

УДК 621.385.6

## **ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ КОНФОКАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА НИЗКОВОЛЬТНЫМ ЛЕНТОЧНЫМ ВИНТОВЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

**С.А. Кишко, А.Н. Кулешов, Б.П. Ефимов***Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*E-mail: [sergeykishko@gmail.com](mailto:sergeykishko@gmail.com)

Поступила в редакцию 22 октября 2013 г.

В статье проведен расчет конфокального резонатора, образованного двумя цилиндрическими зеркалами для работы на моде  $H_{03}$ , а также рассчитана перестройка частоты на данной моде колебаний в зависимости от расстояния между зеркалами. Приведены результаты компьютерного моделирования процесса взаимодействия низковольтного ленточного ВЭП с высокочастотным полем конфокального резонатора на  $H_{03}$  моде с частотой 80,63 ГГц. Проведен анализ спектрального состава высокочастотного сигнала, а также показана возможность перестройки частоты генерации путем механического изменения расстояния между зеркалами конфокального резонатора с соответствующим изменением магнитного поля в области взаимодействия.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** магнетронно-инжекторная пушка, ленточный винтовой электронный пучок, питч-фактор, конфокальный резонатор, низковольтный мазер на циклотронном резонансе.

У статті проведено розрахунок конфокального резонатора, утвореного двома циліндричними дзеркалами для роботи на моді  $H_{03}$ , а також розрахована перебудова частоти на даній моді коливань в залежності від відстані між дзеркалами. Наведені результати комп'ютерного моделювання процесу взаємодії низковольтного стрічкового ГЕП з високочастотним полем конфокального резонатора на  $H_{03}$  моді з частотою 80,63 ГГц. Проведено аналіз спектрального складу високочастотного сигналу, а також показана можливість перебудови частоти генерації шляхом механічної зміни відстані між дзеркалами конфокального резонатора з відповідною зміною магнітного поля в області взаємодії.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** магнетронно-інжекторна гармата, стрічковий гвинтовий електронний пучок, питч-фактор, конфокальний резонатор, низковольтний мазер на циклотронному резонансі.

The simulation results of the confocal cavity with two cylindrical mirrors that works on the  $H_{03}$  mode was obtained and discussed in the paper. Also the frequency tuning of the operational mode by changing the distance between the mirrors was simulated. The results of computer simulation of wave-particle interaction on  $H_{03}$  mode at the frequency of 80.63 GHz have been shown. The spectral analysis of the high-frequency signal was done and the possibility of frequency tuning by mechanically changing the distance between the mirrors of the confocal cavity with corresponding change in the magnetic field in the interaction region was shown.

**KEY WORDS:** magnetron- injection gun, the sheet helical electron beam, pitch-factor, confocal cavity, cyclotron resonance maser.

В настоящее время актуальной задачей является разработка источников электромагнитного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн с достаточным уровнем выходной мощности и возможностью плавной перестройки частоты в широком диапазоне. Максимальную выходную мощность электромагнитного излучения в данном диапазоне частот обеспечивают электровакуумные приборы, в которых используется индуцированное циклотронное излучение электронов, движущихся в магнитном поле. Самым распространенным представителем приборов этого типа является мазер на циклотронном резонансе (МЦР) - гиротрон. В классическом гиротроне в качестве электродинамической системы используется объемный цилиндрический резонатор. Возможность перестройки частоты в такой системе ограничивается переходом между рабочими модами резонатора. В связи с этим в работах [1-3] были предложены конструкции электродинамических систем, состоящих из двух зеркал различных конфигураций, в которых появляется возможность механической перестройки рабочей частоты за счет изменения собственной частоты резонатора с изменением расстояния между зеркалами. Поскольку в классических гиротронах используется трубчатый винтовой электронный пучок (ВЭП), то при использовании открытых электродинамических систем, как показано в работах [1,2], часть пучка не попадает в пятно поля возбуждаемого в резонаторе колебания, что приводит к снижению КПД прибора. В работе [4] было показано, что для достижения максимальной эффективности взаимодействия электронного пучка с высокочастотным полем резонатора пучок должен иметь оптимальную форму. При этом его ширина должна совпадать с диаметром пятна поля возбуждаемого в резонаторе колебания. Поэтому в гиротронах с открытыми электродинамическими системами целесообразно использовать

