

УДК 681.7

## Теоретическое и экспериментальное исследование колебаний пространственного заряда в ЭОС релятивистского гиротрона

Е. В. Иляков, И. С. Кулагин, В. Н. Мануилов, Б. З. Мовшевич

*Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование колебаний облака пространственного заряда в магнетронно-инжекционной пушке мощного релятивистского гиротрона. Накопление заряда происходит в ходе магнитной компрессии электронного пучка в результате отражения части электронов с наибольшими поперечными скоростями от магнитного зеркала. Установлено, что при больших значениях коэффициента компрессии электронный пучок теряет устойчивость, что выражается в появлении модуляции тока пучка на частоте продольных колебаний электронного сгустка в адиабатической ловушке. Согласно численному моделированию, в этих условиях величина энергетического разброса в сформированном пучке достигает 4,6 %, что на порядок превышает разброс, вызванный провисанием потенциала пучка.*

PACS: 41.75.Ht; 41.85.Ct

**Ключевые слова:** релятивистский гиротрон, магнетронно-инжекционная пушка, колебания пространственного заряда, магнитная компрессия электронного пучка.

### Введение

Реализация высоких КПД в релятивистских гиротронах требует формирования устойчивого винтового электронного пучка (ВЭП) с максимально возможным питч-фактором  $g$ , т. е. отношением вращательной и поступательной компонент скоростей электронов в рабочем пространстве. Наиболее важной предпосылкой к потере устойчивости ВЭП, формируемого традиционными для гиротронов магнетронно-инжекционными пушками (МИП) [1], является захват достаточно большой доли электронов пучка с наибольшими вращательными скоростями в адиабатическую ловушку между катодом и резонатором вследствие их отражения от магнитного зеркала (количество таких электронов возрастает с ростом  $g$ ) [2, 3]. Возникающие в этом случае колебания пространственного заряда [2—4] сопровождаются бомбардировкой эмиссионной поверхности катода электронами [5, 6], что из-за нагрева последнего может вызвать неуправляемый рост эмиссионного тока.

Указанные колебания могут проявиться и в периодическом изменении параметров ВЭП, и в дополнительном энергетическом разбросе. Эти факторы не позволяют наращивать питч-фактор и вследствие этого — КПД приборов. Поэтому разработка высокоэффективных гиротронов требует изучения влияния этих колебаний на формирование ВЭП и работу СВЧ-прибора.

Исследованию колебательных процессов в МИП при больших питч-факторах посвящен целый ряд работ [4, 7, 8] с цитируемой литературой. Теоретические расчеты проводились для различных конфигураций МИП. Однако экспериментальные работы были посвящены, в основном, анализу традиционных геометрий МИП, причем основной упор делался на изучение колебаний потенциала в облаке пространственного заряда [7, 8], в то время как другие параметры (например зависимость проходящего в резонатор тока от времени) экспериментально не изучались.

Ниже численно и экспериментально исследована электронно-оптическая система (ЭОС) релятивистского гиротрона, в котором ранее была получена рекордная выходная мощность порядка 10 МВт с КПД 50 % на частоте 30 ГГц [9]. Исследование проводилось в режимах, когда в электронном облаке развиваются интенсивные колебательные процессы.

### Описание электронно-оптической системы

Электронный пучок формировался в МИП с рядом отличительных, по сравнению с традицион-

**Иляков Евгений Викторович**, старший научный сотрудник.  
**Кулагин Игорь Станиславович**, старший научный сотрудник.  
**Мовшевич Борис Зямович**, старший научный сотрудник.  
Институт прикладной физики РАН.  
Россия, 603950, Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46.  
Тел. 8 (831) 416-49-18. E-mail: [ilyakov@appl.sci-nnov.ru](mailto:ilyakov@appl.sci-nnov.ru)  
**Мануилов Владимир Николаевич**, профессор.  
Нижегородский гос. университет.  
Россия 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2010

