

Влияние неоднородности эмиссии на качество винтовых пучков, формируемых неадиабатическими электронно-оптическими системами гироприборов

А. Л. Гольденберг, К. А. Лещева, В. Н. Мануилов

Изучено влияние неоднородности термоэлектронной эмиссии на качество винтовых электронных пучков, формируемых неадиабатическими электронно-оптическими системами (ЭОС) гиротронов с кольцевой щелью. Показано, что допустимая степень неоднородности плотности тока эмиссии не должна превышать 50 %. Рассмотрена возможность применения неадиабатических ЭОС для формирования двухлучевых электронных потоков, пригодных для использования в гиротронах с двухзеркальными резонаторами. Найдены оптимальные угловые размеры зон эмиссии парциальных пучков для получения приемлемых параметров ВЭП.

Ключевые слова: гиротрон, винтовой электронный пучок, неадиабатическая электронная пушка, питч-фактор, скоростной разброс.

Ссылка: Гольденберг А. Л., Лещева К. А., Мануилов В. Н. // Прикладная физика. 2020. № 4. С. 40.
Reference: A. L. Goldenberg, K. A. Leshcheva, and V. N. Manuilov, Prikl. Fiz., No. 4, 40 (2020).

Введение

Гирорезонансные приборы (гиротроны, гироклистроны, гиро-ЛБВ [1, 2]) на сегодняшний день являются несомненными лидерами среди источников мощного когерентного излучения диапазона миллиметрового и субмиллиметрового длин волн. Область применения гирорезонансных приборов непрерывно расширяется, что ужесточает требования к их выходным параметрам (мощность, КПД, длина волны, перестройка частоты и пр.). Стано-

вятся более жесткими и требования к качеству активной среды (источнику энергии излучения) в виде винтовых электронных пучков (ВЭП).

Кроме того, новые варианты гиротронов зачастую выдвигают и новые, весьма специфичные требования к параметрам ВЭП.

Традиционно для формирования ВЭП используется адиабатическая аксиально-симметричная магнетронно-инжекторная электронная пушка (МИП) [3]. Однако МИП обладают рядом принципиальных недостатков, среди которых, вследствие специфики формирования ВЭП в адиабатических полях, наиболее серьезным и принципиально не устранимым является влияние шероховатостей эмиттера и тепловых начальных скоростей электронов. Указанные факторы приводят к существенному увеличению разброса вращательных скоростей электронов, особенно в гиротронах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн [4], и, соответственно – к необходимости снижения питч-фактора (отношения вращательной и продольной скоростей электрона в рабочем пространстве) для сохранения устойчивости пуч-

Гольденберг Аркадий Львович¹, в.н.с.
Лещева Ксения Александровна^{1,2}, аспирант, м.н.с.
Мануилов Владимир Николаевич^{1,2}, профессор, с.н.с.
¹ Федеральний исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН).

Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

E-mail: goldenberg@ipfran.ru

² ННГУ им Н.И. Лобачевского.

Россия, 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

E-mail: ksenilescheva@mail.ru, manuilov@rf.unn.ru

Статья поступила в редакцию 23 марта 2020 г.

© Гольденберг А. Л., Лещева К. А., Мануилов В. Н., 2020

ка. Резко снизить влияние шероховатостей и тепловых скоростей можно при неадиабатической схеме формирования ВЭП [5].

Одной из новых и недавно предложенных является аксиально-симметричная система формирования (рис. 1) [6], в которой прямолинейный пучок инжектируется через кольцевую щель под углом к магнитному полю и за счет этого осуществляется первичная закрутка пучка. Первые численные расчеты таких систем показали, что в них, по сравнению с МИП, возможно полутора-двукратное снижение скоростного разброса и за счет этого существенное увеличение питч-фактора прибора при сохранении устойчивости ВЭП.