ленточный ВЭП, ширина которого совпадает с диаметром пятна поля возбуждаемого в резонаторе колебания [4]. Расчеты, проведенные в работе [4] показали, что мощность выходного излучения будет выше, чем при использовании трубчатого цилиндрического или эллиптического винтового электронного пучка. В работах [5-6] разработана низковольтная планарная магнетронно-инжекторная пушка (МИП), которая формирует ленточный ВЭП с величиной питч-фактора больше единицы и разбросами скоростей электронов, не превышающих 15%, а также приведены результаты ее экспериментального исследования. Целью данной работы является анализ взаимодействия ленточного ВЭП с  $H_{03}$  модой открытого цилиндрического резонатора в 4-х мм диапазоне длин волн.

### КОНСТРУКЦИЯ КОНФОКАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

Внешний вид конфокального резонатора, состоящего из двух цилиндрических зеркал длиной 26,25 мм с разрезными кольцами по краям, представлен на рис. 1. Расстояние между зеркалами  $L$  соответствует рабочей моде колебаний  $H_{03}$  и в рассматриваемом частотном диапазоне составляет 6 мм. Радиусы кривизны зеркал также равны 6 мм. Внутренний радиус разрезных колец составляет 4 мм со стороны МИП и 5 мм со стороны коллектора, толщина колец составляет 1мм. Следовательно, данный резонатор является короткофокусным с характерными размерами, сравнимыми с длиной волны возбуждаемых колебаний. В работе [7] экспериментально показано, что короткофокусные открытые резонаторы имеют разреженный спектр колебаний. При этом распределение полей в таких электродинамических системах описывается теми же функциями, что и в открытых резонаторах с длиннофокусными зеркалами. Таким образом, можно сказать, что колебание  $H_{03}$  будет обладать малыми дифракционными потерями в том случае, если ширина зеркал  $2b \geq 4w_1$  [8]. Здесь  $w_1$  - радиус пятна поля рассматриваемого колебания на зеркалах, а  $2b$  - ширина зеркал. Радиус кривизны зеркал в случае конфокального резонатора равен расстоянию между ними, а ширина зеркал в результате проведенных расчетов составила 10 мм.

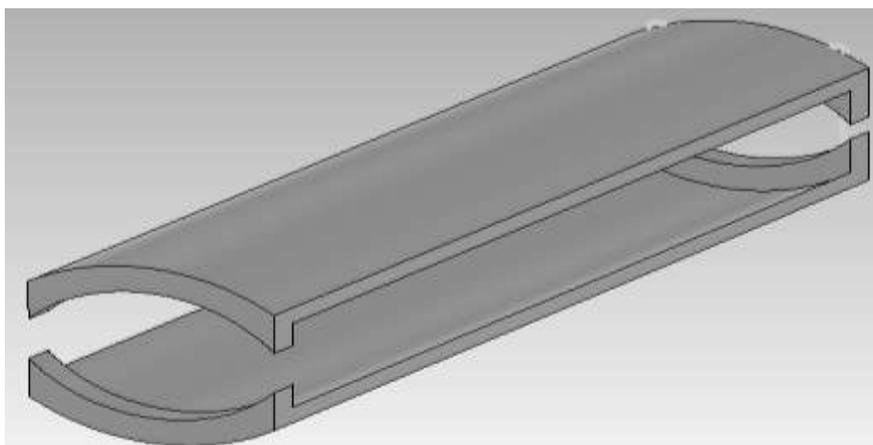


Рис. 1. Конструкция конфокального резонатора.

Распределение напряженности электрического поля в поперечном сечении резонатора для моды  $H_{03}$  показано на рис. 2.