© Иляков Е. В., Кулагин И. С., Мануилов В. Н., Мовшевич Б. З., 2010

ными пушками гиротронов, особенностей конфигурации, которые обеспечивали хорошее качество формируемого ВЭП (малый разброс по осцилляторным скоростям  $\delta v_{\perp}$  и относительно высокий питч-фактор) при токе пучка, составляющем значительную долю от ленгмюровского тока пушки [10]. В частности (рис. 1), эмиттер электронов был наклонен к оси системы под большим углом  $50^{\circ}$ , а в непосредственной близости позади эмиттера располагался специальный катодный выступ. Это способствовало быстрому уходу электронов от эмиттера, ламинарности траекторий и пониженному влиянию кулоновского поля электронов на разброс по скоростям. Полное ускоряющее напряжение составляло  $U = 280$  кВ, рабочий ток  $I = 60$  А, величина магнитного поля в резонаторе  $14,6$  кГс. Эксперименты [11] подтвердили, что при умеренной компрессии  $\alpha$  (отношении магнитного поля в резонаторе к полю на катоде) пучок устойчив, т. е. захваченный в адиабатическую ловушку заряд мал, и в пушке формируется ВЭП с приемлемым для гиротронов качеством при токе, составляющем значительную долю (до 0,5) от ленгмюровского тока пушки.

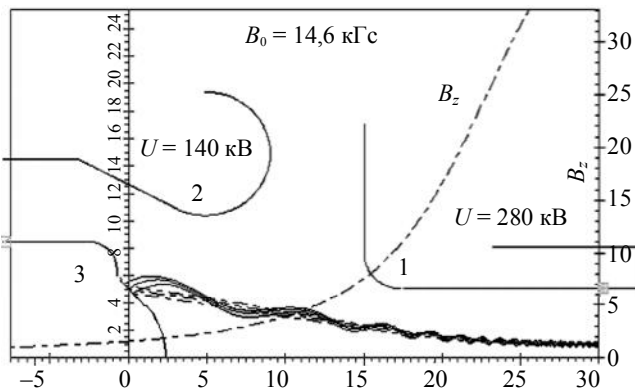


Рис. 1. Сечение МИП вдоль продольной оси и траектории ВЭП:

1 — анод (пространство дрейфа ВЭП с потенциалом  $U = 280$  кВ);  
2 — промежуточный анод с потенциалом 140 кВ; 3 — катод;  
 $B_z$  — продольное магнитное поле, достигает максимума  
 $B_0 = 14,6$  кГс в пространстве дрейфа

Очевидно, с ростом  $\alpha$  величина захваченного заряда будет увеличиваться, что в конечном итоге приведет к потере устойчивости пучка и таким образом открывает возможность исследования колебательных процессов в электронном облаке гиротрона. Соответствующие расчеты и эксперименты описаны ниже.

### Численное моделирование работы ЭОС

Расчет основывался на методе крупных частиц [12] и учитывал, в частности, такие факторы как поле пространственного заряда пучка и вторичную

эмиссию электронов с катода (подробнее см. [5]; вторично-эмиссионные константы катода брались такими же, как у молибдена). Для учета тепловых скоростей электронов и шероховатости эмиттера по методике [13] вводилось соответствующее эквивалентное распределение по начальным скоростям, обеспечивавшее разброс  $\delta v_{\perp} \approx 20\%$  при  $I \approx 0$ .

Как при численном моделировании, так и в эксперименте (см. ниже) количество отраженных электронов и величина захваченного заряда изменялись посредством изменения магнитной компрессии  $\alpha$ . Для характеристики режима МИП с точки зрения степени закрутки пучка использовали так называемый "холодный" питч-фактор  $g_0$  (соответствующие характеристики — в табличной форме в конце раздела), равный значению  $g$  при  $I \approx 0$ , т. е., когда пространственный заряд электронов не влияет на их движение. Для пучка с конечным током  $g < g_0$  из-за экранировки электрического поля на катоде пространственным зарядом.

