

01;09;10;12

Кооперация бегущей и квазикритической волн в мазере на циклотронном резонансе

© В.Л. Братман, Н.Г. Колганов, А.В. Савилов, С.В. Самсонов, А.Э. Федотов

Институт прикладной физики РАН,
603600 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 13 сентября 2000 г.)

Теоретически и экспериментально исследована новая разновидность мазера на циклотронном резонансе, в которой пространственно-периодический винтовой электронный пучок связывает между собой бегущую (авторезонансную) и квазикритическую (гиротронную) волны с одинаковыми частотами, взаимодействуя с ними на разных циклотронных гармониках. Согласно теории и результатам первых экспериментов, эта схема может обеспечить возбуждение бегущей волны с высоким КПД при использовании очень простой системы обратной связи и малых потерях на возбуждение квазикритической волны.

Введение

Хорошо известно [1–5], что при релятивистских энергиях частиц одной из наиболее привлекательных разновидностей мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) является мазер на циклотронном авторезонансе (МЦАР). В этом приборе электроны, движущиеся по винтовым траекториям в магнитном поле, взаимодействуют с бегущей, попутной частицам волной, и благодаря эффекту Доплера частота излучения, как и в лазерах на свободных электронах, может существенно превышать частоту колебаний (в данном случае частоту циклотронного вращения) электронов. Поэтому в МЦАР могут использоваться более слабые магнитные поля, чем в гиротроне — другой наиболее распространенной разновидности МЦР, где электроны взаимодействуют со стоячей волной (квазикритической модой волновода) на циклотронной частоте или на ее гармонике. Кроме того, достоинством МЦАР является частичная взаимная компенсация в нем двух типов отклонений от резонанса, вызванных соответственно изменениями энергии и поступательной скорости электронов (эффект авторезонанса [6,7]), что позволяет электронам длительное время находиться в резонансе с волной. При высоком качестве электронного пучка, согласно теории [1,2], благодаря этой компенсации может быть получен высокий КПД. Однако в отличие от гиротрона МЦАР не получил пока широкого распространения из-за низкого КПД, полученного в большинстве экспериментов [8–14]. Последнее объясняется сильной чувствительностью этого прибора к скоростному разбросу электронов, а также сильной конкуренцией со стороны паразитных гиротронных колебаний, как правило, подавляющих взаимодействие с авторезонансными модами.

МЦАР с высоким КПД (26%), близким к теоретическому значению для идеального электронного пучка, был реализован в единственном эксперименте [15]. Последующий анализ [16] показал, что в этом эксперименте наряду с ожидаемым режимом наблюдался также режим, в котором одновременно с бегущей (авторезонансной)

модой, находящейся в условиях основного циклотронного резонанса с электронами, возбуждалась на той же частоте также и квазикритическая (гиротронная) мода на второй циклотронной гармонике. При этом гиротронная мода не только не мешала, но даже и заметно помогала генерации авторезонансной моды. Важно отметить, что такая интерпретация результатов эксперимента не являлась очевидной, так как в [15] гиротронная мода была заперта внутри резонатора и на выходе наблюдалось лишь излучение авторезонансной моды. Тем не менее частота излучения и в значительной степени высокое значение КПД, по-видимому, определялись именно гиротронной модой. Подчеркнем также, что такое взаимодействие (кооперация) мод возможно лишь при использовании синфазного электронного пучка, в котором в отличие, например, от пучков слабoreлятивистских гиротронов все частицы имеют близкие фазы циклотронного вращения. Как стало ясно после соответствующих расчетов [16], режим кооперации обладает рядом привлекательных особенностей, позволяющих существенно упростить реализацию обратной связи и поднять КПД. Данная работа посвящена теоретическому анализу режима совместной генерации авторезонансной и гиротронной мод, а также изложению результатов специально поставленных экспериментов по реализации основанного на этом принципе прибора (МЦАР-гиротрона).

Интерпретация результатов эксперимента [15]

В эксперименте [15] для получения плотного электронного пучка использовалась взрывоэмиссионная диодная пушка, помещенная в сильное магнитное поле (рис. 1). Из полного диодного тока, составляющего 3–5 кА, с помощью цилиндрического анодного селектора частиц выделялась центральная, наиболее прямолинейная часть пучка с током 100 А и энергией частиц 500 keV. Затем пучок раскачивался (приобретая поперечную скорость) в поперечном неадиабатическом магнитном поле

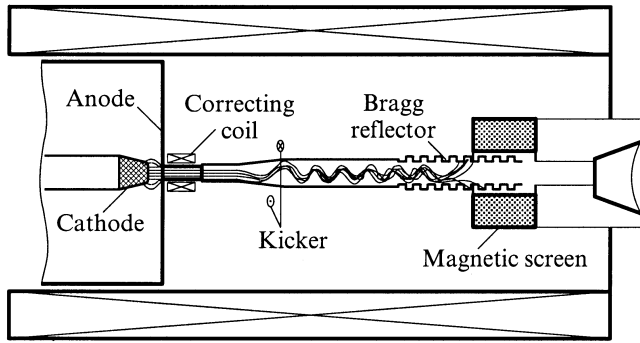


Рис. 1. Схема экспериментального исследования МЦАР с высоким КПД [14].