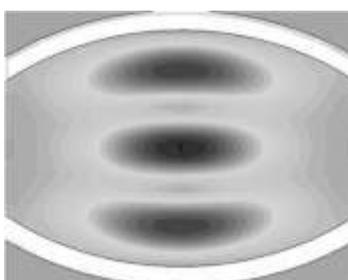


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в поперечном сечении конфокального резонатора для моды  $H_{03}$ .

Из рис. 2 видно, что один из максимумов электрической компоненты поля стоячей волны в резонаторе расположен в центре системы. Поэтому при использовании ленточного ВЭП он будет

находиться в пятне поля резонатора, что позволит использовать весь электронный пучок и повысить эффективность взаимодействия электронов с высокочастотным полем резонатора.

Поскольку подобная конструкция электродинамической системы предполагает возможность механической перестройки частоты, была рассчитана зависимость собственной частоты конфокального резонатора на моде  $H_{03}$  от расстояния между зеркалами, которая показана на рис. 3. Пунктирной линией изображена перестройка частоты, которая рассчитана аналитически, для открытого конфокального резонатора со сферическими зеркалами [9].

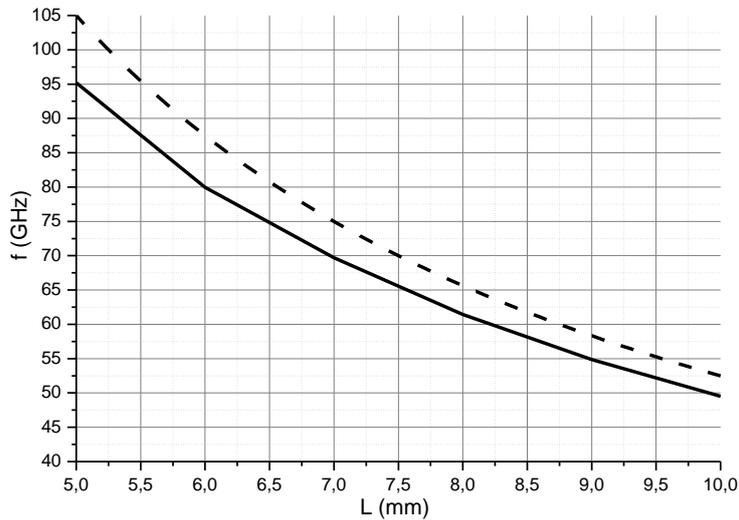


Рис. 3. Зависимость собственной частоты конфокального резонатора на моде  $H_{03}$  от расстояния между зеркалами.

Из рис. 3. видно, что при изменении расстояния между зеркалами частота высокочастотных колебаний на моде  $H_{03}$  изменяется в широких пределах. При этом дисперсионная зависимость имеет нелинейный характер.

#### НИЗКОВОЛЬТНАЯ ПЛАНАРНАЯ МИП И МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Для расчета процесса взаимодействия электронного пучка с высокочастотным полем конфокального резонатора был использован ленточный ВЭП, формируемый планарной МИП со следующими параметрами: ускоряющее напряжение порядка 5 кВ, ток пучка 300 мА, питч-фактор – 1, среднеквадратичные разбросы продольных и вращательных компонент скоростей электронов не превышают 15%. Профиль поперечного сечения электронного пучка в области взаимодействия изображен на рис. 4.