Однако неадиабатические системы не лишены некоторых других недостатков, присущих в том числе и МИП. Все до сих пор реализованные электронно-оптические системы (ЭОС) гиротронов, в том числе и неадиабатические, работают в режиме температурного ограничения эмиссии. В результате вследствие неоднородности прогрева катода по азимуту, в них наблюдается существенное нарушение азимутальной симметрии распределения плотности тока эмиссии, что приводит к азимутальной неоднородности электронного потока. Это является причиной появления неоднородных электрических полей, которые, в свою очередь, могут увеличивать скоростной разброс электронов, способствовать возбуждению паразитных низкочастотных колебаний и появлению разброса частиц ВЭП по энергии. Неоднородная структура пучка ответственна также за возбуждение паразитных мод в резонаторе [7].

Указанные выше неадиабатические пушки с кольцевой щелью могут быть использованы также в ряде новых вариантов гиротронов короткой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонах длин волн с эллиптическими или $2n$ -зеркальными резонаторами ($n = 1, 2, \dots$) [8]. В таких ЭОС эмиссия осуществляется не со всего кольцевого эмиттера, а с $2n$ ($n = 1, 2, \dots$) сегментов в виде дуг окружностей, т. е. опять имеет место азимутальная неоднородность эмиссии и значит также будут наблюдаться трехмерные возмущения распределения осцилляторных скоростей в пучке.

До настоящего времени исследование влияния неоднородной эмиссии на работу

ЭОС гиротронов было проведено только для адиабатических пушек [9]. Поэтому ниже на основе развитой в [9] методики трехмерного траекторного анализа ЭОС гиротронов проведено исследование влияния нарушения симметрии плотности тока в неадиабатических системах с инжекцией пучка сквозь кольцевую щель. Представлены результаты численного исследования влияния неоднородного нагрева катода неадиабатических ЭОС, а также некоторые примеры анализа неадиабатических ЭОС с секционированным эмиттером. Расчеты проведены на примере ЭОС, отличающейся умеренным значением рабочей индукции магнитного поля $B_0 = 0,65$ Т и умеренным ускоряющим напряжением $U_0 = 15$ кВ, что позволяет выполнять анализ и оптимизацию за приемлемое время даже при детальном разрешении 3-мерной мелкомасштабной структуры облака пространственного заряда пучка в гиротроне. Тем не менее, полученные данные позволяют получить качественную картину влияния 3-мерных возмущений в исследуемом типе неадиабатической ЭОС и при работе при повышенных значениях рабочего магнитного поля и напряжения.

Влияние неоднородности термоэлектронной эмиссии на параметры ВЭП в неадиабатических ЭОС с торцевым кольцевым эмиттером

Методика моделирования основана на совместном использовании пакета CST Studio Suite [10] для траекторного анализа трехмерных электронно-оптических систем, и специальных программ для пред- и пост-обработки, реализованных на языке Python [11], позволяющих за счет задания стартовых условий частиц и специальных алгоритмов обработки результатов траекторного анализа реализовать физическую модель пучка, учитывающую помимо 3-мерного поля пространственного заряда также и произвольные нарушения аксиальной симметрии электродов, и получить детальную информацию о параметрах пучка в целом или его отдельных азимутальных фракций. Подробно методика моделирования отражена в работе [9], для моделирования неадиабатических систем она была расширена и дополнена возможностью задания заданного закона эмиссии электронов с торцевого катода.

Численное моделирование выполнялось для ЭОС гиротрона (рис. 1), работающего на второй гармонике циклотронной частоты. Гиротрон имел следующие параметры: ток $I = 3$ А, ускоряющее напряжение $U_0 = 15$ кВ, рабочее магнитное поле $B_0 = 0,65$ Т. Отметим, что указанное значение тока для рассматриваемой ЭОС соответствует отношению t_j средней плотности тока j_0 к ленгмюровской плотности j_L около 0,25, что примерно вдвое больше типичного (0,1–0,15) значения для ЭОС гиротронов. Как правило, при такой плотности тока уже наблюдается существенное возмущение параметров ВЭП силами пространственного заряда пучка. Сравнивались параметры пучков, вычисленные при различном законе эмиссии по азимуту θ : однородный ($j = \text{const}$) и синусоидальное по азимуту распределение ($j = j_0 (1 + a \times \sin\theta)$) (здесь j – плотность тока, a – амплитуда модуляции – см. табл.).

