

# Исследование двухчастотного мощного технологического гиротрона, оптимизированного для работы на двух частотах 18/30 ГГц для плазменных приложений

А.А. Ананичев, М.В. Каменский, А.Г. Лучинин, М.В. Морозкин, М.Д. Проявин

Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** исследована возможность работы технологического гиротрона в режимах с частотами 18 ГГц на основном циклотронном резонансе и 30 ГГц на второй гармонике гирочастоты. Была решена задача возбуждения двух мод с отличающимися практически вдвое частотами с высоким КПД, а также найдены оптимальные режимы работы электронно-оптической системы для обоих случаев. Решена проблема вывода электромагнитного излучения из вакуумного объема при большой разнице в длинах волн рабочих типов колебаний. В ходе исследований были получены экспериментальные мощностные характеристики. На обеих частотах была достигнута мощность более 9 кВт с КПД более 33%.

**Ключевые слова:** гиротрон, двухчастотный, выходное окно, гармоника

## 1. Введение

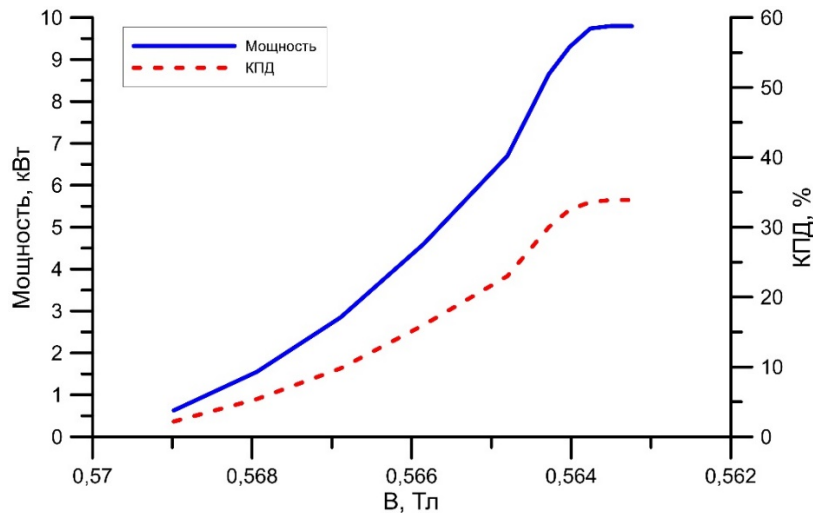
Гиротрон [1,2] – один из наиболее перспективных источников мощного электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн. Спектр приложений гиротрона довольно широк: создание источников ионов [3], локальный нагрев плазмы для управляемого термоядерного синтеза [4], исследования в области спектроскопии, диагностика различных [5] и т. д.

В ряде приложений, в том числе электронно-циклотронном нагреве плазмы и спектроскопии, возникает необходимость в сильном изменении частоты излучения. Так как использование нескольких гиротронных комплексов требует больших временных и финансовых затрат, целесообразно использовать один гиротрон, способный работать на разных частотах с достаточно высоким КПД.

В данной работе проведены исследования технологического гиротрона, работающего на режимах с частотами 30 ГГц (мода  $TE_{02}$ ,  $n=2$ ) и 18 ГГц (мода  $TE_{31}$ ,  $n=1$ ).

## 2. Режим 30 ГГц

Изначально данный технологический гиротрон был оптимизирован для генерации излучения на частоте 30 ГГц с модой  $TE_{02}$  на второй циклотронной гармонике. При длине резонатора 100 мм, оптимальный радиус ведущих центров электронов в резонаторе составила  $R_b=4.78$  мм. В ходе экспериментов были получены зависимости мощности излучения и КПД от магнитного поля основного соленоида (рис. 1). При токе пучка 1,4 А и напряжении 20 кВ была получена мощность 9,8 кВт при КПД 34%.



