

04;09;12

Реакция гиротрона на слабое отражение волн от плазмы, промодулированное низкочастотными колебаниями

© Г.М. Батанов,¹ Л.В. Колик,¹ Ю.В. Новожилова,² М.И. Петелин,²
А.Е. Петров,¹ К.А. Сарксян,¹ Н.Н. Скворцова,¹ Н.К. Харчев¹

¹ Институт общей физики РАН,
117942 Москва, Россия

² Институт прикладной физики РАН,
603600 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 1 июня 2000 г.)

В экспериментах на стеллараторе Л-2М установлены изменение мощности и интенсивная шумовая модуляция мощности гиротрона при шумовой модуляции излучения, отраженного от плазменного шнура. Наблюдаемый эффект объясняется как резонансный захват автоколебаний гиротрона отражением волны от флуктуирующей плазменной нагрузки.

1. Использование квазиоптических систем для транспортировки и фокусировки излучения гиротронов при плазменных экспериментах на магнитных ловушках позволяет обходиться без специальной защиты гиротрона от отраженной волны. Действительно, даже при относительно высоком уровне отражения ($\sim 10\%$) невозможно согласовать фронт отраженной волны с фронтом падающей, вследствие чего неизбежно значительное ослабление отраженной волны, распространяющейся через квазиоптический тракт на вход гиротрона. Именно такой подход доминировал до сих пор в экспериментальных исследованиях, и это казалось вполне оправданным. Однако природа в очередной раз преподнесла нам неожиданный сюрприз. В экспериментах по электронно-циклотронному нагреву плазмы на стеллараторе Л-2М на второй гармонике гирочастоты электронов мы столкнулись с явлением реакции гиротрона при работе на нагрузку в виде сильнопоглощающей гиротропной плазмы. Целью настоящей публикации является описание наблюдаемого эффекта.

2. На стеллараторе Л-2М использован четырехзеркальный квазиоптический тракт для транспортировки и фокусировки излучения от гиротрона на окно внешнего горизонтального патрубка. Расстояние от гиротрона до входного окна около 5 м. Резонансное кварцевое входное окно диаметром 85 мм находится в перетяжке каустики последнего зеркала. Цилиндрическая поверхность задней стенки вакуумной камеры стелларатора вместе с фланцем патрубка, расположенного на внутренней стенке камеры, расфокусируют пучок, так что величина отраженного назад во входной патрубок пучка существенно ослаблена (коэффициент отражения $\sim 0.7\%$). На оси пучка между последним зеркалом и кварцевым окном расположен квазиоптический ответвитель с детекторной головкой для контроля за огибающей мощности гиротрона и отраженным пучком. Такой контроль очень полезен при настройке режима гиротрона, так как огибающая импульса мощности гиротрона весьма чувствительна к небольшим изменениям тока пучка и катодного на-

пряжения гиротрона. На стеллараторе Л-2М используется гиротрон фирмы ГИКОМ с частотой 75 GHz и мощностью до 400 kW. Обычный режим работы гиротрона: мощность 150–250 kW, длительность импульса 10–12 ms, напряжение 60–63 kV, ток пучка 17–20 A. Помимо сигналов падающей и отраженной мощности, регистрировавшихся с помощью квазиоптического ответвителя, через патрубок, расположенный на внутренней стенке вакуумной камеры стелларатора, регистрировался сигнал от излучения, прошедшего через плазменный шнур. Используемые в измерениях детекторные головки снабжены отрезками прямоугольных волноводов, что позволяло регистрировать излучение с заданным направлением электрического поля. Детекторные головки монтировались в цилиндрах из поглощающей резины, чем достигались диафрагмирование и экранировка детекторных головок, а также сужение их диаграммы направленности.