Анализ колебательных процессов проводился для больших величин холодного питч-фактора в диапазоне  $2 < g_0 < 4$ . Уже при  $g_0 = 2,5$ , когда захваченный в ловушку заряд  $Q_r$  превышает  $0,5 Q_0$  ( $Q_0$  — заряд первичного пучка, т. е. электронов, движущихся к рабочему пространству прибора и еще не успевших отразиться от магнитного зеркала), в облаке пространственного заряда начинают наблюдаться заметные осцилляции (рис. 2). При  $2,5 < g_0 < 3,0$  колебания близки к гармоническим, с ростом  $g_0$  характер колебаний усложняется. Те же свойства присущи и другим временным зависимостям — потенциала пространственного заряда, тока бомбардировки катода и тока электронного пучка в пространстве дрейфа (см. ниже).

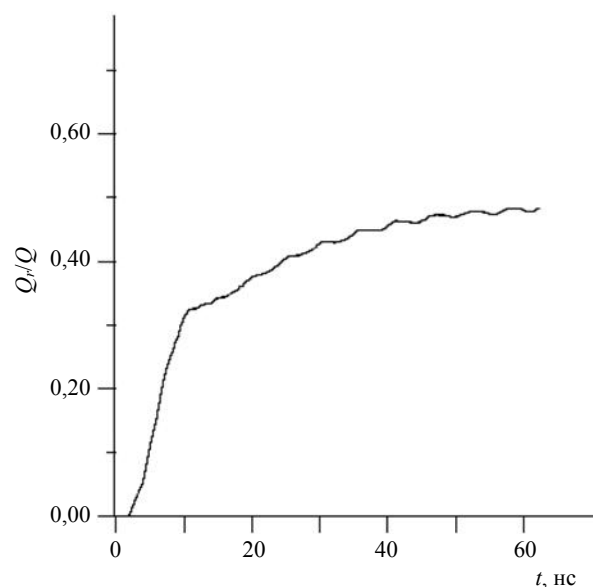


Рис. 2. Численное моделирование накопления пространственного заряда в ловушке при мгновенной подаче потенциала на электроды и эмиссии тока в момент  $t = 0$

Анализ временной зависимости провисания потенциала в разных сечениях ловушки (рис. 3), показал, что захваченные электроны в процессе движения группируются в сгустки, периодически перемещающиеся внутри ловушки (от катода к началу пространства дрейфа и обратно). Очевидно, в тот момент, когда сгусток проходит через некоторое сечение, он вызывает дополнительное провисание потенциала (наблюдается максимум временной зависимости  $\Delta U(t)$  для этого сечения). Через максимумы потенциала, можно провести линии, отслеживающие перемещение колеблющегося в ловушке электронного сгустка, а также движение сгустков, выходящих из ловушки в резонатор.

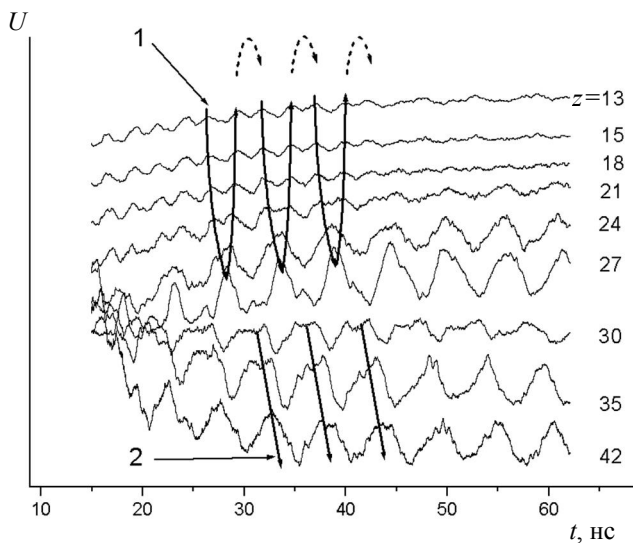


Рис. 3. Временная зависимость провисания потенциала в разных сечениях ловушки по продольной координате  $z$  (численное моделирование).

