

СЕКЦИЯ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ВАКУУМЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ В РЕЛЯТИВИСТСКОМ ГИРОТРОНЕ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ГИРОЧАСТОТЫ С СЕЛЕКЦИЕЙ РАБОЧЕЙ МОДЫ ПРОДОЛЬНЫМИ ДРОССЕЛЬНЫМИ КАНАВКАМИ

STUDY OF POSSIBILITY OF GENERATION IN A RELATIVISTIC GYROTRON OPERATING AT THE SECOND CYCLOTRON HARMONIC WITH OPERATING-MODE DISCRIMINATION BY LONGITUDINAL CHOKE GROOVES

Н.А.Завольский¹, Е.В.Иляков¹ / ilyakov@ipfran.ru, Ю.К.Калынов¹, И.С.Кулагин¹, (ORCID: 0000-0002-1216-6580), В.Н.Мануилов^{1,2}, А.С.Шевченко¹

N.A.Zavolsky¹, E.V.Ilyakov¹ / ilyakov@ipfran.ru, Yu.K.Kalynov¹, I.S.Kulagin¹, (ORCID: 0000-0002-1216-6580), V.N.Manuilov^{1,2}, (ORCID: 0000-0002-1216-6580), A.S.Shevchenko¹,

¹Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

²Нижегородский государственный университет, г. Нижний Новгород

При работе на гармониках гирочастоты, многие паразитные моды можно подавить с помощью продольных канавок на поверхности резонатора. Канавки глубиной полволны прерывают токи возможных мод на всех частотных диапазонах, кроме частоты выделенной циклотронной гармоники.

During operation at harmonics of gyrofrequency, many spurious modes can be crushed down by means of longitudinal grooves on the surface of cavity. Grooves of a half-wavelength depth interrupt the currents of possible modes in all frequency ranges, except the frequency of the discriminated cyclotron harmonic.

Ключевые слова: *гиротрон, циклотронная гармоника, резонатор, дроссельная канавка, рабочая мода, селекция мод.*

Key words: *gyrotron, cyclotron harmonic, cavity, choke groove, operating mode, mode discrimination.*

ВВЕДЕНИЕ

Работа релятивистских гиротронов на гармониках циклотронной частоты дает возможность продвинуться по частоте генерируемого излучения без увеличения индукции магнитного поля и с сохранением мегаваттного уровня мощности [1-4]. В частности, взаимодействие со второй гармоникой характеризуется достаточно высокой эффективностью и доступностью решения проблемы селекции мод. Например, в эксперименте [4] гиротрон с рабочей волной TE_{11.2} продемонстрировал излучение двухмегаваттного уровня мощности на частоте 55,67 ГГц с КПД 28%. Следует отметить, что структура рабочей моды TE_{11.2} такова, что у стенки резонатора сосредоточено довольно высокое СВЧ поле, поэтому повышению мощности в [4] препятствовала угроза возникновения СВЧ пробоя. Эта угроза устраняется с переходом к более высоким радиальным индексам рабочей моды, но при этом возрастает плотность спектра мод резонатора. Чтобы сохранить селективность возбуждения рабочей моды, требуются специальные методы, один из которых представлен ниже.

1. СУТЬ МЕТОДА СЕЛЕКЦИИ

Поперечно-электрические моды гиротронов инициируют на стенке резонатора СВЧ токи поперечного направления. Очевидно, прорезая в стенке резонатора продольные щели определенной глубины (дрессельные канавки) можно осуществлять частотно зависимое влияние на соответствующие моды резонатора (см. рис. 1). Если глубина канавки составляет половину длины рабочей волны излучения, то на стыке канавки и резонатора СВЧ ток будет протекать беспрепятственно, как будто бы разрыв отсутствует. Другие, существенно отличающиеся по частоте СВЧ токи, будут испытывать разрыв. Таким образом, параметры резонатора и глубину канавок можно настроить на рабочую моду, возбуждающуюся на второй или третьей гармонике гирочастоты. При этом паразитные моды на частотах низших гармоник будут подавляться, что существенно проредит спектр конкурирующих мод.