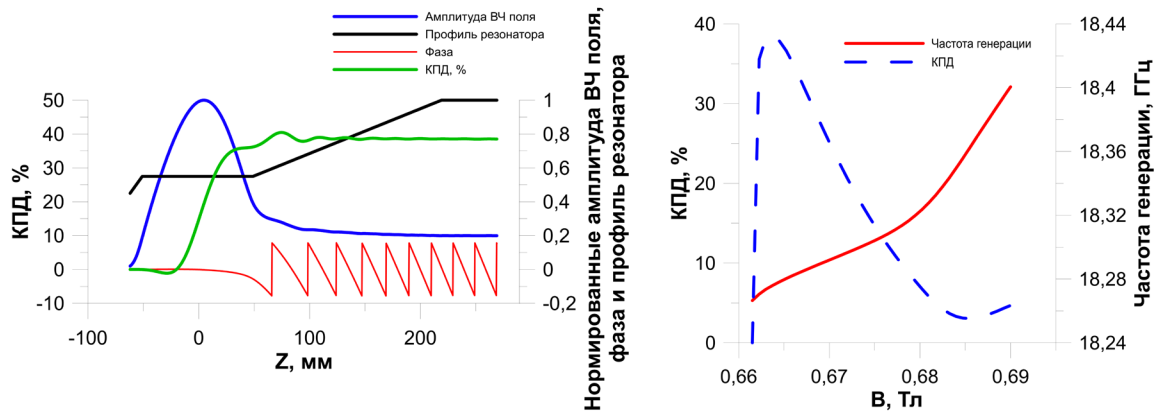
**Рисунок 1.** Зависимость мощности излучения и КПД гиротрона от магнитного поля соленоида на частоте 30 ГГц, токе пучка 1,45 А и напряжении 20 кВ.

### 3. Режим 18 ГГц

Задача оптимизации работы гиротрона на двух существенно отличающихся по частоте, режимах генерации осложняется сразу несколькими факторами. Во-первых, КПД генерации сильно зависит от длины области электронного взаимодействия, которая, как правило, составляет несколько длин волн рабочего типа колебаний. Однако, для второй гармоники гирочастоты оптимальная длина составляет около  $10\lambda$ , когда для основного циклотронного резонанса – около  $6\lambda$ . Во-вторых, для возбуждения рабочей моды рассчитывается определенный радиус винтового электронного пучка в резонаторе. В то же время, частота генерации напрямую зависит от частоты циклотронного вращения электронов и, следовательно, от величины магнитного поля. В данном случае, исходя из перечисленных проблем, очевидным является осуществление режима генерации на основном циклотронном резонансе с частотой 18 ГГц, так как это практически вдвое меньше, чем в исходном режиме. Такой переход требует увеличения магнитного поля на 20%, что некритично увеличивает энергопотребление соленоида на 40% (с 10 кВт до 14 кВт). Однако, в этом случае оптимальная длина резонатора практически не меняется, соответственно появляется возможность использовать тот же самый резонатор и соленоид.

Сложность дальнейшей оптимизации состоит в том, чтобы выбрать изначально правильный радиус резонатора для обоих случаев генерации, в которых будут существовать собственные моды с требуемыми частотами. При этом радиусы ведущих центров электронов в резонаторе должны быть близки. Иначе будет невозможно реализовать в классических магнетронно-инжекторных пушках режимы с существенно разным коэффициентом перемагничивания и, соответственно, с разными радиусами электронных орбит в области электронно-волнового взаимодействия. Все это учитывалось в процессе разработки двухчастотного гиротрона, поэтому в процессе оптимизации рабочих параметров для реализации режима генерации с частотой 18 ГГц была предложена мода  $TE_{31}$ . При этом, оптимальный радиус ведущих центров электронов составил  $R_b=5.5$  мм. Для достижения такого значения в процессе эксперимента было необходимо уменьшить магнитное поле в области старта электронов. Этого легко добиться с помощью катодной катушки, а также перемещением катодной области в меньшее магнитное поле основного соленоида. При этом немного сократилась длина однородного участка, что также должно положительно сказаться на КПД генерации. В программе ANGEL был проведен