кикера — короткой катушки с током, наклоненной к оси системы и создающей наряду с продольной также и поперечную компоненту магнитного поля. В резонаторе раскачанный электронный пучок взаимодействовал с бегущей волной TE_{11} в условиях циклотронного резонанса на первой гармонике:

$$\omega \approx h\nu_{\parallel} + \omega_B. \quad (1)$$

Здесь ω и h — частота и продольное волновое число волны TE_{11} , ν_{\parallel} , $\omega_B = eB/mc\gamma$ и $\gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ — продольная скорость, циклотронная частота и Лоренц-фактор электронов. Резонатор представлял собой отрезок круглого волновода, ограниченный с катодного конца закритическим сужением, а с коллекторного конца — брэгговским отражателем. Благодаря улучшенной системе формирования электронного пучка, обеспечивающей малый скоростной разброс частиц, в [15] был достигнут высокий КПД (до 26%). Однако некоторые результаты эксперимента не получили убедительного объяснения в [15]. Так, в режиме максимального КПД частота излучения находилась вне полосы отражения брэгговского рефлектора, что вызывало серьезные сомнения в возможности реализации обратной связи для рабочей волны, хотя структура выходного излучения достаточно точно совпадала со структурой моды TE_{11} . В [15] было предположено, что отличие частоты генерации от частоты "холодного" резонатора могло быть вызвано изменением частоты брэгговского рефлектора в присутствии сильно-точного электронного пучка, однако это объяснение не подтвердилось последующими детальными расчетами.

В работе [16] было предложено другое возможное объяснение того факта, что частота излучения могла находиться вне полосы отражения брэгговского рефлектора, а поперечная структура выходного излучения тем не менее сохранялась. Это объяснение базировалось на очевидной из эксперимента близости частоты генерации к критической частоте моды TE_{21} , для которой было выполнено условие циклотронного резонанса на второй гармонике (рис. 2)

$$\omega \approx 2\omega_B. \quad (2)$$

Таким образом, электронный пучок мог в принципе взаимодействовать на одной и той же частоте как с бегущей волной TE_{11} в режиме авторезонанса, так и с квазикритической волной TE_{21} в режиме гиротрона на второй циклотронной гармонике. Менее тривиальным является высказанное в [16] предположение о совместной генерации указанных мод, поскольку такое взаимодействие возможно лишь для неперемешанного по фазам циклотронного вращения электронного пучка. Последнее предположение согласуется со способом формирования электронного пучка, когда кикер располагается в самом резонаторе и электроны действительно вступают во взаимодействие с высокочастотным полем, не успевая перемещаться по фазам, что было также подтверждено непосредственными измерениями разброса частиц по циклотронным фазам в описанном ниже эксперименте. После понимания возможности одновременного возбуждения авторезонансной и гиротронной мод становятся ясными и другие особенности эксперимента, а также роль каждой из волн. Внутри резонатора, по-видимому, возбуждалось сложное колебание, содержащее обе парциальные резонансные волны TE_{11} и TE_{21} . Волна TE_{21} не излучалась из резонатора, потому что внутренний диаметр гофрировки, формирующей брэгговский отражатель, был меньше критического диаметра волновода для этой волны. В результате поперечная структура выходного излучения совпадала со структурой волны TE_{11} , а волна TE_{21} , обеспечивающая эффективную обратную связь, поглощалась стенками резонатора и рассеивалась на электронном пучке в волну TE_{11} той же частоты. Эффективное рассеяние было возможно благодаря синфазности циклотронного вращения частиц, приводящей к пространственной периодичности пучка, которая обеспечивала связь между собой волн с разной пространственной структурой поля. Волна TE_{11} практически без отражений выводила мощность из резонатора.

Следует отметить, что в МЦАР подобная ситуация "двойного" резонанса с бегущей рабочей волной и с квазикритической (или встречной) паразитной волной на одной частоте, но на разных гармониках является достаточно распространенной. Действительно, в экспе-

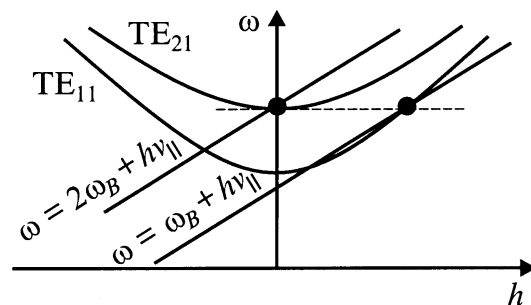


Рис. 2. Дисперсионная диаграмма для одновременного взаимодействия электронов с бегущей волной TE_{11} на основном циклотронном резонансе и со стоячей волной TE_{21} на второй циклотронной гармонике.