Таблица

Вариация параметров пучка при изменении глубины модуляции тока эмиссии

a	Питч-фактор, g	Скоростной разброс δV_{\perp} , %
0	1,63	12,27
0,25	1,61	13,31
0,5	1,62	17,12
0,75	1,64	21,45

Результаты расчетов (см. таблицу) показали, что питч-фактор пучка практически не зависит от вариации плотности тока по азимуту. В то же время скоростной разброс сильно увеличивается, если глубина модуляции превышает 0,5. По-видимому, указанное значение a следует принять за предельно допустимое при практической реализации неадиабатических ЭОС гиротронов с кольцевой щелью.

Неадиабатические ЭОС для гиротронов с многозеркальными резонаторами

Для увеличения селективности возбуждения рабочей моды, выходной мощности и КПД спектроскопических гиротронов целесообразно использовать многозеркальные резонаторы и, соответственно – катод с числом секторов эмиссии, равным количеству зеркал. Поскольку требуемая выходная мощность в этом случае относительно невелика (сотни

ватт или несколько киловатт), то здесь также могут быть использованы описанные выше (см. также [6]) неадиабатические системы. Использование многозеркальных резонаторов приводит к тому, что аксиально-симметричные системы формирования ВЭП оказываются малоэффективными. Причина заключается в том, что в этом случае, вследствие специфики распределения ВЧ-поля по азимуту, значительная часть электронов оказывается «безработной», поскольку часть электронного пучка располагается вне каустики электромагнитного поля. Естественным способом устранения указанного недостатка является переход к секционированным по азимуту эмиттерам. При этом степень неоднородности распределения пространственного заряда, очевидно, еще больше усугубляется и соответствующие системы требуют отдельного рассмотрения.

Ниже, в качестве примера, рассмотрена одна из возможных модификаций неадиабатической ЭОС (рис. 1, б), предназначенная для установки в простейшем варианте такой лампы с двухзеркальным резонатором. Катод имел два участка эмиссии с угловыми размерами 90 градусов каждый, с центрами секторов отстоящими друг от друга на 180 градусов. Согласно расчетам, замена катода с кольцевым эмиттером, на катод, имеющий два сектора эмиссии приводит, при сохранении полного тока пучка 3 А и увеличении плотности тока вдвое, (плотность тока увеличивается с $j = 1,87$ до $j = 3,74$ А/см², параметр пространственного заряда $t_j = 0,5$) к некоторому увеличению питч-фактора до величины 1,73, что вполне типично для неадиабатических систем, поскольку под действием пространственного заряда внешние электроны увеличивают свой угол входа в магнитное поле. Наиболее важным фактором оказывается более чем двукратное увеличение разброса осцилляторных скоростей до 30,1 %. Другим важным параметром является величина азимутального дрейфа пучка, поскольку парциальные пучки должны находиться в области сильного ВЧ-поля внутри каустики и положение зеркал должно быть повернуто на соответствующий угол относительно центров эмиссии парциальных пучков. Согласно расчетным данным, при формировании и дальнейшем движении пучков в канале транспортировки угол поворота составляет относительно небольшую ве-

личину порядка $10\text{--}15^\circ$, что, тем не менее, надо учитывать при проектировании электродинамической системы гиротрона. Несколько изменяется при этом и поперечное сечение пучка вследствие неравномерного дрейфа внешних слоев пучка относительно внутренних при совместном действии собственного кулоновского поля пучка и внешнего магнитного поля формирующей системы (см. рис. 2), что может сказываться на эффективном сопротивлении связи пучка с электромагнитным полем резонатора.

При фиксированной величине полного тока скоростной разброс δV_\perp может быть уменьшен за счет увеличения угловой ширины зон эмиссии. Это, кроме того, позволяет снизить плотность тока эмиссии j_o и увеличить долговечность катода. Как показывают детальные расчеты, δV_\perp примерно пропорциональна плотности тока пучка. Поэтому увеличение угловых размеров зон эмиссии до 135 градусов позволяет сохранить величину разброса меньшей 20% , что еще вполне приемлемо для реализации высокого КПД прибора, поскольку величина питч-фактора незначительно уменьшается при снижении j_o .