Точки максимумов соответствуют прохождению максимального заряда через определенное сечение в определенный момент времени и соединены между собой плавными кривыми, которые можно интерпретировать как временные зависимости периодического движения заряженного сгустка в ловушке (1) и периодическая инжекция движущихся сгустков в пространство дрейфа (2)

Для ЭОС с небольшим превышением  $g_0$  над порогом возникновения колебаний эволюция потенциала представляет собой простое синусоидальное колебание с периодом, совпадающим с расчетным периодом продольных колебаний электрона в ловушке, что соответствует одиночному электронному сгустку (см. рис. 3). С ростом  $g_0$  и захваченного заряда характер колебаний усложняется, что, по-видимому, соответствует распаду сгустка на фракции. Аналогичное явление (хаотизация сгустка) наблюдается при группировке в ЛОВ О-типа [14].

Периодическое приближение сгустка к катоду и магнитной пробке изменяет условия "проникновения" электронов через соответствующие грани-

цы ловушки и вызывает периодический сток и накопление заряда. Подход сгустка к магнитному зеркалу увеличивает провисание потенциала и таким образом увеличивает в соответствующий момент времени коэффициент отражения для частиц с наибольшими осцилляторными скоростями. При подходе сгустка к катоду происходит дополнительное снижение электрического поля на эмиттере, средний пич-фактор уменьшается, и большее число эмитированных в этот момент электронов оказывается способным впоследствии преодолеть магнитное зеркало и пройти в резонатор гиротрона. В итоге, формируемый электронный пучок приобретает компоненту тока с периодом, равным периоду колебаний пространственного заряда в ловушке (рис. 4, а). Моделирование показывает, что сток электронов возможен также и в сторону катода, поскольку колебания сгустка приводят к появлению электронов с энергией, достаточной для бомбардировки катода [4] (временная зависимость тока бомбардировки показана на рис. 4, б).

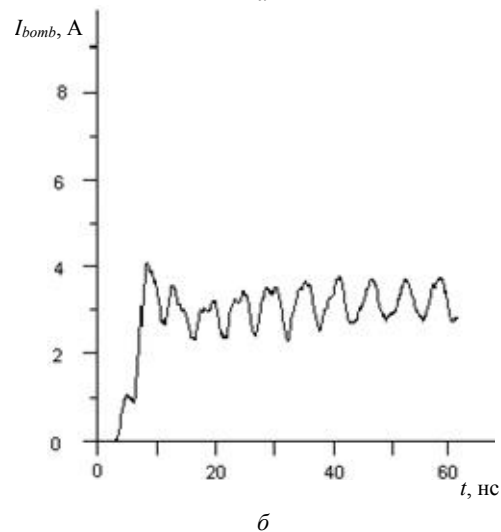
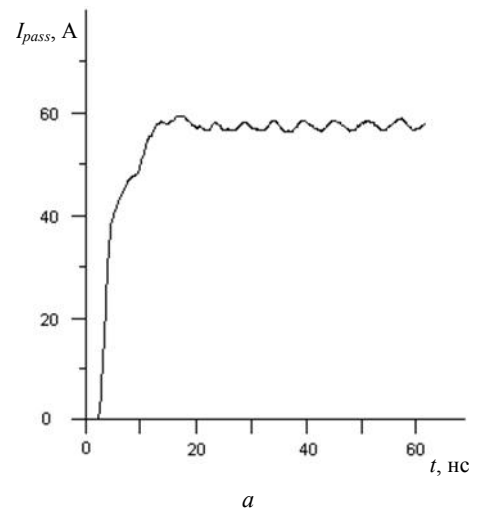


Рис. 4. Численное моделирование: а — тока ВЭП в пространстве дрейфа; б — тока бомбардировки катода

Энергия, с которой электроны бомбардируют катод, может достигать в среднем 2—3 % от энергии, соответствующей ускоряющему потенциалу  $U$ . Амплитуда осцилляций энергии и тока бомбардировки увеличивается с ростом  $g_0$ . Основной заряд бомбардирующих частиц падает на катод в пределах эмиттера. С ростом питч-фактора зона бомбардировки плавно расширяется, в основном, в сторону меньших магнитных полей. Глубина модуляции тока бомбардировки может достигать 50 %.

