

УДК 621.385.6

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНАРНОЙ МАГНЕТРОННО-ИНЖЕКТОРНОЙ ПУШКИ ДЛЯ МАЗЕРА НА ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ****С.А. Кишко<sup>1</sup>, А.Н. Кулешов<sup>1</sup>, С.С. Пономаренко<sup>1</sup>, Б.П. Ефимов<sup>1</sup>, С.А. Власенко<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*<sup>2</sup>*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина**4, пл. Свободы, Харьков, 61022, Украина*E-mail: [sergeykishko@gmail.com](mailto:sergeykishko@gmail.com)

Поступила в редакцию 22 октября 2013 г.

В статье приведены результаты разработки планарной магнетронно-инжекторной пушки и экспериментального макета для исследования параметров формируемых ленточных поливинтовых электронных пучков. Исследованы температурные режимы работы эмиттера планарной МИП. Получены отпечатки на смотровом окне сформированного ленточного ВЭП. Измерены зависимости разбросов компонент скоростей электронов в пучке и величины питч-фактора от ускоряющего напряжения. Проведено сравнение экспериментально полученных результатов с результатами компьютерного моделирования. Показана возможность формирования ленточного ВЭП с величиной питч-фактора больше единицы при сохранении разбросов компонент скоростей электронов в пределах 15%.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** магнетронно-инжекторная пушка (МИП), ленточный винтовой электронный пучок (ВЭП), питч-фактор, разброс электронов по скоростям, планарный гиротрон.

У статті наведено результати розробки планарної магнетронно-інжекторної гармати та експериментального макету для дослідження параметрів сформованих стрічкових полігвинтових електронних пучків. Досліджено температурні режими роботи емітера планарної МІГ. Отримано відбитки на оглядове вікно сформованого стрічкового ГЭП. Обмірювана залежність розкиду компонент швидкостей електронів у пучку й величини пітч-фактора від напруги що прискорює. Проведено порівняння експериментально отриманих результатів з результатами комп'ютерного моделювання. Показана можливість формування стрічкового ГЭП з величиною пітч-фактора більше одиниці при збереженні розкиду компонент швидкостей електронів у межах 15%.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** магнетронно-інжекторна гармата (МІГ), стрічковий гвинтовий електронний пучок (ГЭП), пітч-фактор, розкид електронів по швидкостям, планарний гиротрон.

The results of the development of the planar magnetron-injection gun and also the experimental set-up in order to study the parameters of generating ribbon helical electron beams have been presented in the paper. The thermal operation regimes of the planar MIG emitter were studied. The sheet HEB footprints at the observation window were obtained. The dependences of the electron velocity spread and the pitch-factor value on the accelerating voltage were measured. The comparison of experimentally obtained results with the results of computer simulation was made and discussed. The possibility of the generation of sheet HEB with pitch-factor value more than one with electron velocity spread in the range of 15% was shown.

**KEY WORDS:** magnetron- injection gun (MIG), the sheet helical electron beam (HEB), pitch-factor, velocity spread of the electrons, planar gyrotron.

Для ефективного возбуждения электромагнитных колебаний в электродинамической системе планарного гиротрона [1] возникает необходимость формирования ленточного винтового электронного пучка с величиной питч-фактора больше единицы. Основными требованиями, предъявляемыми к ленточному электронному пучку, являются: минимально возможные искажения в профиле поперечного сечения электронного пучка в области взаимодействия, величина питч-фактора должна быть равна или больше единицы, разброс энергий электронов в пучке не должен превышать 3% а разбросы компонент скоростей электронов должны находиться в пределах 15% (под разбросом подразумевается среднеквадратичное отклонение измеряемой величины). Расчет геометрии планарной МИП для формирования ленточного ВЭП удовлетворяющего вышеперечисленным характеристикам был проведен с помощью компьютерного моделирования и результаты расчета представлены в работах [2,3]. Для проверки результатов полученных с помощью компьютерного моделирования был разработан макет для экспериментального исследования планарной МИП с помощью которого были получены экспериментальные характеристики электронного пучка.