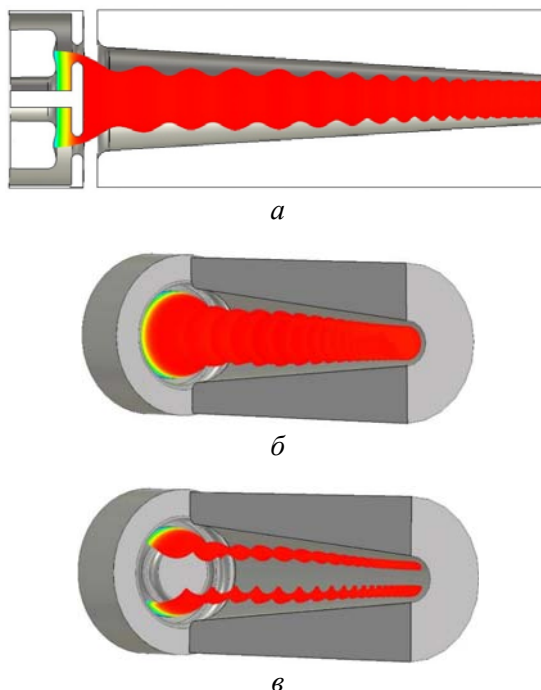


Рис. 1. Общая схема ЭОС (а) и модель распределения эмиссии для случаев: случая однородной эмиссии (б); случая, когда эмитируют 2 участка катода, сдвинутые по азимуту на 180 градусов и имеющие угловую ширину 90 градусов (в).

В этом случае допустимая угловая ширина зон эмиссии определяется структурой ВЧ-поля в двухзеркальном резонаторе. В частности, края парциальных пучков должны оставаться достаточно далеко от границ каустики ВЧ-поля.

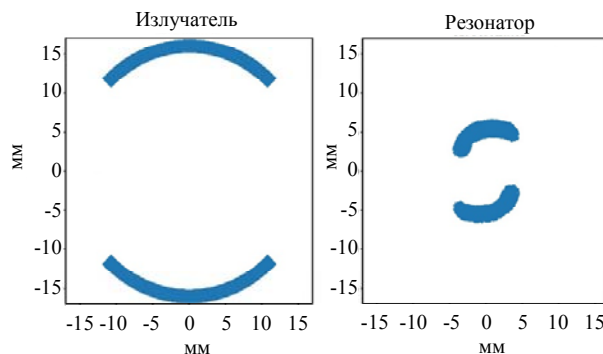


Рис. 2. Профили парциальных пучков при старте с эмиттера и в области рабочего магнитного поля.

Выводы

Изучено влияния неоднородного нагрева катода на выходные параметры ВЭП, формируемые неадиабатическими ЭОС гиротронов с кольцевой щелью для инжекции пучка. Выполнен траекторный анализ указанных систем с учетом трехмерного возмущения поля пространственного заряда пучка и показано, что для сохранения приемлемого качества пучка глубина модуляции тока эмиссии по азимуту не должна превышать 50% .

Рассмотрены варианты неадиабатической системы, способной формировать двухлучевые электронные потоки, пригодные для использования в гиротронах с двухзеркальными резонаторами. Показано, что при умеренной мощности прибора (десятки киловатт) возможно формирование двух парциальных пучков с приемлемыми для работы гиротрона параметрами. Найдены оптимальные угловые размеры зон эмиссии парциальных пучков.

Авторы благодарны М. Ю. Глявину, С. В. Мишакину, В. Ю. Заславскому за многочисленные полезные дискуссии в ходе выполнения данной работы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00142 и частичной поддержке госзадания ИПФ РАН № 0030-2019-0019.