Величина энергетического разброса в сформированном пучке нарастает с ростом  $g_0$  и достигает 4,6 %, т. е., по крайней мере, на порядок превышает разброс, вызванный провисанием потенциала пучка, что может ограничить КПД гиротрона с таким пучком. Наблюдается тенденция к увеличению числа электронов, имеющих энергию, большую, чем обеспечивает ускоряющий потенциал (280 кэВ), по мере роста  $g_0$ .

Накопление отраженных частиц в адиабатической ловушке существенно меняет параметры пучка. Величины  $g$ , вычисленные для режимов с рабочим током  $I = 60$  А, представлены в таблице. Моделирование показывает, что, начиная с  $g_0 = 2,5$ , дальнейшее увеличение среднего питч-фактора невозможно: накопление пространственного заряда в ловушке оказывается настолько сильным, что рост коэффициента компрессии  $\alpha$  для увеличения  $g$  полностью компенсируется дополнительной экранировкой электрического поля на катоде пространственным зарядом захваченных в ловушку частиц. В этом режиме слабо меняется и величина скоростного разброса: она оказывается близкой к 34—35 %.

Характеристики формируемого пучка в зависимости от степени компрессии магнитного поля  $\alpha$

$\alpha (g_0)$	Питч-фактор, $g$	Отношение захваченного заряда к заряду первичного пучка, $Q_r/Q$
26,2 (1,0)	0,81	0,036
28,7 (2,5)	1,28	0,48
29,2 (4,0)	1,29	0,67

Примечание. В скобках указана соответствующая величина  $g_0$ .

### Экспериментальное исследование ЭОС

Целью экспериментов было обнаружение и исследование модуляции тока формируемого ВЭП в режимах, когда, согласно численному моделированию, эта модуляция вызвана колебаниями электронов, захваченных в адиабатическую ловушку. Исследования проводились на ускорителе "Сатурн" [15]. В пушке использовался импрегнированный алюминатно-бариевый катод с рабочей температурой 1050—1100 °С. Пушка работала в режиме температурного ограничения тока катода и формировала пучок с параметрами, при которых

велось численное моделирование ( $U = 280$  кВ, рабочий ток  $I = 60$  А, величина магнитного поля в резонаторе 14,6 кГс).

Схема эксперимента показана на рис. 5. Особенностью схемы является наличие СВЧ-поглотителя 11 на входных элементах канала транспортировки, благодаря чему подавлялась паразитная СВЧ-генерация, вызывавшая, как было установлено в [9], высоковольтные пробои пушки. Специальный детектор 12 контролировал отсутствие паразитного СВЧ-излучения во время эксперимента. Секторная диафрагма 7, выделявшая примерно 1/12 часть сечения пучка (и его тока), предотвращала аналогичное самовозбуждение в зоне однородного магнитного поля. Меры, предпринятые для подавления паразитного СВЧ-излучения, позволили исследовать формирование ВЭП в условиях высокой магнитной компрессии и больших значений захваченного в ловушку пространственного заряда.

