

09;10

Наблюдение автомодуляционных режимов генерации в релятивистском гиротроне с запаздывающей обратной связью

© Н.С. Гинзбург, Н.И. Зайцев, Е.В. Иляков,
И.С. Кулагин, Р.М. Розенталь

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
E-mail: rrz@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 22 ноября 2001 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований автомодуляционных режимов генерации в релятивистском гиротроне с запаздывающей обратной связью. В качестве рабочей использована мода H_{01} с центральной частотой генерации 9.2 GHz. При фиксированной энергии пучка 230 keV по мере роста тока от 10 до 45 А наблюдался переход от стационарного режима генерации к режиму периодической автомодуляции. Глубина модуляции, период которой составлял около 16 ns, увеличивалась пропорционально току пучка, достигая 90%. Длительность СВЧ-импульса превышала 6 μ s при средней мощности генерации до 1 MW. Экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с результатами моделирования на основе PIC-кода KARAT.

В настоящее время нелинейная динамика мощных СВЧ-генераторов привлекает значительный интерес в связи с возможностью генерации мощного многочастотного и шумового излучения. Так, в работе [1] режимы периодической и стохастической автомодуляции со средней мощностью до 2 MW наблюдались в релятивистской лампе обратной волны (ЛОВ) на длине волны 3 см. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование автомодуляционных режимов генерации в релятивистском гиротроне. Как известно, гиротроны с субрелятивистскими электронными пучками являются наиболее мощными источниками диапазона миллиметровых волн [2]. Относительно недавно было показано [3], что гиротроны сохраняют высокую эффективность и при запитке релятивистскими электронными пучками. Экспериментально это было подтверждено в работе [4], где в 3-сантиметровом диа-

пазоне длин волн при оптимизации профиля резонатора и параметров электронного пучка было получено излучение с мощностью до 7 MW с КПД порядка 50%.

Таким образом, потенциальные возможности этих приборов, как по уровню мощностей излучения, так и по рабочим диапазонам, где эти приборы могут быть конкурентоспособны, далеко не исчерпаны. Данное утверждение можно распространить и на возможные режимы генерации, имея в виду генерацию многочастотных сигналов. Однако, как показывает теоретический анализ, динамики гиротронов с традиционной конфигурацией пространства взаимодействия в виде отрезка слабонерегулярного волновода, максимально согласованного с выходным трактом, бифуркационные значения токов, при которых возникают автомодуляционные режимы генерации, примерно на порядок превосходят рабочие токи [5], что затрудняет наблюдение указанного эффекта на существующих гиротронных стендах. Вместе с тем, как было показано в [6], значения бифуркационных токов можно существенно снизить путем введения дополнительных отражений с запаздыванием на коллекторном конце пространства взаимодействия. К настоящему времени на основе указанного эффекта наблюдалось уширение спектра генерации в слаборелятивистских гиротронах непрерывного действия [7], где дополнительные отражения вносились рассогласованием выходного окна гиротрона.

В данной работе приведены результаты экспериментальных наблюдений автомодуляционных режимов генерации в релятивистском гиротроне на моде H_{01} , в котором запаздывающая обратная связь обеспечивалась введением специального сужения в выходном тракте генератора. Конфигурация области резонансного взаимодействия электронного потока с полем рабочей моды H_{01} при этом соответствовала условиям эксперимента [4]. Отражатель, расположенный на расстоянии $L \approx 9$ см от соединения раскрыва резонатора с выходной волноведущей секцией, представлял собой сужение волновода с профилем в виде дуги окружности. При внутреннем радиусе отражателя $R_0 = 1.9$ см коэффициент отражения по мощности в рабочей области частот составлял порядка 80%.