В экспериментах использовалось линейно поляризованная волна с ориентацией вектора электрического поля перпендикулярно магнитной оси стелларатора, лежащей в экваториальной плоскости тороидальной камеры. Отраженная волна, как правило, регистрировалась с той же поляризацией, что и падающая. В отсутствие плазмы прошедшая волна поляризована как падающая. В присутствии плазменного шнура линейно поляризованная падающая волна расщепляется на необыкновенную и обыкновенную волны с эллиптической поляризацией. При гирорезонансе в горячей плазме необыкновенная волна поглощается почти полностью на одном ее проходе через плазменный шнур (коэффициент поглощения не менее 0.9), а обыкновенная волна проходит без ослабления. Прошедший через плазму сигнал является результатом интерференции ослабленной из-за поглощения необыкновенной и неослабленной обыкновенной волн. При плавном изменении в течение разряда электронной концентрации из-за эффекта Фарадея возникает вращение поляризации прошедшего излучения, что регистрируется детекторной головкой как колебания амплитуды сигнала [1].

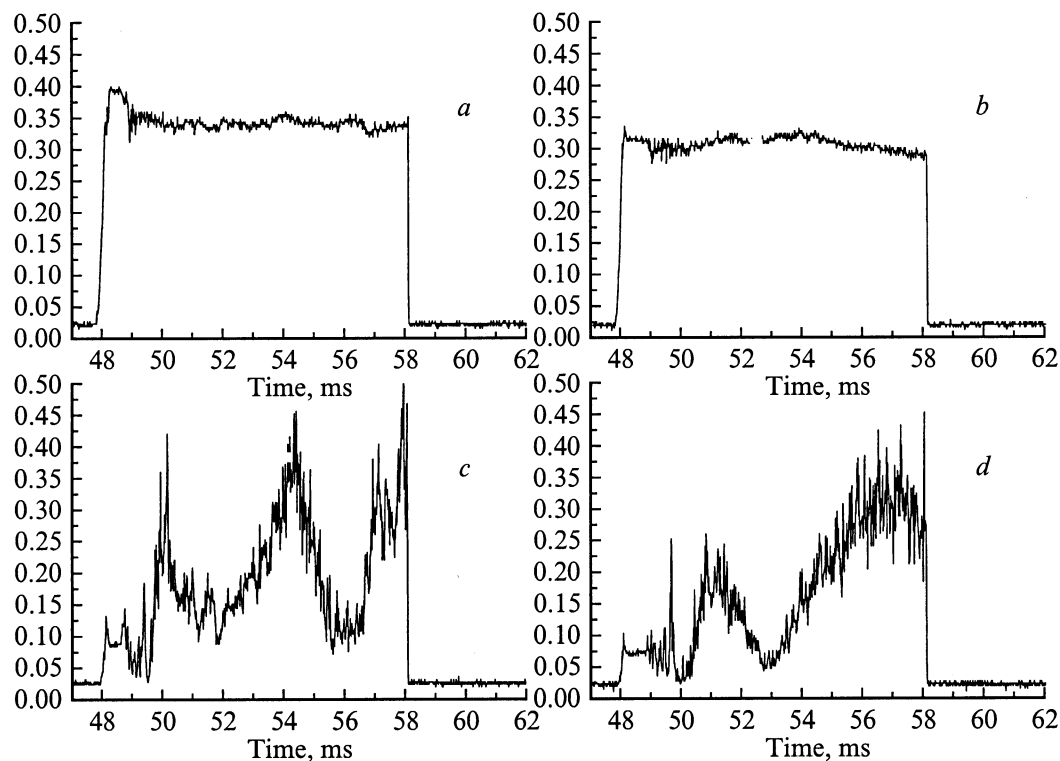


Рис. 1. Сигналы мощности гиротрона (прямой сигнал) (*a, b*) и излучения, прошедшего через плазму (рассеянный сигнал) (*c, d*) для двух разрядов в стеллараторе. Интервал оцифровки $16 \mu\text{s}$.

Сигналы детекторных головок регистрировались с помощью ПК. Время оцифровки изменялось от 0.1 до $16 \mu\text{s}$. Постоянная времени детекторных головок составляла примерно $1 \mu\text{s}$.