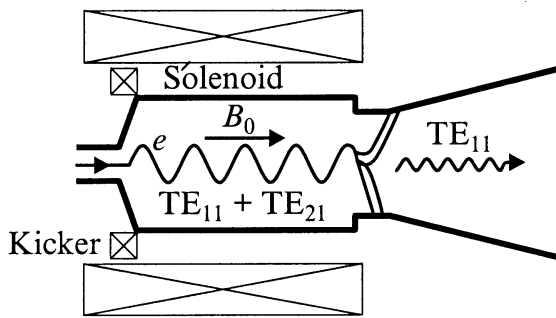


Рис. 3. Простейшая схема генератора с одновременным возбуждением бегущей и стоячей волн (МЦАР-гиротрон).

риментях с МЦАР часто используется режим, близкий к "касанию" дисперсионных характеристик пучка и волны. Поскольку ширина полосы циклотронного резонанса в режиме "касания" достаточно велика, то на какой-либо частоте из этой полосы весьма вероятным является выполнение условия синхронизма с другой модой на более высокой циклотронной гармонике. Отметим также, что влияние паразитного синхронизма со встречной волной в МЦР с рабочей попутной волной теоретически исследовалось также в работе [17] для другой ситуации, а именно для случая слабой связи волн на несинфазном электронном пучке (частицы которого равномерно распределены по начальным фазам циклотронного вращения).

Использование режима одновременного взаимодействия синфазного электронного пучка с авторезонансной и гиротронной волнами позволяет существенно повысить КПД МЦАР. В этом режиме гиротронная волна обеспечивает начальную группировку электронного пучка и обратную связь, а затем возникший сигнал усиливается в системе электронный пучок–бегущая волна. Электродинамическая система такого прибора (МЦАР-гиротрона) может представлять собой простой резонатор гиротронного типа — отрезок волновода, ограниченный с катодного конца сужением, закритическим для гиротронной моды, а с коллекторного конца — другим сужением, не препятствующим выходу из резонатора авторезонансной волны (рис. 3).

Предполагаемая новая схема генератора имеет также общие черты с секционированным многоволновым МЦР [18], в первой секции которого возбуждалась квазикритическая волна частоты ω_1 ; затем во второй секции эта волна рассеивалась в бегущую волну кратной частоты $\omega_2 = n\omega_1$. Согласно [18], теоретический КПД такой системы, основанной на доплеровском умножении частоты: не превышает 10% даже для идеального электронного пучка. Существует также аналогия между МЦАР-гиротроном и новой разновидностью гиролБВ [19,20], в которой связь стоячей и бегущей волн осуществляется не на винтовом электронном пучке, а на винтовой гофрировке стенки рабочего волнового.

Связь бегущей и стоячей волн на пучке синфазных электронов

Пусть в круглом волноводе электроны взаимодействуют одновременно с бегущей волной TE_{11} частоты ω на основном циклотронном резонансе и со стоячей (квазикритической) волной TE_{21} той же частоты на второй циклотронной гармонике (рис. 2). Указанные моды могут эффективно связываться через синфазный электронный пучок, в котором начальные циклотронные фазы φ_0 всех частиц совпадают. Это условие выполнено, например, для тонкого приосевого электронного пучка (все электроны вращаются вокруг оси волновода), который получается при расщеплении прямолинейного пучка в кикере. Такой пучок близок по форме к винтовой линии, совпадающей с траекторией одного электрона в магнитном поле, и обладает продольной (период равен ларморовскому шагу электрона) и азимутальной периодичностью. При выполнении условий резонанса (1) и (2) это позволяет связать между собой уже в линейном приближении моды с разными продольными волновыми числами и разными азимутальными индексами. Связь двух волн на синфазном электронном пучке (и отсутствие такой связи в линейном режиме на перемешанном по фазам пучке) становится более понятной при рассмотрении электронных сгустков, создаваемых каждой из волн. Так, в перемешанном приосевом пучке квазикритическая волна на второй циклотронной гармонике стремится собрать частицы в сгустки в виде двух прямых линий, параллельных магнитному полю и расположенных напротив друг друга на ларморовском цилиндре. Бегущая волна на основном циклотронном резонансе создает в том же пучке сгусток в виде винтовой линии с шагом $L_w = 2\pi/h$ на поверхности того же ларморовского цилиндра (рис. 4, а). Поскольку предельная форма электронных сгустков в

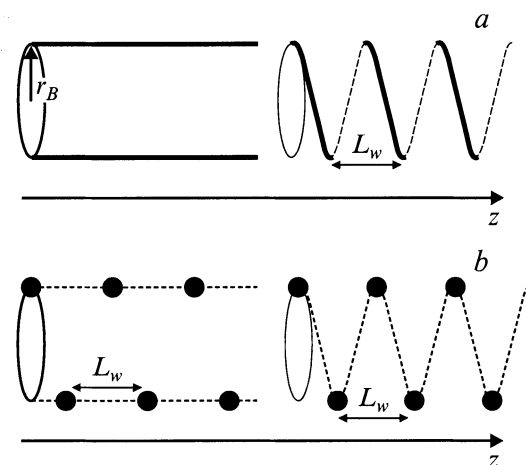


Рис. 4. Форма электронных сгустков, создаваемых в приосевом электронном пучке гиротронной модой на второй циклотронной гармонике (слева) и авторезонансной волной на первой циклотронной гармонике (справа): а — перемешанный по начальным фазам пучок, б — синфазный пучок.