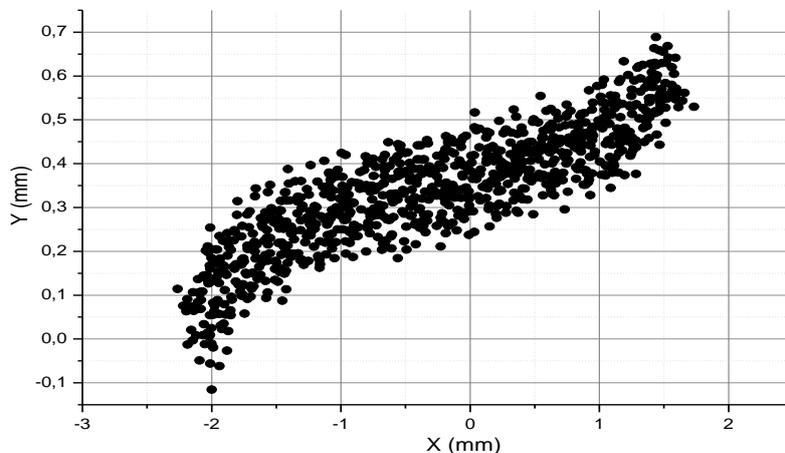


Рис. 4. Профиль электронного пучка.

Планарная МИП и траектории электронов в формируемом ею ленточном ВЭП показаны на рис. 5.

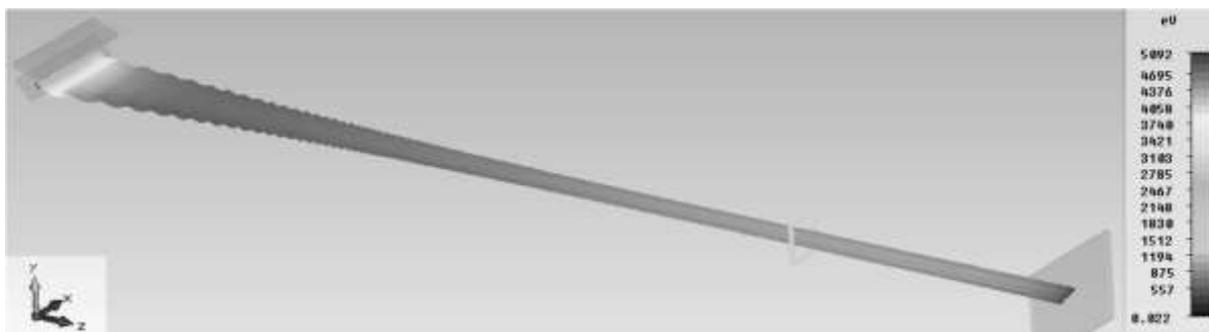


Рис. 5. Планарная МИП и траектории электронов в ленточном ВЭП.

Из рис. 4-5 видно, что компрессия электронного пучка в адиабатически нарастающем магнитном поле составляет порядка 30%. Увеличенный разброс скоростей электронов в пучке и деформация профиля пучка возникает из-за большой протяженности участка формирования пучка, который необходим для достижения величины пичч-фактора порядка единицы. Длина участка формирования пучка зависит от используемого диапазона ускоряющих напряжений и величины магнитного поля.

Для получения магнитного поля с необходимыми характеристиками, как в области формирования ленточного ВЭП, так и в области взаимодействия, в расчете была использована импульсная магнитная система. Конструкция магнитной системы была предложена в ИПФ РАН (Нижний Новгород). Распределение продольной компоненты магнитного поля по длине системы показано на рис. 6.