3. В отсутствие плазмы сигнал мощности гиротрона представлял собой прямоугольный импульс с фронтом 0.5 ms , спадом $20\text{--}30 \mu\text{s}$ и с гладким плато. Пробой газа и образование плазменного шнура происходят в течение $1\text{--}1.5 \text{ ms}$. В это время сигнал мощности гиротрона остается неизменным (рис. 1). После образования плазменного шнура на плато сигнала падающей мощности возникают шумовые колебания. При этом в зависимости от режима работы гиротрона можно наблюдать либо уменьшение средней по длительности импульса мощности (рис. 1 *a*), либо ее постоянство, либо ее увеличение (рис. 1, *b*).

Более интенсивные колебания регистрируются на проходящем через плазму сигнале (рис. 1, *c, d*). В данном случае детекторная головка была ориентирована так, что регистрировалась составляющая поля, параллельная магнитной оси стелларатора. Слабый прямоугольный всплеск импульса возникает из-за недостаточной юстировки детекторной головки. Широкие пики являются следствием эффекта Фарадея.

Влияние плазмы на возникновение колебаний мощности гиротрона возможно при модуляции коэффициента отражения или спектрального состава отраженного излучения. Действительно, в импульсе отраженного излу-

чения, регистрируемого с квазиоптического ответвителя, наблюдаются интенсивные шумовые колебания (рис. 2). При этом амплитуда модуляции сигнала отраженного излучения существенно выше, чем сигнала мощности гиротрона, и столь же велика, как шумовая модуляция сигнала излучения, прошедшего через плазму (рис. 1, *c, d*). Уже одно то, что амплитуда модуляции сигналов излучения, отраженного от плазмы и прошедшего через плазму, намного больше, чем амплитуда модуляции сигнала мощности гиротрона, говорит о том, что причиной модуляции отраженного и прошедшего излучения является рассеяние излучения на колебаниях в плазменном шнуре. Модуляция сигнала, прошедшего через плазму излучения, возникает как результат рассеяния излучения на флуктуациях плазмы на малые углы и интерференции рассеянной и прошедшей волн (метод малоуглового рассеяния в варианте метода фазового контраста [2]). Модуляция отраженного сигнала может возникнуть либо как результат прямого рассеяния назад падающей волны на флуктуациях плазмы, либо в результате рассеяния на малые углы излучения, отраженного назад от внутренней стенки камеры стелларатора. Заметим, что во временной эволюции сигнала отраженного излучения видны медленные колебания с ms времени, аналогичные колебаниям сигнала излучения, прошедшего через плазму. Объяснение этим медленным колебаниям амплитуды аналогично объяснению медленных колебаний прошедшего сигнала: мы имеем интерференцию необыкновен-