этих двух случаях существенно различна, то связи волн на перемешанном пучке не возникает. В случае же синфазного приосевого пучка электронные сгустки имеют вид периодического набора точек, вырезанных из соответствующих сгустков в перемешанном пучке винтовой траекторией электрона (рис. 4, б). При совпадении резонансных частот мод (1) и (2) электронные сгустки, создаваемые в синфазном пучке обеими модами, имеют одинаковую форму. В результате сгустки, создаваемые одной из мод, эффективно возбуждают другую моду, что и означает наличие эффективной связи мод.

Формально это ясно также из того факта, что начальные фазы электронов относительно обеих мод совпадают. Действительно, фаза электрона относительно бегущей волны $\Theta_1 = \omega t - hz - \varphi$, фаза относительно квазикритической волны $\Theta_2 = \omega t - 2\varphi$. Здесь z и t — продольная координата и время, φ — азимутальный угол. Для идеально тонкого пучка, в котором $\varphi_0 = 0$, начальные фазы электронов относительно обеих волн совпадают: $\Theta_1(0) = \Theta_2(0) = \omega t_0$, где t_0 — время влета электрона в пространство взаимодействия. При одновременном выполнении условий резонанса (1) и (2) примерно равенство фаз частицы относительно двух волн будет сохраняться и в процессе ее движения через пространство взаимодействия. Таким образом, электронный сгусток, возбуждающий одну из мод, будет возбуждать и другую моду, связывая их между собой. Связь между модами уменьшается при увеличении разброса начальных фаз циклотронного вращения электронов в пучке и становится слабой в случае полностью перемешанного по фазам тубчатого приосевого пучка.

Моделирование МЦАР-гиротрона

Взаимодействие электронов с двумя модами может быть описано на основе уравнений, представляющих простое обобщение известных усредненных (по быстрому циклотронному вращению) уравнений МЦР [3]. Для этого удобно представить Лоренц-фактор электронов в виде $\gamma = \gamma_0(1 + w_1 + w_2)$, где величины w_1 и w_2 , описывающие соответственно энергообмен электрона с бегущей (авторезонансной) волной на основном циклотронном резонансе и со стоячей (гиротронной) волной на второй гармонике, удовлетворяют следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{dw_1}{d\zeta} &= -\kappa_1 \text{Im}(a_1 e^{i\Theta_1}), \\ \frac{dw_2}{d\zeta} &= -\kappa_2 \sin(\pi\zeta/\hat{L}) \text{Im}(a_2 e^{i\Theta_2}). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\zeta = kz$ — нормированная продольная координата, $k = \omega/c$, $a_{1,2}$ — нормированные амплитуды волн, $\kappa_1 = p_{\perp}/2p_z$ и $\kappa_2 = p_{\perp}^2/2p_z$ — коэффициенты связи электронов с волнами, $p_{\perp,z} = \gamma v_{\perp,\parallel}/\gamma_0 c$ — нормированные компоненты электронного импульса, \hat{L} — нормированная длина резонатора. Для продольной структуры

поля ”гиротронной” моды здесь принято синусоидальное приближение. Изменение продольного импульса частиц вызвано только бегущей волной и связано с изменением их энергии известным соотношением [6,7]

$$p_z = -\beta_{z_0} = w_1/\beta_{ph}. \quad (4)$$

Здесь $\beta_{ph} = k/h$ и $\beta_{z_0} = v_{\parallel 0}/c$ — фазовая скорость бегущей волны и начальная продольная скорость электронов, нормированные на скорость света. Уравнения для фаз электронов относительно обеих волн имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{d\Theta_1}{d\zeta} &= \frac{-\delta_1 - (1 - \beta_{ph}^{-2})w_1 - w_2}{p_z} - F, \\ \frac{d\Theta_2}{d\zeta} &= \frac{-\delta_2 - w_1 - w_2}{p_z} - 2F. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\delta_1 = 1 - \beta_{z_0}/\beta_{ph} - \omega_{B_0}/\omega$ и $\delta_2 = 1 - 2\omega_{B_0}/\omega$ — расстройки синхронизма между электронами и обеими волнами, ω_{B_0} — начальная циклотронная частота электронов, а величина

$$\begin{aligned} F &= \chi_1 \text{Re}(a_1 e^{i\Theta_1}) \\ &+ \chi_2 \sin(\pi\zeta/\hat{L}) \text{Re}(a_2 e^{i\Theta_2}) + eB_z/mc\gamma_0\omega p_z \end{aligned}$$

в правых частях уравнений (5) ответственна за так называемую ”силовую” группировку электронов. Здесь $\chi_1 = (1/\beta_z - 1/\beta_{ph})/2p_z$, $\chi_2 = 1/2\beta_z$, а B_z — суммарное продольное магнитное поле мод. Начальные условия для уравнений (7) имеют следующий вид:

$$\Theta_1(0) = \omega t_0 - \varphi_0, \quad \Theta_2(0) = \omega t_0 - 2\varphi_0, \quad (6)$$

где начальные циклотронные фазы частиц ω_0 равномерно распределены в интервале $0 \leq \varphi_0 \leq \Delta\varphi_0$ (для идеально синфазного пучка $\Delta\varphi_0 = 0$, для перемешанного пучка $\Delta\varphi_0 = 2\pi$).