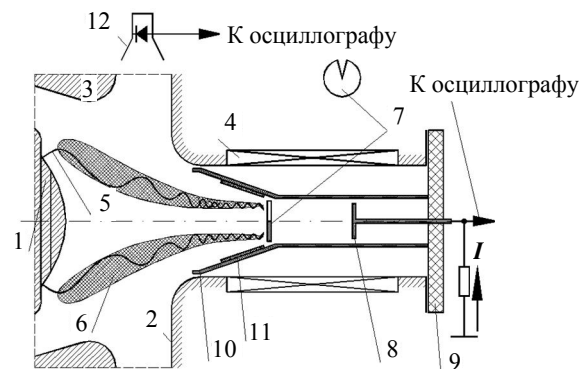


Рис. 5. Схема эксперимента:

- 1 — катод; 2 — анод; 3 — промежуточный анод; 4 — соленоид; 5 — электронный пучок; 6 — облако пространственного заряда в адиабатической ловушке; 7 — секторная диафрагма; 8 — коллектор электронов; 9 — заглушка-изолятор; 10 — входной конус; 11 — СВЧ-поглотитель; 12 — СВЧ-детектор

Измерения, выполненные с помощью широкополосного осциллографа, показали, что при коэффициенте компрессии  $\alpha$  свыше 30 появляется синусоидальная модуляция тока, глубина которой с ростом компрессии увеличивается (рис. 6). На рис. 7 представлены частотные спектры тока, демонстрирующие различную степень сложности модуляции при разных коэффициентах компрессии. Характерный период модуляции совпадает с результатами численного моделирования. При  $\alpha$  свыше 40 ток пучка начинает уменьшаться (рис. 8), что объясняется как потерями тока отраженных электронов при бомбардировке катода захваченными частицами, так и экранировкой катода (пушка постепенно переходит в режим ограничения тока пространственным зарядом). При  $\alpha = 50$  это уменьшение тока становится двукрат-

ным. Как видно из рис. 8, эксперимент охватывает значительно больший диапазон изменения магнитной компрессии (от 23 до 48), чем численное моделирование (от 26 до 29), возможности которого ограничивались большим требуемым временем расчетов. Поэтому в эксперименте были получены режимы со значительно большей глубиной модуляции, а также режимы с более сложным спектральным составом колебаний.

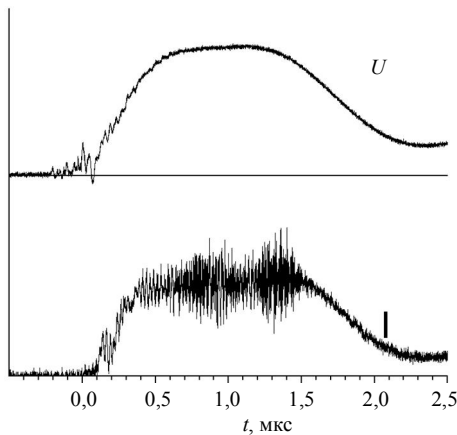


Рис. 6. Осциллограммы импульсов напряжения  $U$  и тока в цепи коллектора  $I$ :

Период модуляции тока соответствует периоду колебаний электронного сгустка в ловушке

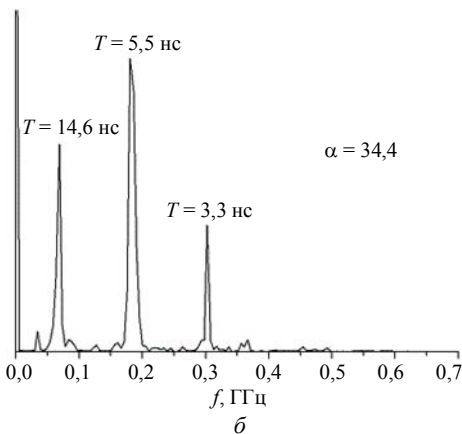
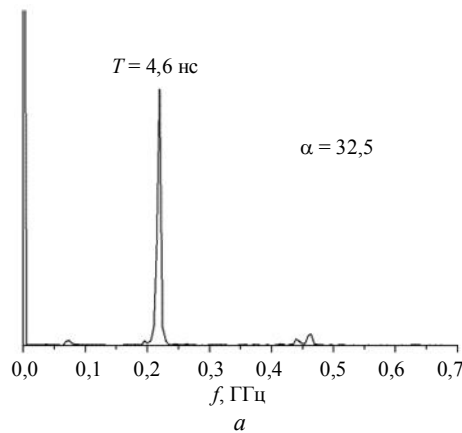