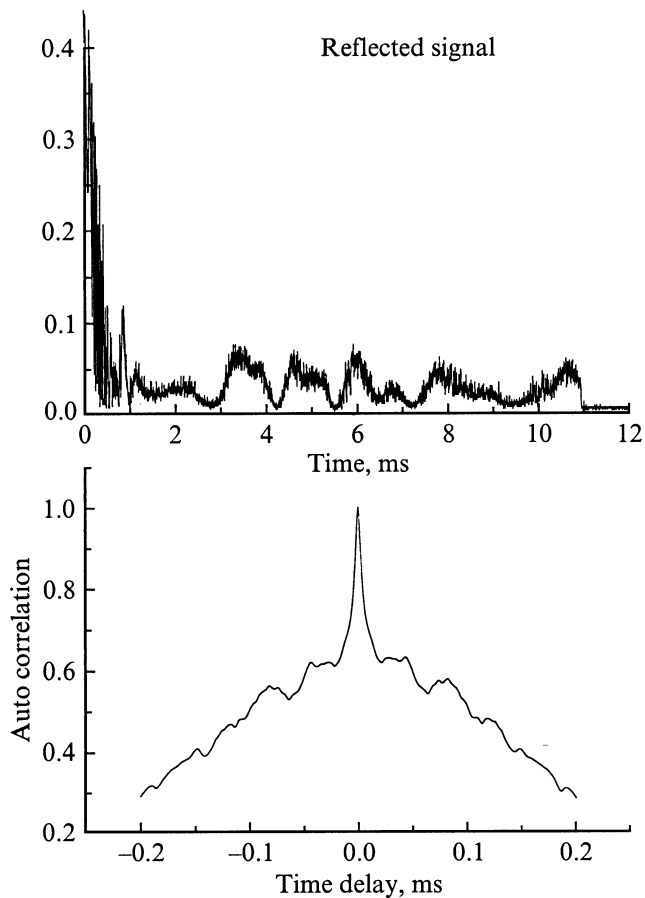


Рис. 2. Сигнал отраженного излучения и его автокорреляционная функция. Интервал оцифровки $0.1 \mu\text{s}$. Усреднение по четырем интервалам времени: от 3 до 4 ms, от 4.5 до 5.5 ms, от 7.5 до 8.5 ms и от 9.8 до 10.8 ms.

ной и обыкновенной волн, отраженных от плазмы и внутренней стенки камеры и прошедших через гиротропный плазменный шнур.

Отметим также, что при возникновении плазменного шнура, как это видно из рис. 2, происходит падение амплитуды отраженного сигнала почти на порядок величины (коэффициент отражения падает до 0.1%).

4. Для изучения влияния на мощность гиротрона амплитуды и фазы отраженной волны были выполнены контрольные измерения при отсутствии разряда в стеллараторе. Для этой цели в каустике пучка гиротрона перед окном стелларатора помещалась тонкая слюдяная пластинка толщиной $110 \mu\text{m}$, плоскость которой была перпендикулярна оси микроволнового пучка. От импульса к импульсу пластинка плавно перемещалась вдоль оси пучка, что позволяло менять амплитуду и фазу отраженной волны в результате интерференции волн, отраженных от стелларатора и пластинки. Изменение фазы составляло 0.688π . При этом коэффициент отражения менялся от минимального значения, равного 1.4–6.5%. Изменений мощности гиротрона при таком изменении амплитуды и фазы отраженной волны зарегистрировано

не было. Данные измерения позволили определить раздельно коэффициент отражения от камеры стелларатора и слюдяной пластинки. Первый оказался равным 0.67%, второй — 4%. Таким образом, ни изменение стационарного коэффициента отражения от 1.4 до 6.5%, ни изменение стационарной фазы отраженной волны в диапазоне 0.688π не влияют на мощность гиротрона, тогда как шумовые колебания коэффициента отражения, величина которого порядка 0.1%, вызывают модуляцию мощности гиротрона и изменение ее средней величины до 10% и более.

Взаимосвязь шумов плазменного шнура и гиротрона изучалась с помощью численного расчета автокорреляционных функций излучения гиротрона (прямого сигнала) и сигналов рассеянного и отраженного излучения. Расчет автокорреляционных функций на ПК выполнялся по программе Б. Ван Миллигена [3] с использованием числового фильтра с полосой 1 kHz и ослаблением 6 dB на октаву. Это позволяло устранить постоянную составляющую сигнала и его медленные изменения, связанные с интерференцией волн различной поляризации. На рис. 3 и 4 приведены сигналы излучения гиротрона и их автокорреляционные функции при усреднении по длительности 4 ms и интервале оцифровки $2 \mu\text{s}$. Задержка возникновения шумов на сигнале на рис. 4 вызвана задержкой пробоя газа и момента образования плазмы из-за смещения гирорезонанса с магнитной оси стелларатора к наружной стенке вакуумной камеры. В обоих случаях для $3/4$ мощности шумов время корреляции составляет около $16 \mu\text{s}$, т.е. частоты шумов лежат выше 30 kHz. Совершенно иная ситуация имеет место для сигнала отраженного излучения. Как видно из рис. 2, только $1/3$ мощности шумов имеет время корреляции $16 \mu\text{s}$ и не менее $1/2$ мощности шумов лежит в более низкочастотной области. Еще более сильные различия наблюдаются в спектральном составе рассеянного излучения и излучения гиротрона. На рис. 5 приведен вид сигналов рассеянного излучения и излучения гиротрона, полученных одновременно в одном разряде, а на рис. 6 приведен вид автокорреляционных функций этих сигналов. Как следует из кривых рис. 6, в области коротких времен корреляции (до $16 \mu\text{s}$) сосредоточено не более $1/4$ мощности шумов рассеянного излучения, тогда как здесь сосредоточено $3/4$ мощности шумов гиротрона.