Медленное изменение во времени амплитуды гиротронной моды при ее взаимодействии с электронным пучком описывается уравнением

$$\frac{da_2}{d\tau} + \frac{a_2}{2Q_2} = i\frac{G_2}{\hat{L}} \int_0^{\hat{L}} \sin(\pi\zeta/\hat{L}) \langle \chi_2 e^{-i\Theta_2} \rangle_{t_0, \varphi_0} d\zeta, \quad (7)$$

где $\tau = \omega t$, Q_2 — добротность моды, а угловыми скобками обозначено усреднение по начальным параметрам t_0 и φ_0 .

Для бегущей моды отсутствует отражение от границ резонатора и ее возбуждение описывается стационарным уравнением

$$\frac{da_1}{d\zeta} = iG_1 \langle \chi_1 e^{-i\Theta_1} \rangle_{t_0, \varphi_0} \quad (8)$$

с нулевой амплитудой на входе в резонатор

$$a_1(\zeta = 0) = 0. \quad (9)$$

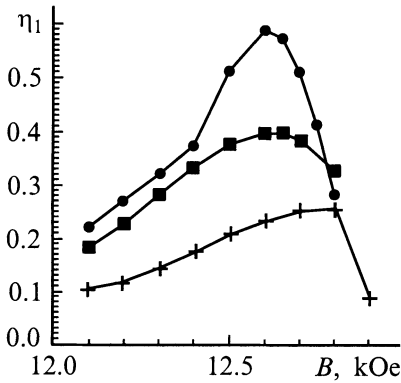


Рис. 5. Зависимость КПД МЦАР-гиротрона от магнитного поля. β_{\perp} : + — 0.57, ■ — 0.60, ● — 0.63.

В уравнениях (7) и (8).

$$G_1 = \frac{2I\beta_{ph}(1 - \beta_{ph}^{-2})}{I_A N_1 \gamma_0}, \quad G_2 = \frac{8I}{I_A N_2 \gamma_0}$$

— факторы возбуждения волн, I — ток пучка, $I_A = mc^3/e$, $N_{1,2}$ — нормы волн.

КПД взаимодействия электронного пучка отдельно с бегущей и квазикритической модами определяются выражениями

$$\eta_{1,2}(\tau) = \frac{-\langle w_{1,2}(\tau) \rangle_{t_0, \varphi_0}}{1 - \gamma_0^{-1}}.$$

В численных расчетах исследовался МЦАР-гиротрон с идеально сфазированным присевым электронным пучком, работающий на модах TE_{11} и TE_{21} цилиндрического резонатора гиротронного типа (рис. 3). Согласно расчетам, при достаточно большой начальной поперечной скорости электронов $\beta_{\perp 0} = v_{\perp 0}/c = 0.60-0.65$ в широком диапазоне параметров (ток пучка, начальные энергии и питч-фактор электронов, добротность гиротронной моды) возможны режимы с высоким (40–60%) КПД энергоотдачи электронов в бегущую волну. Так, на рис. 5 представлена зависимость КПД генератора с энергией частиц 500 keV, током 50 А и добротностью резонатора $Q = 3000$, равной его омической добротности, от величины магнитной индукции при различных поперечных скоростях частиц. При этом КПД энергоотдачи в гиротронную моду менее 1%. При уменьшении добротности резонатора энергия, отдаваемая электронами в гиротронную моду, растет, но остается много меньше энергии, отдаваемой в бегущую волну.

Разброс начальных циклотронных фаз частиц в пучке приводит к уменьшению КПД МЦАР-гиротрона (рис. 6). Тем не менее для не слишком сильно перемешанного пучка ($\Delta\varphi_0 < \pi/2$) чувствительность прибора к разбросу начальных фаз частиц является достаточно слабой. Дальнейшее увеличение толщины пучка ведет к уменьшению энергии, отдаваемой электронами в бегущую моду, и к увеличению энергии, отдаваемой в гиротронную моду.