### МАКЕТ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНАРНОЙ МИП

Для проведения экспериментальных исследований в ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины конструкция планарной МИП была пересчитана на низковольтные ускоряющие напряжения и соответствующие им величины токов и магнитных полей. В результате планарная МИП для экспериментального исследования была рассчитана на 5 кВ диапазон ускоряющего напряжения при максимальном токе пучка 300 мА. Для формирования и фокусировки ленточного ВЭП была разработана магнитная система, состоящая из двух соленоидов с распределением магнитного поля, показанным на рис 1. Максимальная величина магнитного поля составляет 0,3 Т при токе соленоидов 20А. Величина магнитного поля в области эмиттера составляет 0,1 Т.

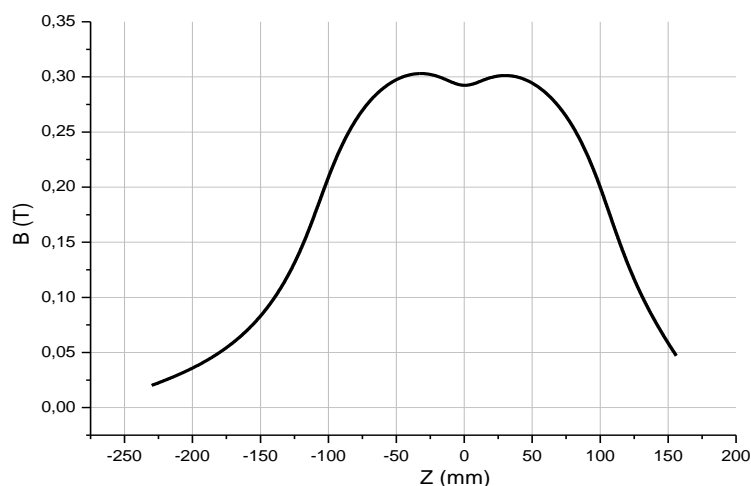


Рис. 1. Распределение продольной компоненты магнитного поля в системе.

Для экспериментального исследования характеристик планарной МИП был разработан макет, конструкция которого показана на рис. 2. Макет, изображенный на рис. 2, состоит из следующих частей: 1 – узел планарной МИП, 2 – канал транспортировки электронного пучка, 3 – изолированный электрод, 4 – изолятор между креплением коллектора и каналом транспортировки, 5 – смотровое окно.

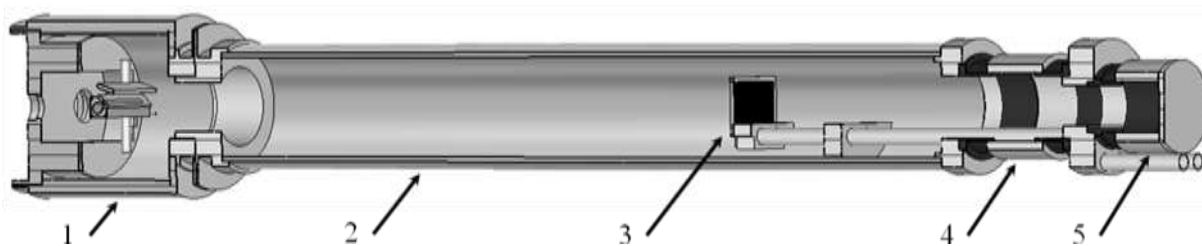


Рис. 2. Макет для экспериментального исследования планарной МИП.

Для измерения разбросов электронов в пучке по скоростям был использован метод задерживающего потенциала, подаваемого на электрически изолированный от корпуса электрод. Таким образом, подавая на изолированный электрод задерживающий потенциал, становится возможным измерить разброс компонент скоростей электронов и величину пич-фактора. Изолированный электрод выполнен в виде сетки из молибдена с периодом 0,3 мм. Электронный пучок, попадая на сетку, вызывает ее нагрев и свечение, что позволяет увидеть профиль поперечного сечения электронного пучка. Наблюдение за свечением на электроде проводилось через смотровое окно, расположенное таким образом, что в него видно сетку коллектора. Также отпечаток электронного пучка можно увидеть непосредственно на поверхности смотрового окна. Для предотвращения температурного повреждения электрод и коллектор имеют водяное охлаждение.