Таким образом, помимо существенного превышения амплитуды шумовой модуляции рассеянного и отраженного излучения над амплитудой модуляции излучения гиротрона мы имеем и различие их спектрального состава, а именно преобладания низких частот в спектрах рассеянного и отраженного излучений.

5. Влияние отражения от плазмы на спектр гиротрона легко описать в рамках теории автогенератора, находящегося под воздействием внешнего квазирезонансного сигнала.¹ Напомним [5,4], что фаза автогенератора

¹ Эквивалентный подход может быть построен на сведении эффекта отражения от флуктуирующей плазмы к модуляции собственной частоты и добротности резонатора [1].

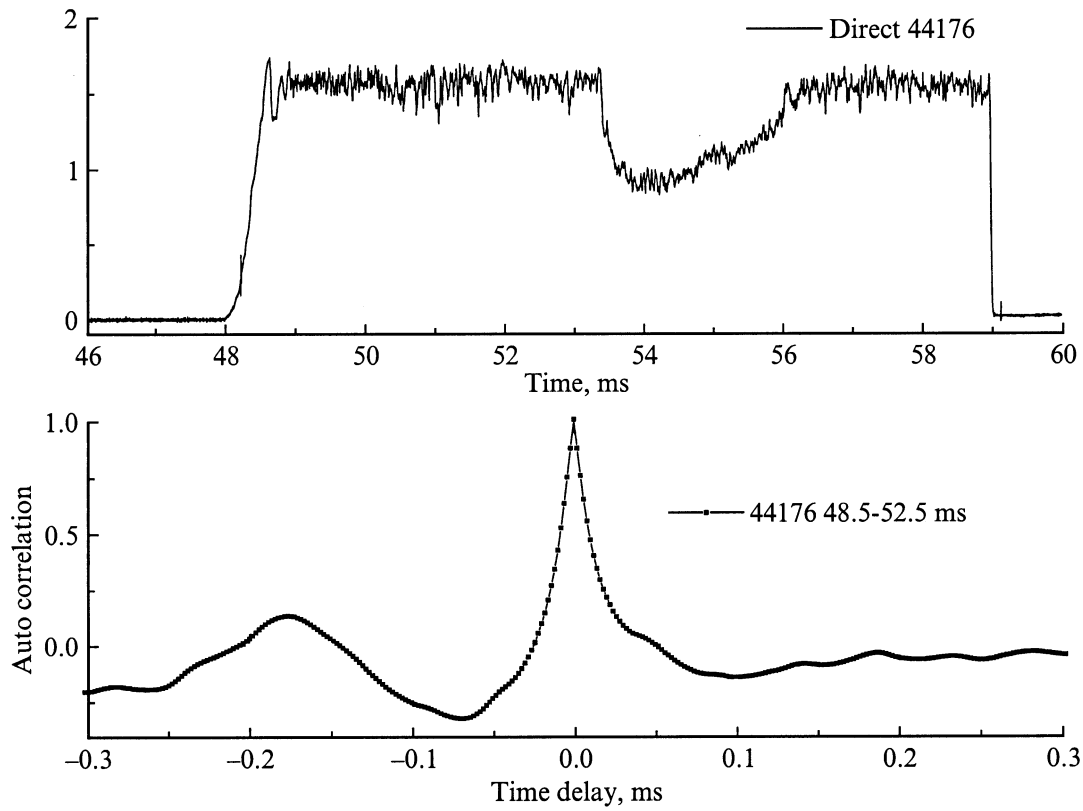


Рис. 3. Сигнал мощности гиротрона и его автокорреляционная функция. Гирорезонанс на магнитной оси стелларатора.