Таким образом, согласно расчетам, КПД МЦР со стоячей и бегущей волнами может быть существенно выше, чем КПД традиционного мазера на циклотронном авторезонансе, работающего в режиме генератора. Одной из причин высокого КПД МЦАР-гиротрона является более благоприятная продольная структура высокочастотного поля бегущей волны, похожая на структуру поля в МЦР-усилителе бегущей волны — гиро-ЛБВ. Другая причина высокого КПД МЦАР-гиротрона заключается в дополнительной возможности длительного поддержания синхронизма электронов с бегущей волной за счет взаимодействия со стоячей волной. Действительно, рассмотрим для простоты изменение фазы электрона относительно бегущей волны в приближении преобладающей инерционной группировки частиц

$$\frac{d\Theta_1}{d\zeta} \approx \frac{-\delta_1 - \nu_1 w_1 - \nu_2 w_2}{p_z}, \quad (10)$$

когда в первом уравнении системы (5) можно пренебречь членом F , ответственным за силовую группировку частиц. Здесь $\nu_1 = 1 - \beta_{ph}^{-2}$ и $\nu_2 = 1 -$ коэффициенты инерционной группировки, вызванные энергообменом электрона с авторезонансной и гиротронной

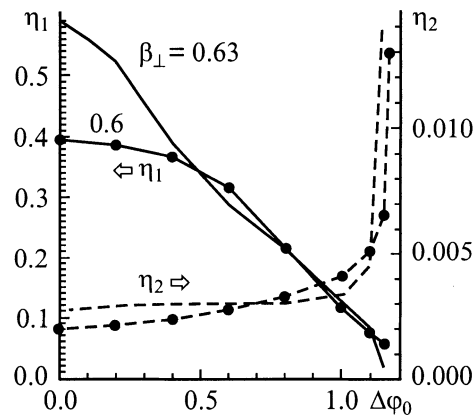


Рис. 6. Зависимость КПД МЦАР-гиротрона от разброса начальных циклотронных фаз частиц в пучке.

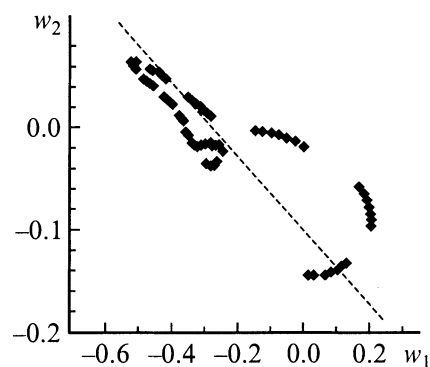


Рис. 7. Распределение частиц по изменениям их энергий, вызванным бегущей и квазикритической волнами, на выходе из пространства взаимодействия.

волнами соответственно. Поскольку фазовая скорость авторезонансной волны β_{ph} близка к скорости света, то $\nu_1 \ll \nu_2$. Таким образом, поглотив небольшое количество энергии Δw_2 из "гиротронной" моды, электрон может излучить значительно большее количество энергии $\Delta w_1 = -\Delta w_2 \nu_2 / \nu_1$ в бегущую моду, оставаясь при этом в синхронизме с ней. Этот эффект иллюстрирует рис. 7, где показано распределение электронов по изменениям их энергий w_1 и w_2 на выходе из пространства взаимодействия. Как видно, большинство частиц находится вблизи штриховой линии $\nu_1 w_1 + \nu_2 w_2 = \text{const}$.

Экспериментальное исследование МЦАР-генератора с одновременным возбуждением авторезонансной и гиротронной мод

Эксперименты с МЦАР-гиротроном проводились на ускорителе "Синус-6" со взрывоэмиссионным инжектором частиц диодного типа. Ускоритель способен создавать электронный пучок с током 3–8 кА и энергией частиц 300–600 кэВ длительностью около 20 нс. Схема экспериментов была аналогична описанному выше эксперименту с МЦАР, обладающим высоким электронным КПД [15], но параметры электронного пучка и электродинамической системы в этих двух экспериментах несколько различались. Для получения приемлемых величин тока и разброса скоростей частиц, как и в [14], из создаваемого диодной пушкой пучка при помощи отверстия в аноде диаметром 1.5 мм вырезалась наиболее прямолинейная центральная часть (рис. 1). Затем прошедший в отверстие прямолинейный рабочий пучок раскачивался в поперечном магнитном поле кикера. Раскаченный пучок влетал в резонатор в виде отрезка круглого волновода, ограниченного с катодного конца закритическим сужением, а с коллекторного конца — коническим расширением либо небольшим сужением, запирающим только квазикритическую моду TE_{21} .

В первой серии новых экспериментов использовался электронный пучок с энергией частиц 460 кэВ и током 60 А. Диаметр и длина резонатора составляли 7.7 и 60 мм (критическая частота для моды TE_{21} в таком резонаторе 37.8 GHz). С коллекторного конца резонатор был ограничен отрезком круглого волновода диаметром 7.1 мм, критическая частота волны TE_{21} в котором составляла 41 GHz. Отражение для бегущей волны TE_{11} на выходе из резонатора практически отсутствовало, в то же время добротность гиротронной моды TE_{21} была очень высокой. В эксперименте было получено излучение на частоте 40 ± 1 GHz с поперечной структурой, соответствующей моде TE_{11} . Максимальные мощность 6 MW и КПД 22% (рис. 8) были получены при продольном магнитном поле 11.0–11.3 кОе и пичфакторе $\beta_{\perp} / \beta_{\parallel}$ около 1. Отличие частоты генерации от критической частоты моды TE_{21} в резонаторе может

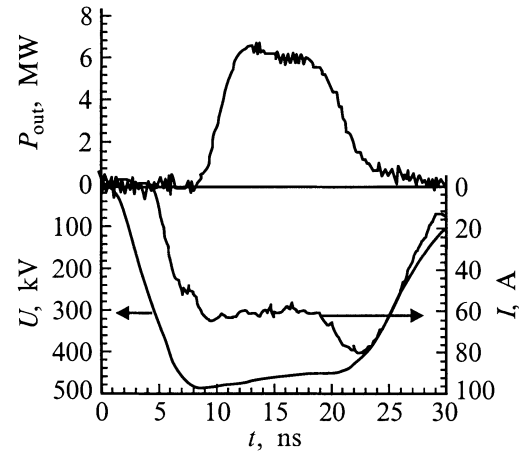


Рис. 8. Импульсы тока, напряжения и выходной мощности для МЦАР-гиротрона.