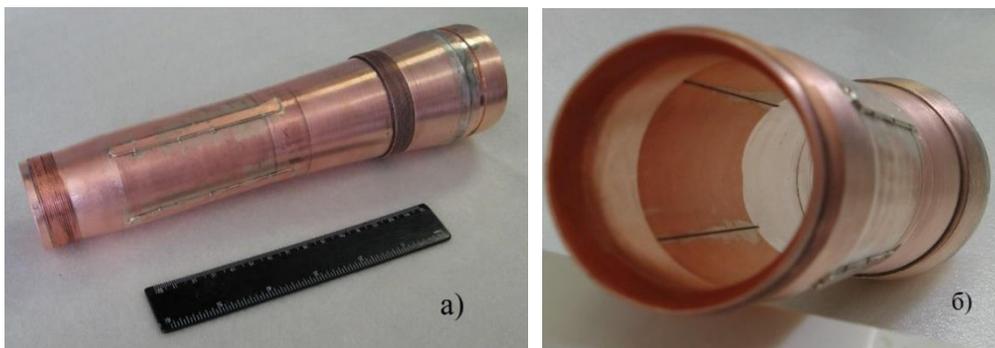


Рис. 1. Резонатор релятивистского гиротрона с дрессельными канавками: а) вид сбоку; б) вид со стороны закритического сужения.

2. ВЫБОР СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И РАСЧЕТ ГИРОТРОНА С ГЛАДКИМ РЕЗОНАТОРОМ ПО НЕСТАЦИОНАРНОЙ МОДЕЛИ

Для экспериментальной проверки предложенного метода селекции был взят резонатор, идентичный резонатору гиротрона, в котором на релятивистском электронном пучке было получено на основной циклотронной гармонике с модой $TE_{5.3}$ излучение на частоте 30 ГГц мощностью 10 МВт с КПД 50% [5], а на второй циклотронной гармонике с модой $TE_{3.7}$ – излучение мощностью около 1 МВт на частоте 50,4 ГГц с КПД 15% [1]. В этом резонаторе были сделаны 4 продольные канавки глубиной 2.5 мм (полволны на 2-й циклотронной гармонике). Поскольку в аксиально-симметричном резонаторе паразитные несимметричные моды возбуждаются вращающимися, то всегда будет иметь место прерывание СВЧ тока канавками с нерезонансной глубиной. В режиме, обозначенном на рис. 2 звездочкой, где наблюдается одновременное выполнение стартовых условий для мод $TE_{4.3}$ и $TE_{6.2}$ на основной циклотронной гармонике и мод $TE_{3.7}$, $TE_{1.8}$ и $TE_{8.5}$ на второй циклотронной гармонике, моды первой гармоник должны быть подавлены канавками, а моды второй гармоник можно выделить соответствующей настройкой магнитного поля.