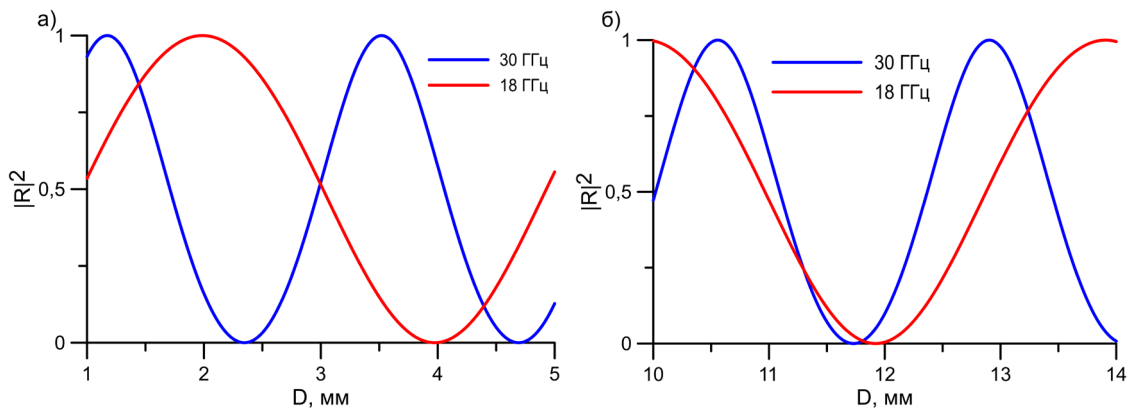
детальный расчет электронно-оптической системы и области электронно-волнового взаимодействия (рис. 2), получены теоретические зависимости параметров гиротрона от величины магнитного поля и длины резонатора. Полученные результаты демонстрируют возможность успешной реализации данного режима гиротрона.



**Рисунок 2.** Зависимость мощности излучения и КПД гиротрона от магнитного поля соленоида на частоте 30 ГГц, токе пучка 1,45 А и напряжении 20 кВ.

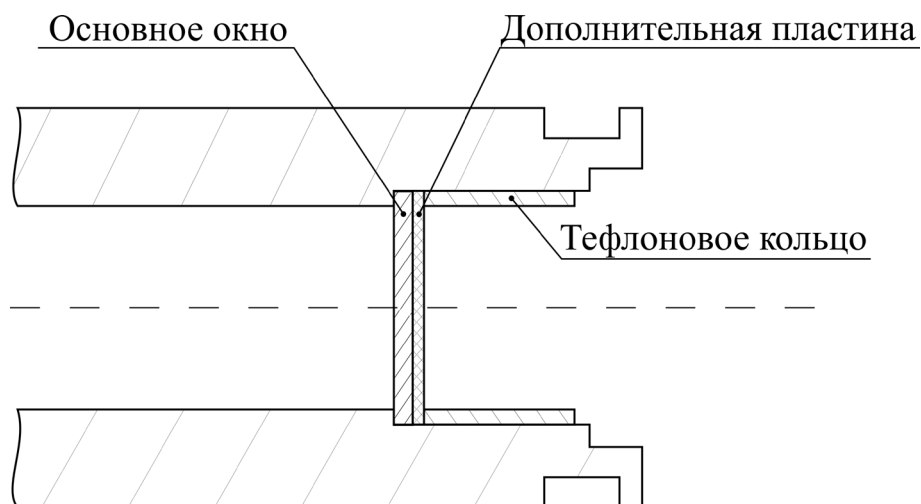
Задача экспериментальной верификации двух режимов работы осложняется тем, что в связи с большой разницей длин волн на частотах 18 и 30 ГГц возникает задача обеспечения вывода излучения из вакуумного объема с минимизацией коэффициента отражения от выходного окна гиротрона для обоих режимов. Для решения данной задачи можно было использовать окно Брюстера [6], однако это потребует больших изменений в конструкции. В связи с этим было принято решение изменить толщину окна так, чтобы минимизировать коэффициент отражения на обеих частотах.

Установленное в гиротроне окно толщиной 2,35 мм имеет слишком высокий коэффициент отражения на частоте 18 ГГц, что хорошо видно на рис. 3а. На рисунке 3б показано, что для эффективной работы в обоих режимах необходимо окно толщиной 11,8 мм.



**Рисунок 3.** Зависимости коэффициента отражения излучения от толщины выходного окна гиротрона.

Для экспериментальной проверки режима генерации 18 ГГц было принято решение установить вплотную к основному окну дополнительную пластину из нитрида бора толщиной 1,62 мм, которая увеличила общую толщину системы вывода излучения до 3,97 мм, обеспечивающую минимум отражения на частоте 18 ГГц (см рис. 3а). Для фиксации дополнительной пластины использовалось специальное тефлоновое кольцо (рис. 4).