быть объяснено возбуждением гиротронной моды TE_{21} с высоким продольным индексом.

Во второй серии экспериментов использовался электронный пучок с энергией частиц 400 кэВ и током 50 А. Для подтверждения механизма совместной генерации авторезонансной и гиротронной мод важно было убедиться в присутствии моды TE_{21} . Для этой цели сравнивалась генерация в "открытом" и "закрытом" резонаторах с одинаковыми диаметром (8.1 мм, критическая частота моды TE_{21} равна 36.0 GHz) и длиной (90 мм). "Открытый" резонатор ограничивался с выходного конца коническим расширением, а "закрытый" резонатор — наибольшим сужением, запирающим только первую продольную моду TE_{21} . Длина, на которой происходило электронно-волновое взаимодействие, могла изменяться перемещением магнитного экрана (толстого медного кольца, экранирующего импульсное поле соленоида), осаждавшего электронный пучок на стенку волновода.

При использовании обоих резонаторов было получено излучение на частоте 36.0 ± 0.5 GHz. Для МЦАР-гиротрона с закрытым резонатором при длине пространства взаимодействия 5.5 см была получена выходная мощность 3.5 MW, соответствующая КПД 17%. Поперечная структура выходного излучения соответствовала

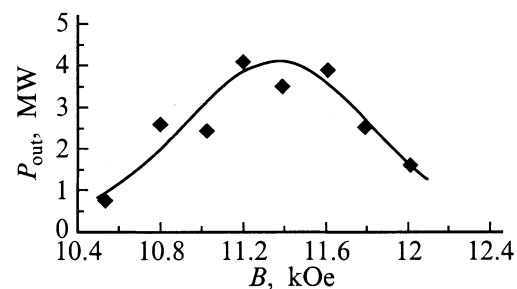


Рис. 9. Зависимость выходной мощности МЦАР-гиротрона от магнитного поля при длине пространства взаимодействия 5.5 см.

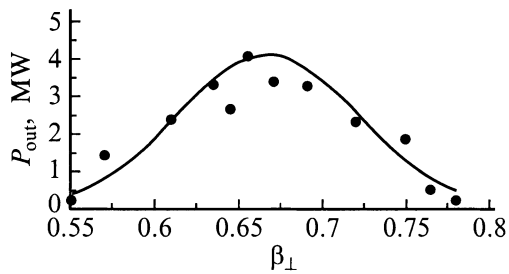


Рис. 10. Зависимость выходной мощности МЦАР-гиротрона от поперечной скорости электронов при длине пространства взаимодействия 5.5 см и магнитном поле 11.2 кОе.

моды TE_{11} . Для МЦАР-гиротрона с открытым резонатором измерения проводились при трех длинах пространства взаимодействия: 9, 7 и 5.5 см. Из открытого резонатора наряду с основной частью мощности, выводимой волной TE_{11} , в соответствии с развиваемой интерпретацией механизма генерации в определенных режимах на той же частоте наблюдалось также излучение моды TE_{21} . Наибольшая мощность излучения 4 МВт в моде TE_{11} , соответствующая КПД 20%, была получена при минимальной длине взаимодействия 5.5 см. Дальнейшее уменьшение длины пространства взаимодействия в существующей конструкции было невозможно. При длине взаимодействия электронов с высокочастотным полем 7 и 9 см выходная мощность составляла 3.1 и 1.3 МВт соответственно. При изменении магнитного поля с оптимизацией по величине пич-фактора (рис. 9) наибольшая мощность излучения достигалась при 11.2 кОе, что соответствовало наиболее благоприятной расстройке синхронизма между электронами и бегущей волной. При поперечной скорости электронов 0.65 s, соответствующей максимальному КПД (рис. 10), диаграмма направленности выходного излучения довольно точно соответствовала моде TE_{11} . С увеличением поперечной скорости частиц в выходном излучении при сохранении частоты генерации увеличивалась доля моды TE_{21} . При поперечной скорости более 0.75 s диаграмма направленности соответствовала моде TE_{21} с небольшой примесью моды TE_{11} , что связано с выходом последней из резонанса с электронным пучком.