Конструкция макета и системы крепления планарной МИП разработаны таким образом, чтобы не вносить возмущений в распределение потенциала электрического поля в области планарной МИП. На рис. 3 изображена конструкция планарной МИП, которая состоит из следующих частей: подложка 1, которая является связующим звеном между планарной МИП и корпусом макета; к ней крепятся кварцевые трубки, которые необходимы для электрической изоляции между планарной МИП и корпусом

макета 2, выводы 3, необходимые для крепления электрических контактов и для механического крепления к диэлектрическим трубкам керамического основания 4. Керамическое основание необходимо для крепления подогревателя и катода 6, а также эмиттера 5. Керамическое основание повышает эффективность передачи тепла от подогревателя к эмиттеру. 7 – анод, закреплен с помощью уголкового крепления – 8. Данная конструкция рассчитана на диапазон ускоряющих напряжений до 6 кВ.

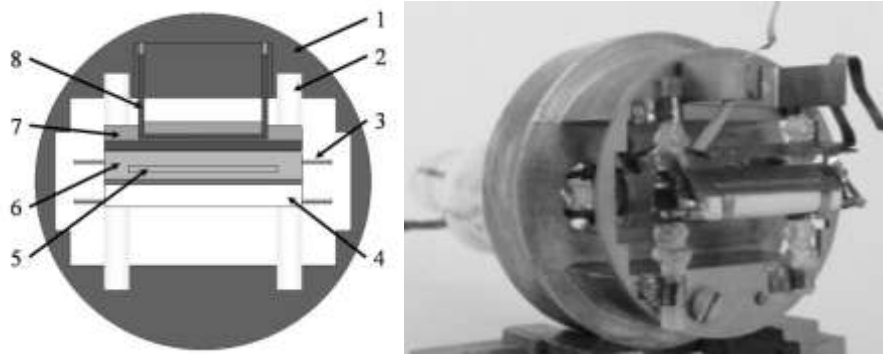


Рис. 3. Компьютерная модель узла планарной МИП и его экспериментальный прототип.

Эмиттер планарной МИП сделан из полоски никеля, на которую нанесен эмитирующий слой. В качестве эмитирующего материала использовался  $\text{BaSrCa}(\text{CO}_3)$ . Работа выхода для этого соединения составляет 1,6 – 1,7 эВ. Площадь эмитирующей поверхности равняется  $0,15 \text{ см}^2$ . Основываясь на [4] была рассчитана температура, необходимая для получения тока из эмиттера порядка 300 мА и она составила порядка  $900^\circ \text{C}$  в зависимости от состава эмитирующей смеси.

Экспериментальное исследование температурного режима работы эмиттера планарной МИП проводилось в стеклянной колбе при давлении остаточных газов порядка  $10^{-5}$  мм.рт.ст. Температура эмиттера определялась по его свечению с помощью пирометра. График зависимости температуры эмиттера и керамического основания от мощности накала показан на рис. 4.

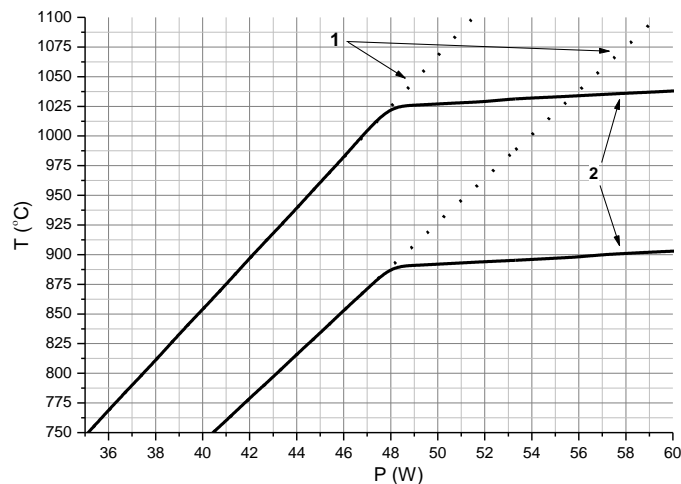


Рис. 4. Графики зависимости температуры эмиттера от мощности накала: 1 – результаты расчетов, 2 – экспериментальные результаты.