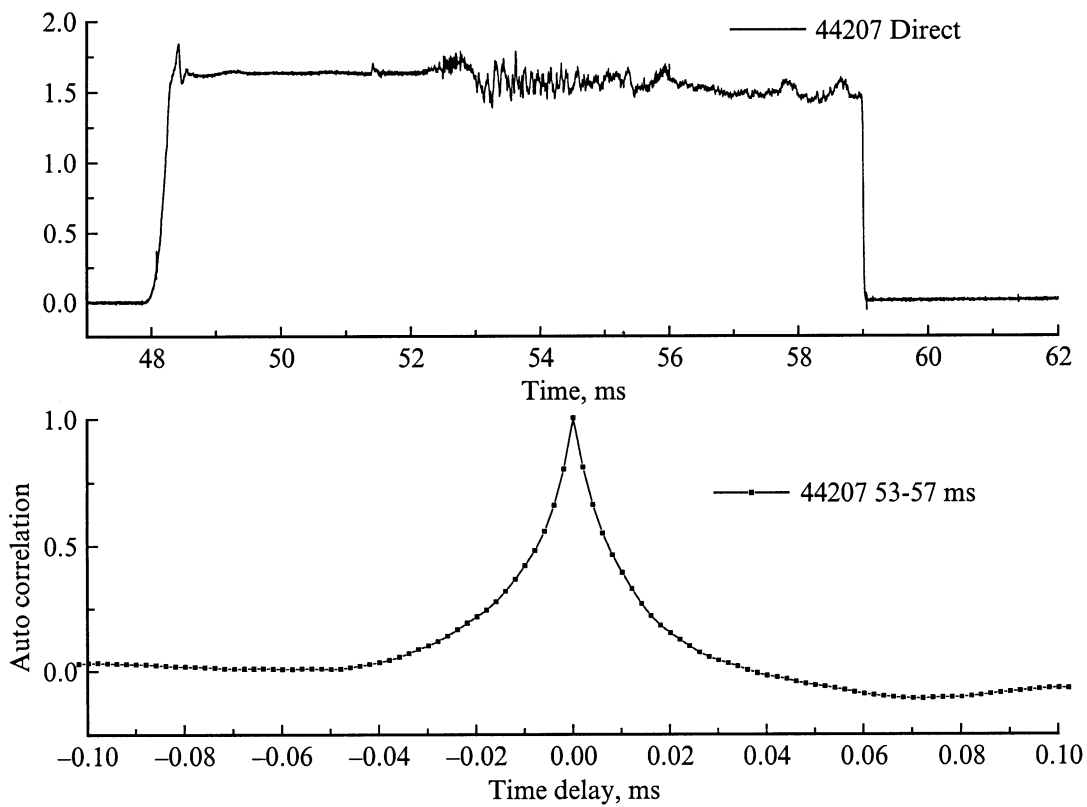


Рис. 4. Сигнал мощности и его автокорреляционная функция. Гирорезонанс смещен от магнитной оси к внешней стенке камеры.