Рис. 7. Спектры модуляции тока при различных коэффициентах компрессии  $\alpha$

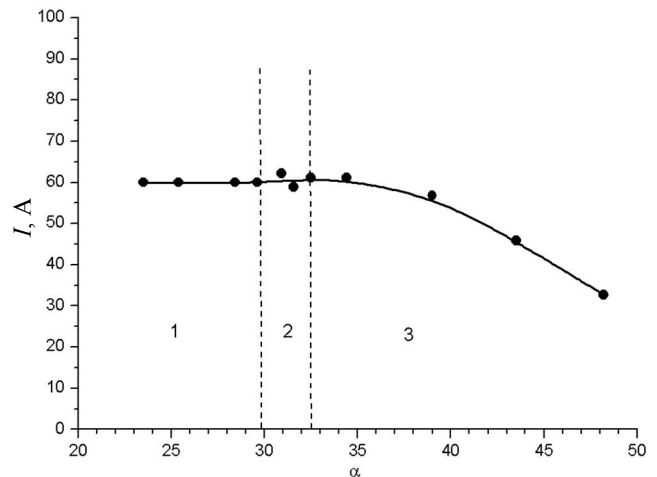


Рис. 8. Экспериментальная зависимость среднего тока ВЭП в зависимости от коэффициента компрессии  $\alpha$ :

Пунктирные линии разделяют зоны с характерными режимами (по результатам численного моделирования): 1 — заряд в ловушке не накапливается; 2 — стационарное распределение заряда в ловушке (электроны колеблются, но не группируются в сгусток); 3 — периодическое движение электронного сгустка в ловушке

Возникновение модуляции тока ВЭП при большой компрессии наблюдалось и в моделирующих режимах с пониженным ускоряющим напряжением 125 и 11 кВ. В этих случаях происходило соответствующее (приблизительно, пропорциональное квадратному корню из напряжения) понижение частоты модуляции, подтверждающее, что период модуляции определяется временем продольных осцилляций электронов в ловушке. На рис. 8 показаны также границы зон с различным поведением пространственного заряда, которые практически не перемещаются с изменением ускоряющего напряжения  $U$  при условии, что магнитное поле изменяется как  $U^{1/2}$ .

Полученные в эксперименте и при численном моделировании значения компрессии  $\alpha_{min}$ , когда возникает модуляция, достаточно близки. Небольшое превышение  $\alpha_{min}$  при измерениях по сравнению с расчетным значением может быть вызвано несколько меньшим разбросом скоростей из-за шероховатостей эмиттера, чем закладывалось в расчетную модель. Указанная величина обычно известна только на уровне оценок, и вводилась в расчетную модель феноменологически.

Как показано в [16], интенсивные колебания проходящего в резонатор тока на частоте продольных колебаний электронов могут быть полностью устранены с помощью диафрагмы, перехватывающей поток отраженных электронов и предотвращающей их накопление в адиабатической ловушке. Полученный таким способом (хотя и с некоторыми потерями тока) электронный пучок с высоким пич-фактором и малым разбросом

по скоростям может быть пригоден для работы в высокоэффективных импульсных гиротронах и гироклистронах на основной и более высоких гармониках гирочастоты.

### Заключение

Экспериментальное исследование и численное моделирование процесса формирования ВЭП в МИП мощного релятивистского гиротрона при больших значениях магнитной компрессии показало, что вследствие появления отраженных электронов и их накопления в ловушке в пучке возникает неустойчивость, проявляющаяся в модуляции тока пучка (глубина модуляции доходит до 50 %) с периодом продольных осцилляций электронов в ловушке. В режимах с развитой неустойчивостью происходит усложнение закона модуляции тока пучка. В указанных режимах наблюдается сильная экранировка катода пространственным зарядом, в результате которой пич-фактор пучка выходит на насыщение и перестает зависеть от степени компрессии магнитного поля.

