

- linear Si<sub>2</sub>N? // J. Phys. Chem. 1996. 100. № 26. С. 10919-10927.  
10. Zmbov K.F., Margrave J.L. Mass spectrometric evidence for the gaseous Si<sub>2</sub>N molecule // J. Amer. Chem. Soc. 1967. 89. № 10. P. 2492-2493.

## Селекция мод в гиротроне на второй гармонике гирочастоты с помощью продольных дроссельных канавок

*Н.А. Завольский, Е.В. Иляков, Ю.К. Калынов, И.С. Кулагин, А.С. Шевченко*  
Нижегород, Институт прикладной физики РАН, 603950, ГСП-120, ул. Ульянова, 46  
E-mail: ikulagin@appl.sci-nnov.ru

*Предложен метод селекции мод в гиротроне на второй гармонике гирочастоты с помощью узких продольных дроссельных канавок в резонаторе. Глубина канавок выбирается в половину длины рабочей волны излучения. Такие канавки не являются препятствием для протекания поверхностного СВЧ тока рабочей моды, но разрывают токи мод на частотах основного циклотронного резонанса и других нерабочих гармоник гирочастоты, являющихся возможными конкурентами при установлении генерации в гиротроне.*

*Selection of modes with longitudinal choke grooves in a second-cyclotron-harmonic gyrotron. N.A. Zavolsky, E.V. Ilyakov, Yu.K. Kalynov, I.S. Kulagin, A.S. Shevchenko. A method to select the operating mode at the second cyclotron harmonic in gyrotron by means of narrow longitudinal choke grooves cut in the cavity has been proposed. The depth of grooves is selected equaled to a half of wavelength of operating radiation. Such grooves do not break surface RF current of the operating mode, but they break currents of the fundamental and other non-operating harmonics, which are potential competitors when establishing a generation in gyrotron.*

### 1. Введение

Продвижение гиротронов на релятивистских электронных пучках в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн с сохранением мультимегаваттного уровня мощности [1-5] является актуальным с точки зрения применения источников такой мощности в ряде развивающихся научных и технических приложений. Повышение частоты генерации связано с ростом магнитного поля, достаточную величину которого в области релятивистских энергий электронов обеспечить труднее из-за релятивистского роста их массы.

Решить проблему можно переходом к работе гиротрона на гармониках циклотронной частоты. Использование, в частности, второй гармоники, взаимодействию с которой свойственны достаточно высокая эффективность и доступность решения проблемы селекции мод, позволяет увеличить частоту генерации вдвое без увеличения индукции магнитного поля [6]. В предыдущем эксперименте [7] с гиротроном на второй циклотронной гармонике с рабочей волной TE<sub>11.2</sub> было получено излучение двухмегаваттного уровня мощности на частоте 55,67 ГГц с КПД 28%. Рост тока в этом генераторе сопровождался падением КПД из-за разброса электронов по скоростям. Наблюдалась также паразитная генерация, от которой, если не повышать ток, удавалось отстраиваться. Следует отметить, что структура рабочей моды TE<sub>11.2</sub> такова, что у стенки резонатора сосредоточено довольно высокое СВЧ поле, поэтому повышению мощности препятствовала угроза возникновения СВЧ пробоя.

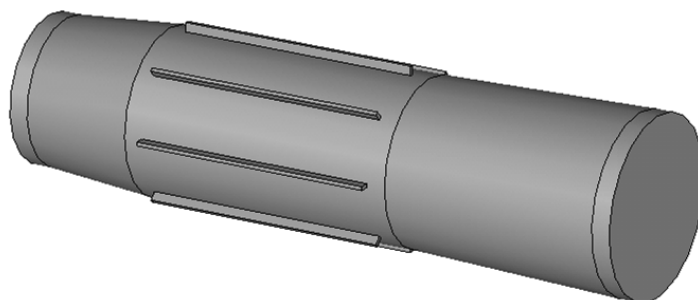
Однако, выбор благоприятной для гиротрона структуры рабочей моды (благоприятной в том отношении, что СВЧ поле в большей степени сосредоточено вблизи электронного пучка и в меньшей степени вблизи стенки резонатора) обычно ограничен тем, что такие моды находятся в окружении паразитных мод, плотность которых с ростом выбранного номера

циклотронной гармонике дополнительно возрастает. Один из методов, позволяющих предотвратить возбуждение некоторых паразитных мод, описан в настоящем докладе.