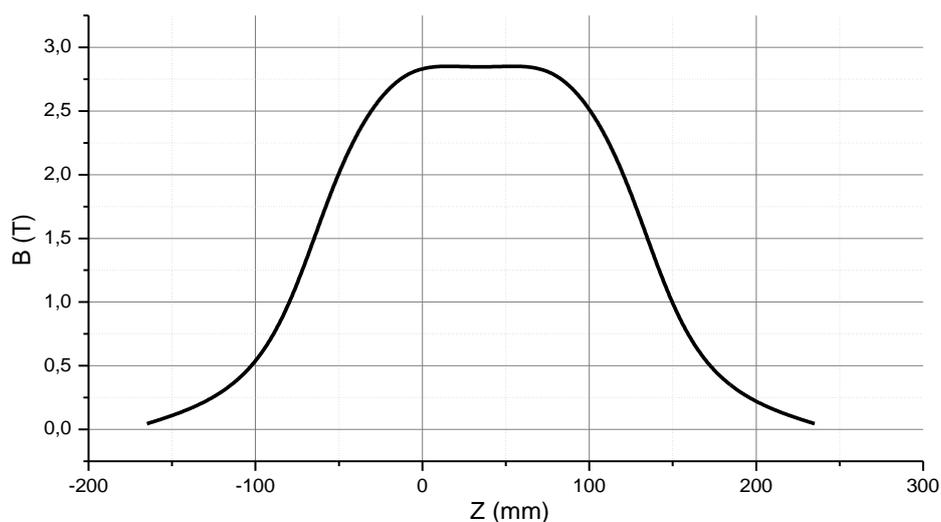


Рис. 6. Распределение магнитного поля.

Данная магнитная система обеспечивает магнитное поле порядка 2,9 Т с высокой степенью однородности в области взаимодействия. Неоднородность магнитного поля не превышает 1 %.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С помощью компьютерного моделирования процесса взаимодействия низковольтного ленточного ВЭП с высокочастотным полем конфокального цилиндрического резонатора была получена генерация на  $H_{03}$  моде с частотой порядка 80,63 ГГц. Спектр генерируемого сигнала показан на рис. 7.

Как видно из рис. 7, имеет место одночастотная генерация на частоте 80,63 ГГц, ширина полосы генерируемого сигнала составляет величину порядка 20 МГц. Спектральная характеристика сигнала низковольтного МЦР с конфокальным резонатором очень похожа на спектральную характеристику сигнала, полученного для гиротрона с планарным резонатором и ленточным ВЭП на частоте 75 ГГц, работающем в 12 кВ диапазоне ускоряющих напряжений, который описан в работе [10]. Это свидетельствует о селекции паразитных колебаний в открытых электродинамических системах, что позволяет получить устойчивую одночастотную генерацию на рабочей моде колебаний с использованием ленточного ВЭП в качестве активной среды.

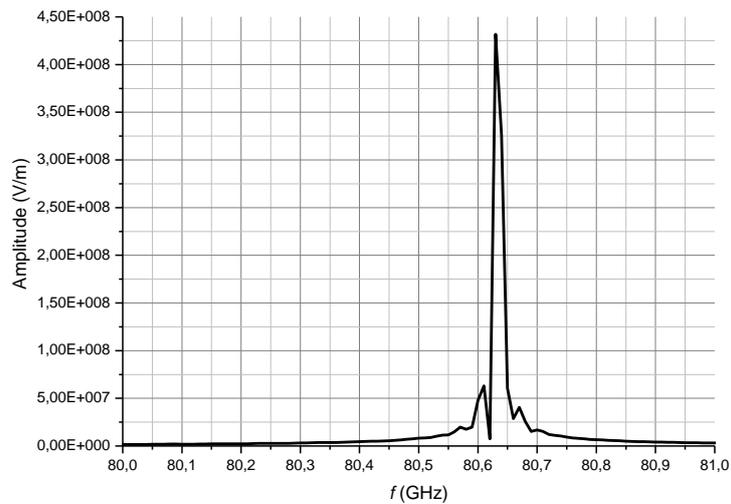


Рис. 7. Спектр генерируемого сигнала.

Распределение напряженностей электрического и магнитного полей в поперечном сечении и по длине резонатора изображено на рис. 8.