На рис. 4. Верхние кривые соответствуют температуре керамического основания, а нижние температуре эмиттера. Как видно из рис. 4 экспериментально измеренная температура (кривые 2) отличается от результатов компьютерного моделирования (кривые 1) что обусловлено ухудшением теплопередачи в области крепления катода к керамическому основанию. Линейный рост температуры эмиттера с увеличением мощности накала происходит в идеальных условиях (идеальный вакуум). В эксперименте с увеличением мощности накала температура эмиттера сначала растет линейно, а потом ее рост замедляется, что обусловлено наличием потерь тепла. Тепло может передаваться как остаточным газам, которые приводят к дополнительному охлаждению пушки и нагреву стенок колбы, а также и уходит на нагрев системы крепления пушки, которая в свою очередь нагревает корпус установки.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕНТОЧНОГО ВЭП МЕТОДАМИ ФОТОСЪЕМКИ И ТОРМОЗЯЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА

Макет для экспериментального исследования планарной МИП в сборе показан на рис. 5.



Рис. 5. Макет для экспериментального исследования планарной МИП.

Для измерения величины компонент скоростей электронов в электронном пучке и их разброса макет был подключен по схеме, показанной на рис. 6.

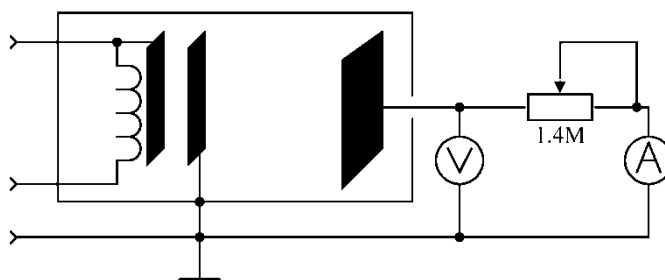


Рис. 6. Электрическая схема подключения экспериментального макета.

В схеме, изображенной на рис.6, с помощью переменного сопротивления обеспечивается регулировка величины тормозящего потенциала на коллекторе. Вольтметр и амперметр нужны для измерения величины тормозящего потенциала коллектора и тока электронов, осевших на коллекторе. При использовании данной схемы пичч-фактор пучка и компоненты скоростей электронов рассчитывались по методике, предложенной в работах [5-7]. Формулы для расчета показаны ниже.

$$v_z = \sqrt{\frac{2eU_c}{m}}; v_r = \sqrt{\frac{2e}{m}(U_a - U_c)}; g = \sqrt{\frac{U_a - U_c}{U_c}};$$

$$\delta v_r = \left( \frac{v_{r2} - v_{r1}}{v_{r0}} \right); v_{r0} = \frac{v_{r1} + v_{r2}}{2}.$$

где  $v_z$  и  $v_r$  – поступательная и вращательная компоненты скорости электронов,  $U_a$  – ускоряющее напряжение,  $e$  - заряд электрона,  $m$  – масса электрона,  $v_{r1}$ ,  $v_{r2}$  – скорости вращательного движения в случае напряжений электрода, при которых коллекторный ток равен соответственно 0,1 и 0,9 максимальной величины,  $U_c$  – напряжение на электроде. Метод торможения электронов позволит найти распределение продольных скоростей электронов, а затем, в силу равенства полных скоростей электронов найти их вращательные скорости. На основании полученных данных строится график зависимости нормированного тока коллектора от величины тормозящего потенциала. Из графика становится возможным оценить величины разбросов компонент скоростей электронов и их среднее значение. Средняя величина пичч-фактора рассчитывается как отношение вращательной компоненты скорости электронов к поступательной при величине тормозящего потенциала, соответствующего уровню 0,5 от нормированного тока.

В ходе экспериментального исследования магнитное поле соленоидов поддерживалось на уровне 0,27 Т в области однородного магнитного поля. Также для экспериментальных условий было проведено компьютерное моделирование. Сравнение экспериментальных результатов с результатами компьютерного моделирования показано на рис. 7.