## **2. Метод селекции с помощью дроссельных канавок**

Суть предлагаемого метода селекции заключается в следующем. Электронный пучок в гиротроне эффективно взаимодействует с СВЧ полем резонатора, представленным в виде одной (находящейся в циклотронном резонансе с пучком и в электромагнитном резонансе в резонаторе) рабочей моды. Резонансные условия выделяют рабочую моду среди прочих, если спектр мод достаточно разрежен. Все эти моды являются поперечно-электрическими, генерируемое СВЧ поле не имеет продольной электрической компоненты, но имеет продольную магнитную, скачок которой на границе резонатора порождает поперечный СВЧ ток, присущий любой моде гиротрона. Поэтому, если в резонаторе прорезать по всей длине достаточно много продольных щелей, можно предотвратить возбуждение любой моды по гиротронному механизму взаимодействия. Малое число щелей позволит возбуждаться таким азимутально неоднородным модам, азимутальные вариации которых укладываются в промежутках между щелями. Возможно также возбуждение таких комбинаций мод, для которых суммарный СВЧ ток на щели равен нулю. Прерывание щелью СВЧ тока приводит к возбуждению СВЧ поля с наружной стороны резонатора, что снижает его добротность.

Электромагнитные свойства резонатора со щелями можно сделать частотно зависимыми, если сквозные щели заменить канавками определенной глубины (дроссельными канавками), прорезанными в толстой стенке 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.



*Рис. 1. Резонатор гиротрона с канавками (изображен вакуумный объем резонатора).  
Конические секции слева и справа – закритическое сужение и волноводный выход.*

Параметры резонатора и глубину канавок можно настроить на рабочую моду, возбуждающуюся на второй или третьей гармонике гирочастоты. При этом паразитные моды на существенно отличающихся частотах других гармоник, включая основную, будут подавляться, что существенно прорежит спектр конкурирующих мод.

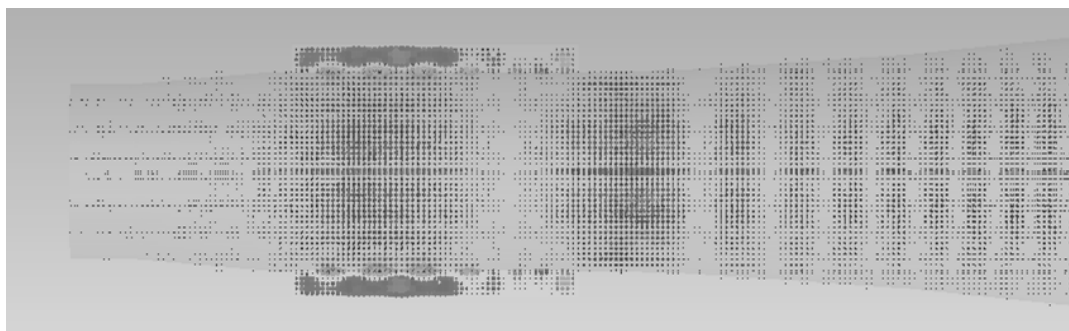
## **3. Проверка влияния канавок**

Первоначально влияние канавок было проверено следующим образом. Было проведено моделирование электродинамических свойств резонатора в отсутствие электронного пучка. Со стороны выхода в сторону резонатора запускалась волна на рабочей моде резонатора и резонансной частоте. Были рассмотрены два случая с различной глубиной канавок: (а) канавки глубиной в полволны на частоте второй гармоники гирочастоты и (б) канавки глубиной в четверть волны (см. рис. 2).

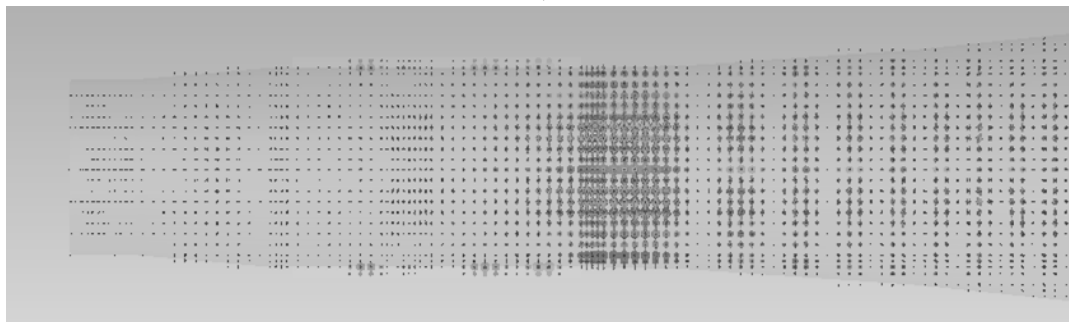
Моделирование продемонстрировало для случая полуволновых канавок (см. рис. 2,а) отсутствие разрыва СВЧ тока на стыке канавки с резонатором: излучение естественным образом накапливалось в резонаторе, полуволновая вариация поля полностью занимала

канавку. Напротив, четвертьволновая канавка демонстрировала разрыв СВЧ тока, что выразалось в отсутствии существенного СВЧ поля внутри резонатора и отражении волны (имеющей ту же частоту, что и в случае полуволновых канавок) от выходного конуса резонатора (см. рис. 2,б).