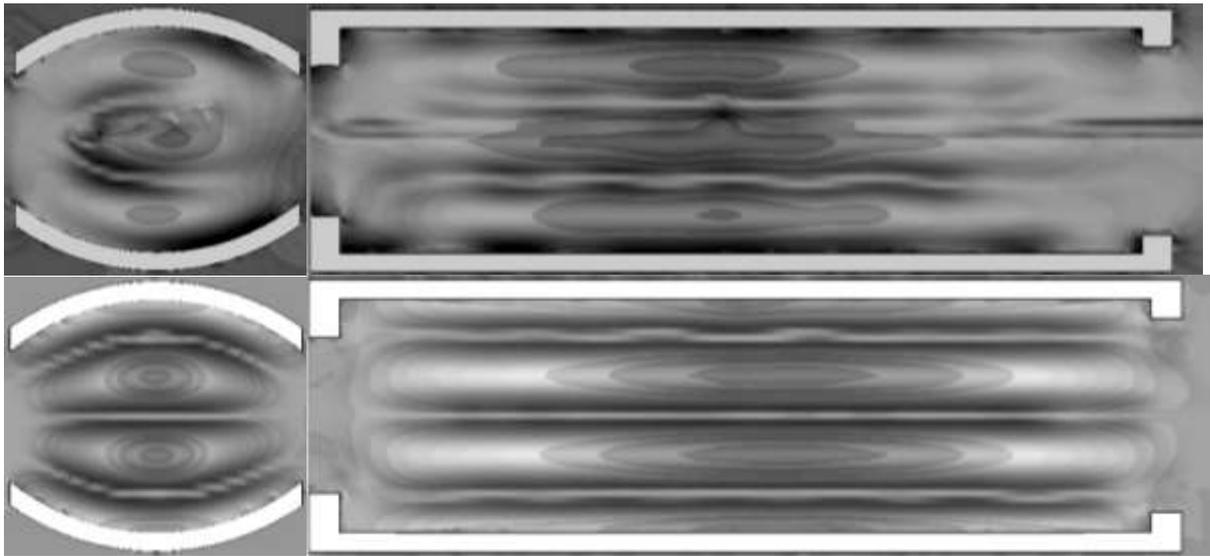


Рис. 8. Распределение напряженностей электрического и магнитного полей в поперечном сечении и по длине конфокального резонатора.

Из рисунка видно, что в конфокальном резонаторе возбуждается  $H_{03}$  мода, которая имеет распределение электрического поля оптимальное для взаимодействия с ленточным ВЭП. Большой вклад в возбуждение колебаний в конфокальном резонаторе ленточным ВЭП вносят закругленные сужения по краям резонатора, которые и определяют его дифракционную добротность для рабочего типа колебаний.

Распределение энергии электронов в ленточном ВЭП в процессе взаимодействия с высокочастотным полем резонатора показано на рис. 9.

Из рис. 9 виден процесс группировки электронов в сгустки в местах максимальной напряженности электрического поля. Благодаря различным радиусам закругленных сужений на краях резонатора вывод энергии электромагнитных колебаний осуществляется в направлении коллектора, где закругленное сужение меньше, о чем также свидетельствует смещение электронных сгустков в направлении вывода энергии. Выходная мощность составила величину порядка 180 Вт.

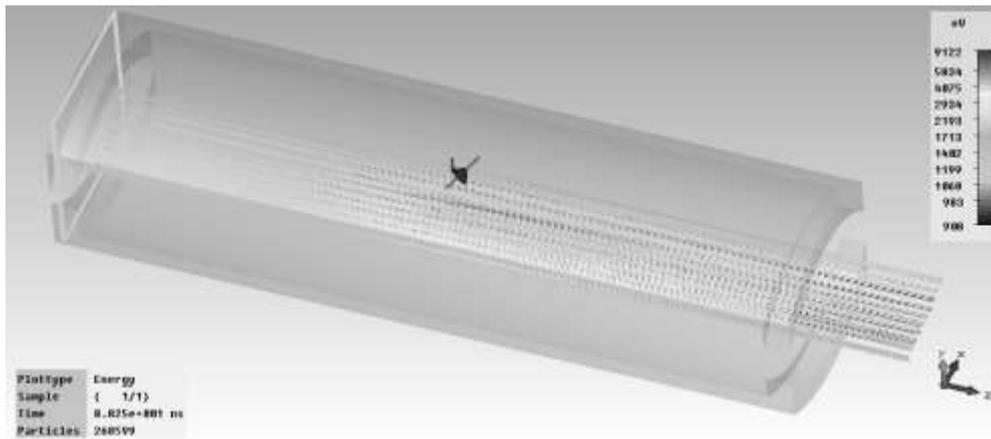


Рис. 9. Распределение энергии электронов в ленточном ВЭП в процессе его взаимодействия с высокочастотным полем конфокального резонатора.