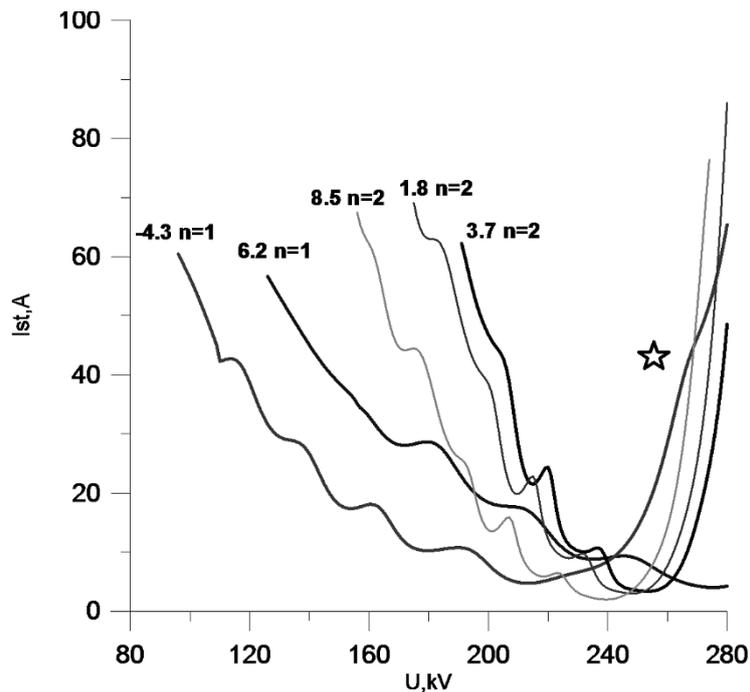


Рис. 2. Расчет стартовых токов мод в зависимости от напряжения по нестационарной модели. Звездочка отмечает режим (255 кВ, 45 А), в котором исследовалась работа гиротрона с селекцией с помощью дроссельных канавок. Магнитное поле 1.348 Тл.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАНАВОК

Вначале было проведено компьютерное моделирование электродинамических свойств резонатора с четырьмя канавками в отсутствие электронного пучка. Для этого со стороны выходного конуса в резонатор запускалась волна в виде моды TE_{5.3} на резонансной частоте (эта мода, как было сказано выше, была рабочей для гладкого резонатора в эксперименте [5] на основной циклотронной гармонике). Были рассмотрены два случая с различной глубиной канавок: (а) канавки глубиной в полволны и (б) канавки глубиной в четверть волны.

Моделирование продемонстрировало для случая (а) отсутствие разрыва СВЧ тока рабочей волны канавками: энергия естественным образом накапливалась в резонаторе в виде первой (одновариационной) продольной моды. Напротив, случай (б) демонстрировал разрыв СВЧ тока, что выражалось в отсутствии накопления энергии внутри резонатора и отражении запитывающей волны от выходного конуса резонатора.

Таким образом, было продемонстрировано, что канавки с нерезонансной глубиной, отличающейся от полволны излучения, препятствуют накоплению энергии в резонаторе, что будет выражаться в подавлении паразитной моды в гиротроне.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Однако, экспериментальные исследования показали следующее. Четыре продольные канавки глубиной 2.5 мм (в половину длины волны излучения на второй гармонике) хорошо подавляли только моды основной гармонике с нечетным азимутальным индексом, например TE_{5.3} на частоте 30 ГГц, а моды с четными индексами возбуждались с высокой мощностью и КПД (например, TE_{4.3} – 1.9 МВт с КПД 36%). При этом в гиротроне с канавками не удалось возбудить моду второй гармоники TE_{3.7}, полученную в [1], условия возбуждения которой, по-видимому, были ухудшены.

Результаты эксперимента следовало прояснить при компьютерном моделировании методом крупных частиц.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ

Было проведено компьютерное моделирование работы гиротрона, направленное на исследование возможности генерации излучения на моде TE_{4,3} при соответствующих расчетных параметрах электронного пучка и величине магнитного поля как в гиротроне с гладким резонатором, так и с канавками.