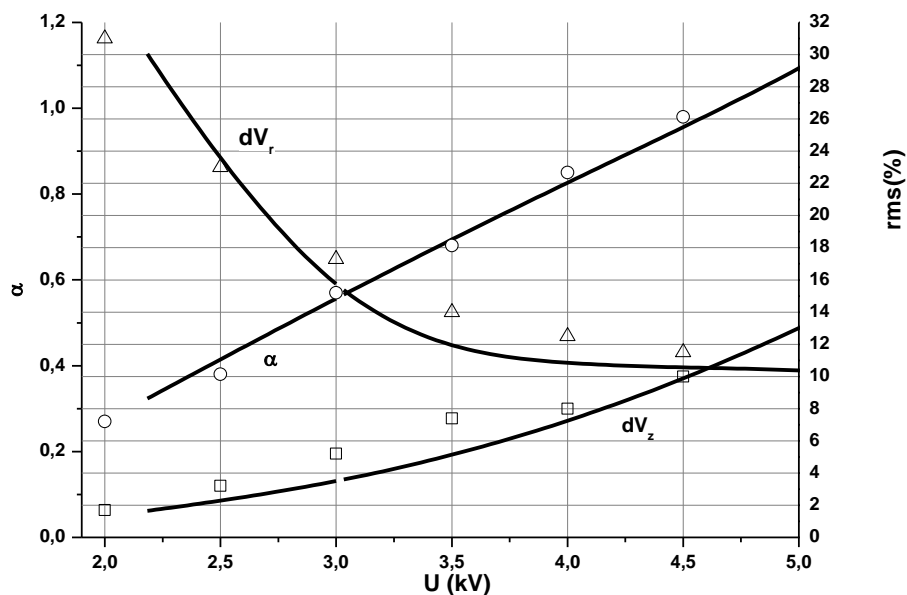


Рис. 7. Сравнение экспериментальных результатов с результатами компьютерного моделирования

Из рис. 7 видно хорошее совпадение экспериментально полученных результатов с результатами компьютерного моделирования. Разбросы компонент скоростей электронов полученные экспериментально немного больше значений полученных в ходе компьютерного моделирования. Это обусловлено наличием остаточных газов в макете в процессе эксперимента (давление составляет порядка  $10^{-6}$  мм.рт.ст.) и влиянием электронов отраженных от коллектора под действием тормозящего потенциала на пучок во время проведения эксперимента.

Также в ходе эксперимента были получены фотографии отпечатка электронного пучка на смотровом окне, которые показаны на рис. 8. Фотографии были сделаны при следующих параметрах: величина магнитного поля в однородной области 0,26 Т, ускоряющее напряжение 2,3 кВ, ток пучка 30 мА.

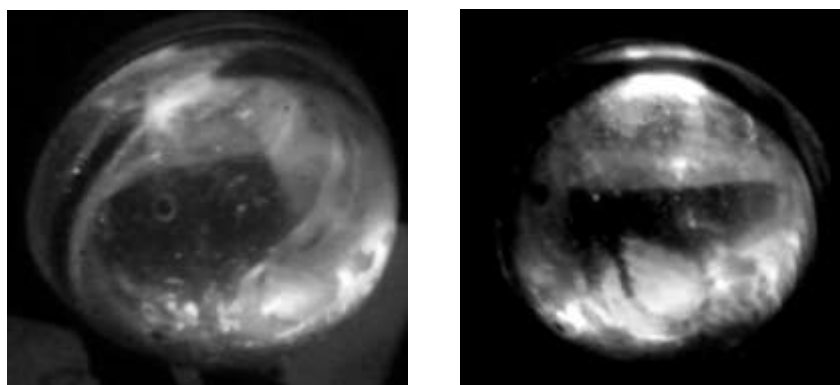


Рис. 8. Отпечаток электронного пучка на смотровом окне.

Из рис. 8 видно, что отпечаток электронного пучка имеет вид прямоугольника, что говорит о том, что пучок ленточный и без значительных деформаций в профиле.

Для данных условий был проведен траекторный анализ и получено распределение электронов в поперечном сечении пучка в области однородного магнитного поля и в области смотрового окна. Результаты показаны на рис. 9. Величина питч-фактора электронного пучка, изображенного на рис. 9 составляет порядка 1. Сохранение величины питч-фактора пучка обусловлено пропорциональным

уменьшением как магнитного поля в однородной области и области эмиттера, так и величины ускоряющего напряжения. Искажения в профиле электронного пучка в области смотрового окна вызваны адиабатически уменьшающимся магнитным полем, так как смотровое окно находится в спадающем магнитном поле.