Согласно численному моделированию в этих условиях величина энергетического разброса в сформированном пучке достигает 4,6 %, что на порядок превышает разброс, вызванный провисанием потенциала пучка.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 08-02-00668 и 07-02-01309).*

## Theoretical and experimental study of the space-charge oscillations in the electrooptic system of a relativistic gyrotron

*E. V. Ilyakov, I. S. Kulagin, B. Z. Movshevich*  
Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia  
E-mail: ilyakov@appl.sci-nnov.ru

*V. N. Manuilov*  
Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia  
E-mail: manuilov@rf.unn.ru

*Theoretical and experimental study of the oscillations of a space-charge cloud, taking place in a magnetron-injection gun of a powerful relativistic gyrotron, has been carried out. The charge storage comes via electron-beam magnetic compression of the reflection from a magnetic mirror of a part of the electrons having the largest transverse velocities. It has been ascertained that at the large values of compression coefficient the beam loses its stability that finally leads to the appearance of the beam current modulation at the frequency of the longitudinal oscillations of an electron bunch in the adiabatic trap. According to numerical simulations, the energy spread in the formed beam reaches 4.6 % in these conditions, which is greater by the order of value than that caused by the space-charge influence in the beam transported along the metal tube.*

PACS: 41.75.Ht; 41.85.Ct.

*Keywords:* relativistic gyrotron, magnetron-injection gun, space-charge oscillations, magnetic compression of the electron beam.

Bibliography — 16 references.

### Л и т е р а т у р а

1. Гольденберг А. Л., Петелин М. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 1. С. 141.
2. Цимринг Ш. Е. Формирование винтовых электронных пучков. — В кн.: Лекции по электронике СВЧ (3-я зимняя школа-семинар для инженеров). Кн. 4. — Саратов: СГУ, 1974. С. 3—94.
3. Kufin A. N., Lygin V. K., Manuilov V. N. et al. // Int. J. of Infrared and MM waves. 1999. V. 20. No. 3. P. 361.
4. Мануилов В. Н. // Известия вузов. Радиофизика. 2006. Т. 9. № 10. С. 872.
5. Кривошеев П. В., Мануилов В. Н. // Прикладная физика. 2002. № 3. С. 80.
6. Гольденберг А. Л. Диссертация на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук.
7. Борзенков Д. В., Лукаш О. И. // ЖТФ. 1997. Т. 67. № 9. С. 98.
8. Louksha O. I., Pioszyk B., Samsonov D. et al. // Conference Digest of the 32-nd International IRMMW-THz2007 Conference, 2007, 3—7 September, Cardiff, UK. P. 880.
9. Завольский Н. А., Иляков Е. В., Кулагин И. С. // XV Науч.-техн. конф. "Вакуумная наука и техника". Матер. конф. Октябрь 2008. — М.: МИЭМ. С. 96.
10. Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Кулагин И. С. и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 8. С. 680.
11. Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Кулагин И. С. и др. // Там же. 2004. Т. 47. № 5—6. С. 453.
12. Krivosheev P. V., Lygin V. K., Manuilov V. N., Tsimirning Sh. E. // Int. J. of Infrared and MM waves. 2001. V. 22. No. 8. P. 1119.
13. Lygin V. K. // Int. J. Infrared and MM Waves. 1995. V. 16. No. 2. P. 363.
14. Гинзбург Н. С., Кузнецов С. П. // В сб. Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. — Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 101.
15. Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Кораблев Г. С. и др. // ПТЭ. 1995. № 3. С. 138.
16. Иляков Е. В., Кулагин И. С., Мануилов В. Н., Шевченко А. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51. № 10. С. 855.