Важным дополнительным аргументом в пользу рассматриваемого механизма совместной генерации двух волн служит также результат эксперимента с электронным пучком, который при влете в резонатор был заведомо перемешан по фазам циклотронного вращения. Регулировка разброса по начальным фазам достигалась увеличением до 7 см расстояния от кикера до резонатора. Вследствие скоростного разброса частиц после пролета такого расстояния электроны успевали равномерно перемешаться по фазам циклотронного вращения, в результате чего в резонатор влетал несинфазный пучок. В этом случае генерация моды TE_{11} не наблюдалась.

Заключение

Организация одновременного взаимодействия тонкого, неперемешанного по начальным фазам циклотронного вращения электронного пучка с бегущей (авторезонансной) волной на основном циклотронном резонансе и со стоячей (гиротронной) волной на второй гармонике на одной и той же частоте позволяет реализовать новую разновидность генератора МЦАР-гиротрон с высоким КПД (до 60% в теории и 20–25% в первых экспериментах), существенно большим, чем у одноволнового МЦАР. В этом генераторе гиротронная волна обеспечивает обратную связь и формирует электронные сгустки; возникающий сигнал эффективно преобразуется в авторезонансную волну, усиливается и в удобном виде выводится из пространства взаимодействия. В такой схеме вместо довольно сложных брегговских резонаторов могут использоваться очень простые резонаторы гиротронного типа.

Изложенная в данной работе идея получила недавно важное развитие [21,22]: используя вместо гиротронной моды встречную волну, удалось реализовать генератор (комбинацию giro-ЛОВ и giro-ЛБВ) с широкополосной перестройкой частоты излучения и КПД, превышающим КПД обычной giro-ЛОВ.

Следует подчеркнуть, что связь волн на электронном пучке может быть, по-видимому, реализована не только в МЦР, но и в лазерах на свободных электронах [23], где используются не свободные, а вынужденные колебания электронов в пространственно-периодическом магнитном поле, благодаря чему электронный пучок всегда является синфазным.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 98-02-17068, 99-02-16361).

Список литературы

- [1] Петелин М.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 16. № 6. С. 902–908.
- [2] Bratman V.L., Ginzburg N.S., Petelin M.I. // Optics Commun. 1979. Vol. 30. N 3. P. 409–412.
- [3] Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Нусинович Г.С. и др. Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. Вып. 1. С. 157–216.
- [4] Bratman V.L., Denisov G.G., Ginzburg N.S. et al. // IEEE J. Quant. Electron. 1983. Vol. QE=19. N 3. P. 282–296.
- [5] Vomvoridis J.L. // J. Electronics. 1982. Vol. 53. N 6. P. 555–573.
- [6] Коломенский А.А., Лебедев А.Н. // АН СССР. 1962. Т. 145. № 6. С. 1259–1261. ЖЭТФ. 1963. Т. 44. Вып. 1. С. 261–263.
- [7] Давыдовский В.Я. // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. Вып. 3 (9). С. 886–888.
- [8] Ботвинник И.Е., Братман В.Л., Волков А.Б. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 35. Вып. 10. С. 418–420.
- [9] Богаченков В.А., Братман В.Л., Денисов Г.Г. и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1983. № 6. С. 38–42.

- [10] *Bekefi G., DiRienzo A., Leibovitch C.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1989. Vol. 54. P. 1302–1304.
- [11] *Fliŕlet A.W., McCowan R.B., Sullivan C.A.* et al. // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research. A.* 1989. Vol. 285. P. 233–238.
- [12] *Caplan M., Kulke B., Westenskov G.A.* et al. *Induction-Linac-driven, Millimeter-wave CARM Oscillator.* Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL, 1990. P. 53 689–53 690.
- [13] *Alberti S., Danly B.G., Gulotta G.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 71. N 13. P. 2018–2021.
- [14] *Bratman V.L., Denisov G.G., Ofitserov M.M.* et al. // *Int. J. IR and MM Waves.* 1992. Vol. 13. N 12. P. 1857–1873.
- [15] *Bratman V.L., Denisov G.G., Kol'chugin B.D.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1995. Vol. 75. N 17. P. 3102–3105.
- [16] *Savilov A.V., Bratman V.L., Phelps A.D.R.* et al. // *Phys. Rev. E.* 2000. Vol. 62. N 3. P. 4207–4215.
- [17] *Nusinovich G.S., Zhao J.* // *Phys. Rev. E.* 1998. Vol. 58. P. 1002–1010.
- [18] *Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Канавец В.И.* и др. // *РиЭ.* 1984. Т. 29. № 6. С. 1788–1797.
- [19] *Cooke S.J., Denisov G.G.* // *IEEE Trans. on Plasma Sci.* 1998. Vol. 26. N 2. P. 519–530.
- [20] *Denisov G.G., Bratman V.L., Phelps A.D.R.* et al. // *IEEE Trans. on Plasma Sci.* 1998. Vol. 26. N 2. P. 508–518.
- [21] *Bratman V.L., Fedotov A.E., Savilov A.V.* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2000. Vol. 28. N 5.
- [22] *Bratman V.L., Fedotov A.E., Kolganov N.G.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 85. N 16. P. 3424–3427.
- [23] *Savilov A.V., Peskov N.Yu., and Samsonov S.V.* // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research A.* 2000. Vol. 445. P. 284–289.