Конфокальная геометрия резонатора обеспечивает селекцию паразитных колебаний, а использование ленточного ВЭП позволяет более эффективно взаимодействовать с высокочастотным полем резонатора.

### ВЫВОДЫ

В работе проведен расчет конфокального резонатора, образованного двумя цилиндрическими зеркалами, в котором возбуждается мода  $H_{03}$  на частоте 80,63 ГГц. Показано, что рабочая мода возбуждается в рассматриваемом резонаторе в широкой полосе частот.

Результаты компьютерного моделирования процесса взаимодействия ленточного ВЭП с высокочастотным полем конфокального цилиндрического резонатора показали устойчивую генерацию на  $H_{03}$  моде на частоте 80,63 ГГц, что свидетельствует о возможности использования ленточного ВЭП в МЦР с открытыми электродинамическими системами. КПД МЦР с конфокальным резонатором составил величину порядка 15% на типе колебаний  $H_{03}$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.Н. Власов, А.Г. Лучинин, Г.С. Нусинович, И.М. Орлова, В.Г. Усов, В.А. Флягин, В.И. Хижняк, "Гиротроны с двухзеркальными резонаторами" / Сб. научных трудов "Гиротроны", Горький. – 1980. - с. 160 – 170.
2. Wen Hu, M.A. Shapiro, K.E. Kreisler, R.J. Temkin, "140-GHzgyrotron experiment based on a confocal cavity" / IEEE Trans. Plasma Sci. – 1998. –Vol. 26, no. 3, -pp. 366 – 374.
3. Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, В.Ю. Заславский, А.С. Сергеев, И.В. Железнов, "Субмиллиметровые планарные гиротроны с поперечным дифракционным выводом излучения" / Письма в ЖТФ. –2011. –Т. 37, № 2. - с. 62 – 70.
4. А.Г. Лучинин, Г.С. Нусинович, "Сравнение КПД и выходных мощностей МЦР – монотронов с различными электродинамическими системами" / Электронная техника, Электроника СВЧ. – 1975. – Т. 1, №11. - с. 26 – 36.
5. Кишко С., Пономаренко С., Кулешов А., Ефимов Б., "Магнетронно-инжекторная пушка для планарного мазера на циклотронном резонансе" / Вестник ХНУ, серия радиофизика и электроника. – 2012. –Т. 21, №1038. – с. 83-88.
6. С.А. Кишко, А.Н. Кулешов, С.С. Пономаренко, Б.П. Ефимов, С.А. Власенко, "Экспериментальное исследование планарной магнетронно-инжекторной пушки для мазера на циклотронном резонансе" / Вестник ХНУ, серия радиофизика и электроника, (в печати).
7. Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Нестеренко А.В., Цвык А.И., Шестопалов В.П., "Исследование короткофокусных открытых резонаторов, применяемых в дифракционной электронике" / Радиотехника и электроника. – 1986. – Т. 1, №1. – с. 126 – 134.
8. Глоге Д., "Расчет оптических резонаторов и линзовых систем" / Квантоптика. М. Мир. – 1966. – с. 280 – 314.
9. Ищенко Е.Ф., "Открытые оптические резонаторы: Некоторые вопросы теории и расчета." / М. Сов. радио. – 1980. – 208 с.
10. С. А. Кишко, А. Н. Кулешов, М. Ю. Глявин, И. В. Зотова, И. В. Железнов, Н. С. Гинзбург, В. Н. Мануилов, В. Ю. Заславский, "Разработка 75 ГГц планарного гиротрона с поперечным выводом энергии" / Радиотехника и Электроника, Москва, (в печати).