ЛИТЕРАТУРА

1. Litvak A. G., Denisov G. G., Myasnikov V. E., Tai E. M., Azizov E. A., Ilin V. I. // Int. J. IRMM&THz Waves. 2011. Vol. 32. № 3. P. 337.
2. Thumm M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers (Update 2013) KIT Scientific Reports, vol. 7662 (KIT Scientific Publishing), pp. 1–138, 2014.
3. Gol'denberg A. L., Petelin M. I. // Radiophys. Quantum Electron. 1973. Vol. 16. № 1. P. 106.
4. Tsimring Sh. E. // Radiophys. Quantum Electron. 1972. Vol. 15. № 8. P. 952.
5. Glyavin M. Yu., Goldenberg A. L., Manuilov V. N., Morozkin M. V. // Radiophys. Quantum Electron. 2011. Vol. 54 (8-9). P. 622.
6. Goldenberg A. L., Glyavin M. Yu., Leshcheva K. A., Manuilov V. N. // Radiophys. Quantum Electron. 2017. Vol. 60 (5). P. 395.
7. Лукаша О. И. Винтовые электронные потоки гиротронов: динамика пространственного заряда и методы повышения качества: Дисс. ... докт. физ.-мат. наук / СПбГПУ. Санкт-Петербург, 2011. – 285 с.
8. Joye C. D., Shapiro M. A., Sirigiri J. R., Temkin R. J. // IEEE Transactions on electron devices. 2009. Vol. 56. № 5. P. 818.
9. Leshcheva K. A., Manuilov V. N. // Usp. Prikl. Fiz. 2019. Vol. 7. № 3. P. 298.
10. <https://www.cst.com/Products/CST>
11. Python Software Foundation www.python.org

PACS: 41.75.Fr, 41.85.Ew, 41.85.Qg

Influence of emission inhomogeneity on the quality of helical beams formed by nonadiabatic electron-optical system of gyro-devices

A. L. Goldenberg¹, K. A. Leshcheva^{1,2} and V. N. Manuilov^{1,2}

¹ Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences
46 Ulyanov st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

² Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
23 Prospekt Gagarina (Gagarin Avenue), Nizhny Novgorod, 603950, Russia

Received March 23, 2020

The influence of inhomogeneity of thermionic emission on the quality of helical electron beams formed by nonadiabatic electron-optical systems (EOS) of gyrotrons with an annular slot is studied. It is shown that the permissible degree of inhomogeneity of the emission current density should not exceed 50 %. The possibility of using nonadiabatic EOS for the formation of two-beam electron streams suitable for use in gyrotrons with two-mirror resonators is considered. The optimal angular dimensions of the emission zones of partial beams are found to have acceptable parameters of the HEB.

Keywords: gyrotron, helical electron beam, nonadiabatic electron gun, pitch factor, velocity distribution.

REFERENCES

1. A. G. Litvak et al., Int. J. IRMM&THz Waves, **32** (3), 337 (2011).
2. M. Thumm, *State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers* (Update 2013) KIT Scientific Reports, vol. 7662 (KIT Scientific Publishing), pp. 1–138, 2014.
3. A. L. Gol'denberg and M. I. Petelin, Radiophys. Quantum Electron. **16** (1), 106 (1973).
4. Sh. E. Tsimring, Radiophys. Quantum Electron. **15** (8), 952 (1972).
5. M. Yu. Glyavin et al., Radiophys. Quantum Electron. **54** (8-9), 622 (2011).
6. A. L. Goldenberg et al., Radiophys. Quantum Electron. **60** (5), 395 (2017).
7. O. I. Luksha *Helical electron gyrotron fluxes: space charge dynamics and methods for improving the quality*: Thesis ... doctor of phys.-math. sci. / SPbGU, Saint-Peretsburg. (2011).
8. C. D. Joye et al., IEEE Transactions on electron devices **56** (5), 818 (2009).
9. K. A. Leshcheva and V. N. Manuilov, Usp. Prikl. Fiz. **7** (3), 298 (2019).
10. <https://www.cst.com/Products/CST>
11. Python Software Foundation www.python.org