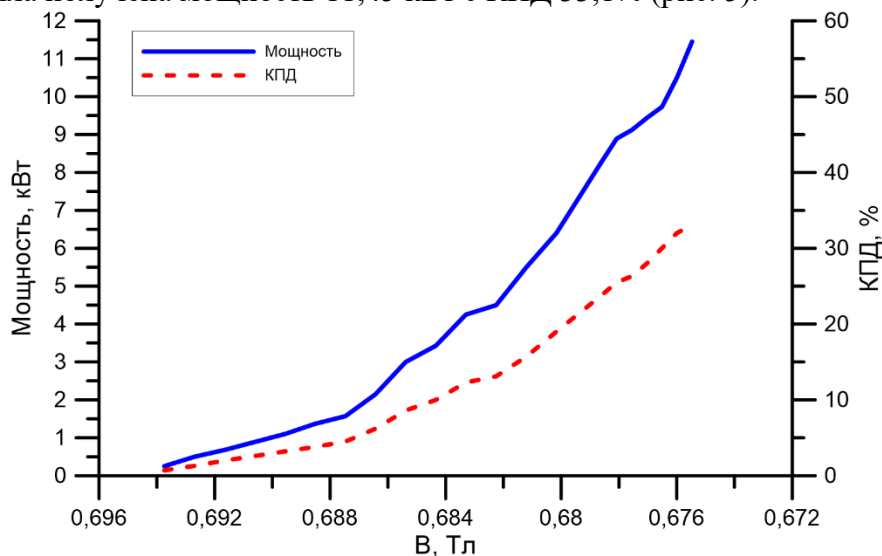


**Рисунок 4.** Схема крепления дополнительной пластины к выходному окну гиротрона.

Экспериментально были получены зависимости мощности излучения и КПД от магнитного поля основного соленоида. Была получена мощность в несколько киловатт при КПД более 30%.

Из-за возможности возникновения стоячей волны в области окна вывода энергии и, соответственно, появления локального перегрева при большой мощности генерации, было принято решение полностью заменить данную систему вывода излучения на цельное окно толщиной 3,97 мм.

После проведенной оптимизации области вывода СВЧ энергии для режима 18 ГГц на основном циклотронном резонансе при токе пучка 1,5 А и ускоряющем напряжении 23 кВ была получена мощность 11,45 кВт с КПД 33,1% (рис. 5).



**Рисунок 5.** График зависимости мощности излучения и КПД от магнитного поля основного соленоида в режиме 18 ГГц на основном циклотронном резонансе.

Оптимальным режимом, при котором нагрузка на катодную катушку была минимальной, был признан режим с током пучка 1 А и ускоряющем напряжении 23 кВ. При работе в данном режиме была получена мощность 9,1 кВт при КПД 38%.

Также в ходе экспериментов подбиралось оптимальное положение лампы относительно основной магнитной системы и значение магнитного поля катодной катушки.

#### 4. Заключение

В ходе данной работы была продемонстрирована способность технологического гиротрона генерировать излучение на частотах 18 ГГц на основном циклотронном резонансе и 30 ГГц на второй гармонике гирочастоты с высокой мощностью и КПД. Проведена оценка возможности работы основного соленоида, системы вывода СВЧ излучения из вакуумного объема и резонатора работать в режиме на основном циклотронном резонансе. Рассчитаны радиусы ведущих электронов. Также было подобрано оптимальное положение лампы относительно основной магнитной системы и значение магнитного поля катодной катушки. Проведен детальный расчет электронно-оптической системы и области электронно-волнового взаимодействия в программе ANGEL.

Исследование выполнено за счет государственного задания ИИФ РАН на проведение научных исследований по теме № 0030-2021-0027.

#### Список литературы

1. Flyagin V.A. et al. The Gyrotron // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1977. Vol. 25, № 6. P. 514–521.
2. Litvak A.G., Denisov G.G., Glyavin M.Y. Russian Gyrotrons: Achievements and Trends // IEEE J. Microwaves. 2021. Vol. 1, № 1. P. 260–268.
3. Skalyga V.A. et al. Status of the gasdynamic ion source for multipurpose operation (GISMO) development at IAP RAS // Rev. Sci. Instrum. 2019. Vol. 90, № 12. P. 123308.
4. Thumm M.K.A. et al. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // Nucl. Fusion. 2019. Vol. 59, № 7. P. 073001.
5. Fokin A.P., Savilov A. V. Frequency Tuning in the Gyrotron Oscillator With a Klystronlike Sectioned Cavity // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. Vol. 62, № 10. P. 3393–3398.
6. Denisov G.G. et al. Multi-Frequency Gyrotron with BN Brewster Window // 2006 Joint 31st International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics. IEEE, 2006. P. 75.