Таким образом, было продемонстрировано, что канавки с глубиной, отличающейся от полволны излучения, препятствуют накоплению излучения в резонаторе, что означает подавление соответствующей генерации в гиротроне.



а)



б)

*Рис. 2. Картина СВЧ поля при подаче внешней волны на рабочей моде и резонансной частоте справа в сторону резонатора гиротрона: а) – канавки глубиной в полволны; б) канавки глубиной в четверть волны.*

#### **4. Результаты численного моделирования генерации в гиротроне**

Для проверки предложенного метода селекции моделированием по методу крупных частиц был взят резонатор с профилем, близким к [1], где в гиротроне на релятивистском электронном пучке на второй циклотронной гармонике с рабочей волной ТЕ3.7 было получено излучение мегаваттного уровня мощности на частоте 50,4 ГГц с КПД 15%. В этом приборе был специально выбран режим пучка с настолько большим током (45 А при напряжении 255 кВ), что, согласно расчету стартовых токов (см. рис. 3), должно наблюдаться одновременное выполнение стартовых условий для мод ТЕ4.3 и ТЕ6.2 на основной циклотронной гармонике и мод ТЕ3.7, ТЕ1.8 и ТЕ8.5 на второй циклотронной гармонике. Продольные канавки в резонаторе глубиной 2.5 мм (в половину длины волны излучения на второй гармонике) должны были предотвратить возбуждение мод ТЕ4.3 и ТЕ6.2.

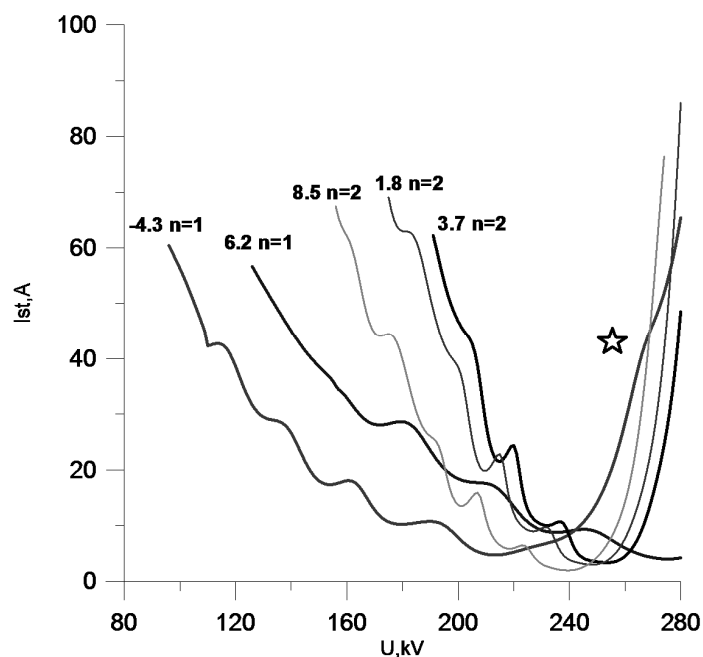


Рис. 3. Стартовые токи мод в зависимости от напряжения. Звездочка отмечает режим, в котором моделировалась работа гиротрона с селекцией с помощью дроссельных канавок.

Моделирование генерации в гиротроне методом крупных частиц подтвердило, что применение продольных дроссельных канавок полностью подавляет возбуждение мод на основной циклотронной гармонике. Получено селективное возбуждение рабочей моды TE3.7 при подавлении конкурирующих мод TE8.5 и TE1.8, по-видимому, благодаря выбранному магнитному полю.

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-02-00745.

Работа также поддержана в рамках выполнения государственного задания ИПФ РАН на проведение научных исследований по теме №0035-2014-0012 и Программы фундаментальных исследований президиума РАН «Мощные ультракороткие электромагнитные импульсы, а также их взаимодействие с объектами и средами».

#### Литература

1. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Калынов Ю.К. и др. // «Вакуумная наука и техника». Материалы XXIII научно-технической конференции. Под ред. С.Б. Нестерова. М.: Новелла. 2016. С.29-33.
2. Зайцев Н.И., Гинзбург Н.С., Завольский Н. А. и др. // Письма в ЖТФ, 2001, т.27, № 7, с.8-12.
3. Зайцев Н.И., Завольский Н.А., Запечалов В.Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 2003. Т.46. №10. С.914-918.
4. Абубакиров ЭБ., Гузнов Ю.М., Денисов Г.Г и др.// Изв. вузов. «ПНД», 2015. Т.23. №2. С.94-107.
5. Bratman V.L., Botvinik I.E., Grom Yu.D., et al. // Proc. SPIE of 16th Int. Symposium on discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Moscow - St. Petersburg, Russia, 1994, pp. 538-541.
6. «Гиротрон». Сборник научных трудов. Горький: ИПФ АН СССР, 1981.
7. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Калынов Ю.К. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 2018. Т.61, №1. С.44-52.