперечных скоростей (до 60%) и смещение от оси около 0.2 mm. Для достижения устойчивой генерации на 3-й гармонике предполагается улучшить юстировку электронного пучка и, возможно, перейти на рабочую моду с более низким радиальным индексом.

## Заключение

Модифицированная ЭОС формирует электронный пучок с параметрами 250 keV/4 A/10  $\mu$  при высокой степени компрессии пучка (4400 раз). Применение такого пучка в ГБО позволило получить устойчивую генерацию на 2-й циклотронной гармонике с частотой 223 GHz, выходной мощностью 45 kW и эффективностью 6%. Согласно расчетам, полученный электронный пучок может также обеспечивать работу ГБО на 3-й циклотронной гармонике с частотой 375 GHz.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 03-02-17064 и 02-02-17105).

Авторы благодарны Ю.А. Дрягину и Л.М. Кукину за помощь в измерении частоты излучения, а также М.А. Моисееву за полезную дискуссию.

## Список литературы

- [1] Зайцев Н.И., Панкратова Т.Б., Петелин М.И. и др. // РиЭ. 1974. Т. 19. № 5. С. 1056–1060.
- [2] Лучинин А.Г., Малыгин О.В., Нусинович Г.С., Флягин В.А. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 8. С. 1629–1632.
- [3] Spira-Hakkarainen S., Kreischer K.E., Temkin R.J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1990. Vol. 18. N 3. P. 334–342.
- [4] Hornstein M.K., Bajaj V.S., Griffin R.G. et al. // Digest of the Joint 29<sup>th</sup> Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 12<sup>th</sup> Intern. Conf. on Terahertz Electronics. Karlsruhe (Germany), 2004. P. 147–148.
- [5] Idehara T. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. Vol. 27. N 2. P. 340–354.
- [6] Elias L.R., Ramian G., Hu J., Amir A. // Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 57. P. 424–427.
- [7] Cherkassky V.S., Knyazev B.A., Kubarev V.V. et al. // Digest of the Joint 29<sup>th</sup> Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 12<sup>th</sup> Intern. Conf. on Terahertz Electronics. Karlsruhe (Germany), 2004. P. 567–568.
- [8] Lawson W., Destler W.W., Striffler C.D. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. Vol. 13. N 6. P. 444–453.
- [9] Bratman V.L., Fedotov A.E., Kalynov Yu.K. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. Vol. 27. N 2. P. 456–461.
- [10] Братман В.Л., Калынов Ю.К., Мануилов В.Н. и др. // РиЭ. 2001. Т. 46. № 6. С. 744–751.

- [11] *Idehara T., Ogawa I., Mitsudo S.* et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32. N 3. P. 903–909.
- [12] *Антаков И.И., Гапонов А.В., Юлпатов В.К.* // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. 1965. № 12. С. 33.
- [13] *Петелин М.И.* // Гиротрон. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 5–25.
- [14] *Юлпатов В.К.* // Там же. С. 26–40.
- [15] *McDermott D.B., Luhmann N.C., Kupiszewski A., jr., Jory H.R.* // Phys. Fluids. 1983. Vol. 26. P. 1936–1941.
- [16] *Nusinovich G.S.* // Int. J. Electronics. 1992. Vol. 72. N 5, 6. P. 959–967.
- [17] *Братман В.Л., Калынов Ю.К., Федотов А.Э.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 10. С. 91–98.
- [18] *McDermott D.B., Luhmann N.C., Kupiszewski A., jr., Jory H.R.* // Intern. J. Infrared and Millimeter Waves. 1983. Vol. 4. N 4. P. 639–663.
- [19] *Chu K.R., Furuno D.S., Luhmann N.C.* et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. Vol. 13. N 6. P. 435–443.
- [20] *Nezhevenko O.A., Yakovlev V.P., Gold S.H.* et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. Vol. 30. N 3. P. 1220–1230.
- [21] *Bratman V.L., Denisov G.G., Fedotov A.E.* et al. // Proc. 6<sup>th</sup> Workshop on High Energy Density and Higher Power RF. Berkley Springs. West Virginia, 2003. P. 339–348.
- [22] *Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. № 4. С. 491–497.
- [23] *Братман В.Л., Мануилов В.Н., Самсонов С.В.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 8. С. 190–194.