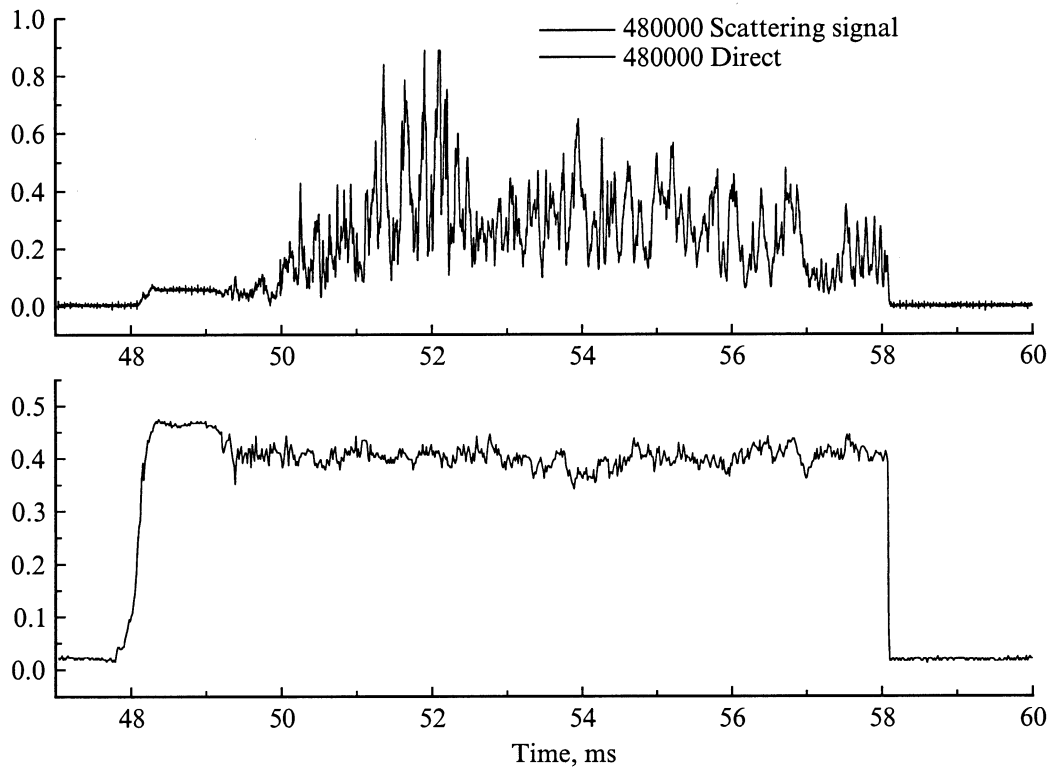


Рис. 5. Сигналы мощности гиротрона (интервал оцифровки $16 \mu\text{s}$) и рассеянного излучения (интервал оцифровки $1 \mu\text{s}$) одновременно для одного разряда.

может быть захвачена сколь угодно слабым сигналом, если его частота принадлежит узкой полосе, пропорциональной амплитуде этого сигнала. Если же частота управляющего сигнала расположена вне полосы захвата, то вызванные этим сигналом дополнительные колебания автогенератора просто накладываются на свободные (не синхронизованные) автоколебания. Относительно слабый отклик автогенератора на "внезахватный" сигнал является резонансным в полосе порядка прочности предельного цикла $p \sim \omega/Q$, где Q — добротность резонатора.

В роли квазирезонансного управляющего сигнала могут выступать поля, порожденные рассеянием первичного автогенераторного поля на флуктуациях параметров автогенератора (включая его нагрузку). Каждая спектральная компонента первичного автогенераторного поля, рассеиваясь на широкополосных флуктуациях, порождает широкополосный вторичный "управляющий" сигнал; как следует из вышеизложенного, на автогенератор оказывает воздействие лишь низкочастотная часть "управляющего" спектра, расположенная в полосе порядка p .

Соответственно спектр автогенератора со слабо флуктуирующими параметрами представляет собой относительно узкий первичный пик, возвышающийся над относительно широким вторичным пьедесталом (рис. 7): ширина первичного пика, обусловленная резонансным захватом фазы автогенератора самыми низкочастотны-

ми флуктуациями его параметров, пропорциональна их амплитуде, а "внезахватный" пьедестал, обусловленный низкочастотными флуктуациями в большей полосе, имеет ширину порядка p .