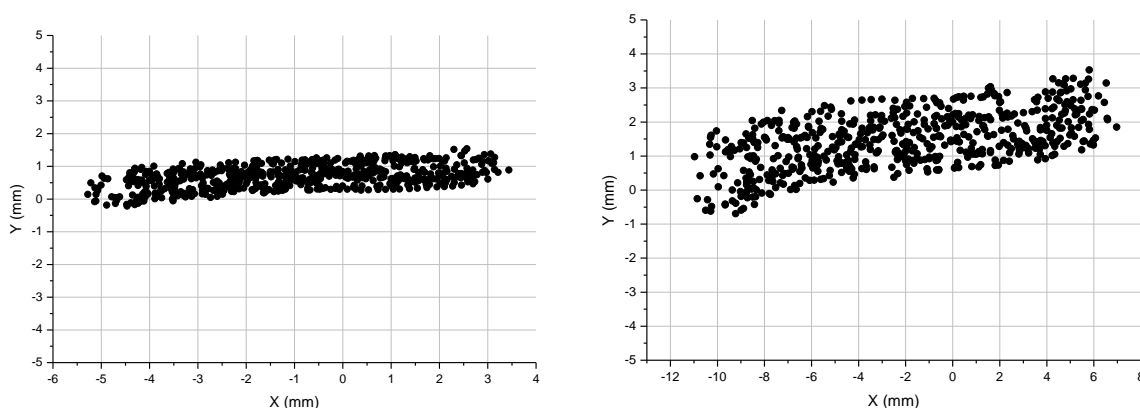


Рис. 9. Распределение электронов в поперечном сечении пучка в области однородного магнитного поля и в области смотрового окна.

### ВЫВОДЫ

В ходе работы был создан экспериментальный прототип планарной МИП. Измерение температурного режима работы эмиттера планарной МИП показало, что для достижения эмиссии электронов с током порядка 150 мА достаточно мощности накала в 50 Вт.

Разработанный макет для экспериментального исследования планарной МИП позволил увидеть отпечаток электронного пучка на смотровом окне и измерить его характеристики. По отпечатку электронного пучка можно сделать вывод о его ленточной форме.

Полученные экспериментально разбросы вращательной и поступательной компонент скоростей электронов в пучке хорошо совпадают с результатами компьютерного моделирования.

В ходе эксперимента установлено, что при ускоряющем напряжении 4,5 кВ и величине магнитного поля в однородной области порядка 0,27 Т, питч-фактор пучка составляет 1. При снижении величины магнитного поля до 0,26 Т и ускоряющем напряжении 2,3 кВ питч-фактор сохраняется в районе единицы. Это говорит о возможности изменения ускоряющего напряжения в широких пределах и возможности изменения величины питч-фактора, однако при этом нужно учитывать, что с увеличением питч-фактора также увеличиваются и разбросы компонент скоростей электронов в пучке. Питч-фактор электронного пучка в основном зависит от величины магнитного поля в области эмиттера и ускоряющего напряжения.

В результате был экспериментально сформирован ленточный ВЭП с величиной питч фактора больше единицы при разбросах компонент скоростей электронов, не превышающих 15 %, что достаточно для использования подобного ленточного ВЭП в квазиоптическом и планарном гиротронах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ginzburg N., Zotova I., Sergeev A., Zaslavsky V. and Zheleznov I., "High-Power Terahertz-Range Planar Gyrotrons with Transverse Energy Extraction" / *Phys. Rev. Lett.* – 2012. – Vol. 108. – pp. 105101.1-105101.4.
2. 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.
3. Кишко С., Кулешов А., Глявин М., Зотова И., Железнов И., Гинзбург Н., Мануилов В., Заславский В. "Разработка 75 ГГц планарного гиротрона с поперечным выводом энергии" / *Радиотехника и электроника, Москва, (в печати).*
4. Г. Кудинцева, А. Мельников, А. Морозов, Б. Никонов. *Термоэлектронные катоды.* Москва: Энергия. – 1966. – 368 с.
5. Авдошин Е. Г., Гольденберг А. Л. "Экспериментальное исследование адиабатических электронных пушек МЦР" / *Изв. Вузов. Радиофизика.* – 1973. – Т. 16, №10. – с. 1605-1611.
6. Запвалов В. Е., Куфтин А. Н., Лыгин В. К., Цимринг Ш. Е. "Численное моделирование и экспериментальное исследование магнетронно-инжекторных пушек мощных коротковолновых гиротронов" / *Изв. Вузов. Радиофизика.* – 1992. – Т. 35, №11-12. – с. 999-1007.
7. Sh.E. Tsimring, "Gyrotron electron beams: velocity and energy spread and beam instabilities" / *International Journal of Infrared and Millimeter Waves.* – 2001. – Vol. 22, No. 10. – pp. 1433-1468.