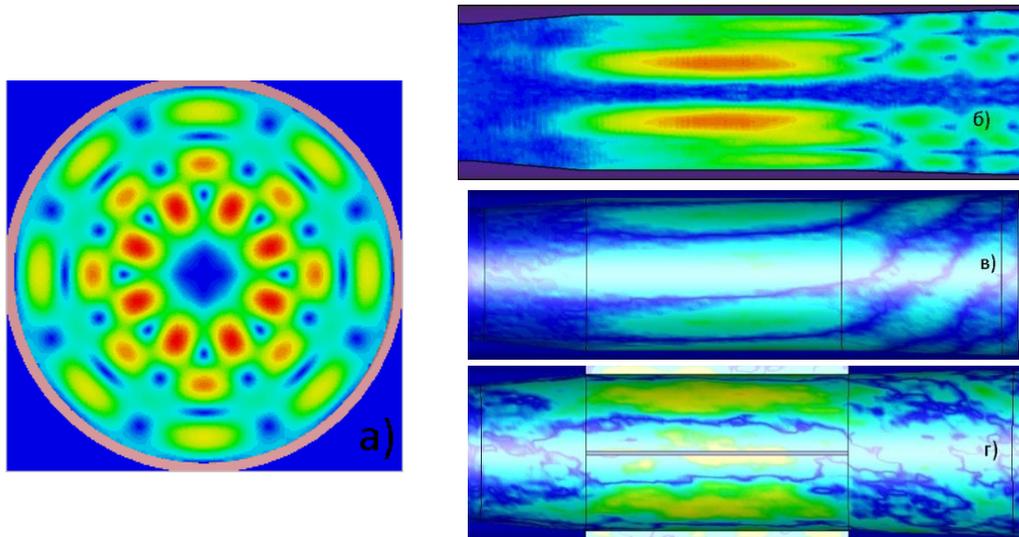


Рис. 3. Результат компьютерного моделирования генерации моды TE_{4,3} в установившемся режиме (изображена абсолютная величина СВЧ поля E): (а) – поперечное сечение резонатора; б) – продольное сечение резонатора; в) – вид на внутреннюю цилиндрическую поверхность резонатора; г) – то же с четырьмя дроссельными канавками.

При моделировании с гладким резонатором возбуждалось излучение на расчетной моде TE_{4,3} с достаточно высоким КПД – 23%. Анализ показал устойчивое возбуждение первой продольной моды (одновариационная структура поля) в однородной части резонатора (см. рис. 3,б). Структура поля в пределах резонатора поворачивается примерно на половину вариации (см. рис. 3,в).

Моделирование генерации в резонаторе с канавками показало, что в нем также способна эффективно возбуждаться мода TE_{4,3}. При этом поперечная структура моды в регулярной части резонатора не вращается, а определенным образом сориентирована по отношению к канавкам (см. рис. 3,г), в результате чего поверхностные токи канавками не прерываются и волна не возмущается. Сравнение рис. 3,в и рис. 3,г показывает, что канавки полностью устраняют небольшой азимутальный поворот структуры от начала к концу резонатора.

6. ВЫВОДЫ

Моделирование показало, что селективному возбуждению мод на второй гармонике препятствует возбуждение паразитной моды на основной гармонике, несмотря на наличие дроссельных канавок. Это оказалось возможным из-за того, что азимутальная структура паразитной моды соответствовала азимутальному расположению канавок (азимутальные вариации размещались между канавками). При этом вращение паразитной моды в резонаторе устранялось при сохранении достаточно высокого КПД.

С другой стороны, паразитные моды на первой гармонике, в принципе, могут быть подавлены нужным образом расположенными дроссельными канавками. Тем самым,

получает преимущество возбуждение генерации на второй гармонике гирочастоты. Проверку предлагаемого подхода планируется осуществить в ближайших экспериментах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 20-02-00274, 20-08-00308.

ЛИТЕРАТУРА

1. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Калынов Ю.К., Кулагин И.С., Мануилов В.Н., Шевченко А.С. Экспериментальное исследование релятивистского гиротрона миллиметрового диапазона длин волн на второй циклотронной гармонике // «Вакуумная наука и техника». Материалы XXIII научно-технической конференции. Под ред. С.Б. Нестерова. М.: Новелла. 2016. С.29-33.

2. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Калынов Ю.К., Кулагин И.С., Ошарин И.В., Савилов А.В. Гиротрон на второй гармонике гирочастоты с селекцией рабочей моды с помощью фазового корректора // «Вакуумная наука и техника». Материалы XXIII научно-технической конференции. Под ред. С.Б. Нестерова. М.: Новелла. 2016. С.34-38.

3. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Калынов Ю.К., Кулагин И.С., Мануилов В.Н., Шевченко А.С. Мощный релятивистский гиротрон миллиметрового диапазона длин волн на второй циклотронной гармонике // «Вакуумная наука и техника». Материалы XXIV научно-технической конференции под ред. С.Б. Нестерова. М.: «Новелла», 2017. С. 81-85.

4. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Калынов Ю.К., Кулагин И.С., Мануилов В.Н., Шевченко А.С. Мощный релятивистский гиротрон миллиметрового диапазона длин волн на второй циклотронной гармонике // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т.61, №1. С. 44-52.

5. Н.И. Зайцев, Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, В.К. Лыгин, М.А. Моисеев, В.Е. Нечаев, М.И. Петелин, Р.М. Розенталь. Десятимегаваттный импульсный гиротрон с длиной волны 1 см и КПД 50% // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т.46, №10. С.914-918.