В описываемом здесь эксперименте "внезахватный" пьедестал был очень низок и регистрировался только первичный автоколебательный пик. "Захватное" уширение этого пика, очевидно, имеет место при работе гиротрона даже на идеально согласованный выходной тракт (рис. 7), при этом в роли "управляющего сигнала"

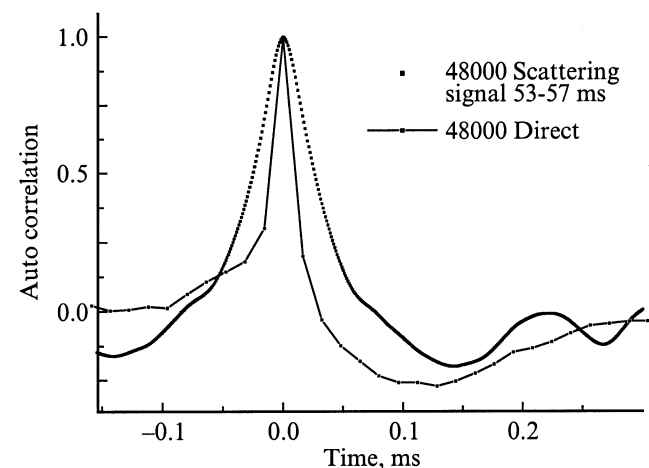


Рис. 6. Автокорреляционные функции сигналов рис 5.

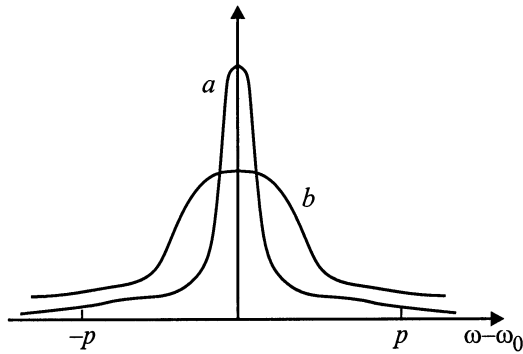


Рис. 7. Спектры автогенератора с согласованным выходом (*a*) и с частично отражающей флуктуирующей нагрузкой (*b*), ω_0 — частота генератора с идеально стабильными параметрами.

ла” выступают возмущения, обусловленные рассеянием автоколебательного поля на низкочастотных флуктуациях параметров самого генератора. Осуществленное в данном эксперименте отражение волны от слюдяной пластинки, параметры которой, очевидно, стационарны, не приводит к появлению дополнительных составляющих в ”управляющем” флуктуационном спектре и может лишь немного сместить центральную частоту автоколебаний гиротрона. Однако такое же по величине малое отражение от плазмы порождает ”управляющие” флуктуации гораздо большей амплитуды, чем возникающие непосредственно в рабочем пространстве гиротрона, и соответственно приводит к гораздо большему уширению автоколебательного пика в спектре выходного излучения (рис. 7).

6. Подводя итоги изложенному, можно сделать следующее заключение.

Экспериментально установлено изменение мощности гиротрона и ее модуляция шумами плазмы при низких коэффициентах отражения (~ 0.001) излучения гиротрона от плазменного шнура. Наблюдаемый эффект может быть объяснен резонансным захватом автоколебаний гиротрона волнами, возникшими в результате рассеяния излучения гиротрона на турбулентных пульсациях плазмы и транспортированными через квазиоптический тракт на вход гиротрона.

Показано отсутствие влияния на мощность гиротрона изменения коэффициента отражения стационарной нагрузки от 0.014 до 0.065 и фазы отраженной волны на 0.68π .

Продемонстрировано, что амплитуда модуляции шумами рассеянного на малые углы и отраженного назад излучения в несколько раз превышает модуляцию мощности гиротрона, а в спектрах рассеянного и отраженного излучения преобладают низкие частоты по сравнению со спектром шумов гиротрона.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 00-02-17507).

Список литературы

- [1] Суворов Е.В., Фрайман А.А. // Физика плазмы. 1980. Т. 6. Вып. 5. С. 1161–1166.
- [2] Жуковский А.Г. Флуктуации плотности плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1993. 270 с.
- [3] Van Milligen B., Sanchez E. et al. // Plasma Phys. 1996. N 2. P. 3017.
- [4] Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука, 1968.
- [5] Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. § 16.1.