Энергия пучка по сравнению с [4] была снижена до 230 keV. Катод работал в режиме температурного ограничения эмиссии, при этом ток пучка менялся в пределах от 15 до 65 А. Увеличение энергии пучка ограничивалось пробоями электродинамической системы генератора,

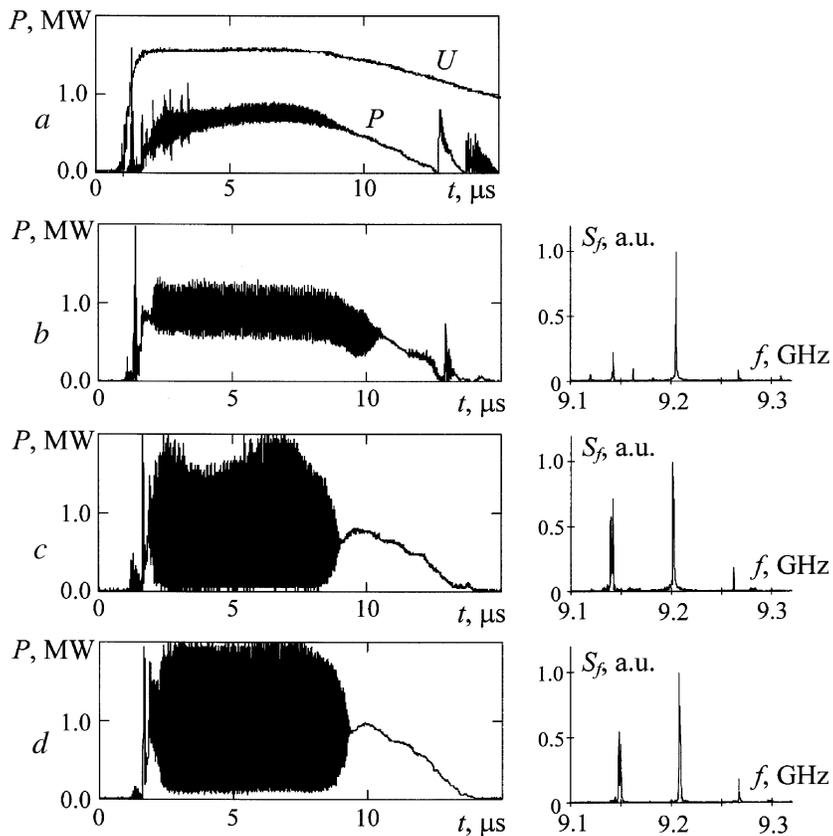


Рис. 1. Осциллограммы импульса ускоряющего напряжения и выходного сигнала при различных токах пучка (a — 17 А, b — 28 А, c — 64 А), а также соответствующие спектры излучения.

связанными, по всей видимости, с возбуждением несимметричных мод, для которых наличие тангенциальных компонент электрического поля на стенках электродинамической системы могло приводить к инициации СВЧ-разряда.

На рис. 1 показаны осциллограммы импульса ускоряющего напряжения и выходного сигнала при различных токах инжекции. Видно, что по

мере увеличения тока глубина модуляции монотонно растет и достигает максимального уровня 90% при токе 45 А. Средняя мощность при этом увеличивается от 0.7 до 1 MW. При токах свыше 45 А выходной сигнал практически не меняется — глубина модуляции и средняя мощность сохраняются на максимальном уровне. КПД генерации по мере увеличения тока снижается с 15–20% при токах 15–20 А до 5–6% при токах порядка 60 А. Во всех случаях полная длительность участков импульсов, на которых наблюдался автомодуляционный режим генерации, превышала $6 \mu\text{s}$, что соответствовало длительности плоского участка импульса ускоряющего напряжения. На том же рисунке представлены спектры сигналов, полученные с помощью гетеродинного метода на интервалах, соответствующих плоским участкам импульсов ускоряющего напряжения. Период автомодуляции, полученный из результатов спектральных измерений, варьировался в пределах 16.6–16.9 ns. Кроме того, спектральная амплитуда низкочастотного сателлита всегда значительно превышала амплитуду высокочастотного. Последний факт не является следствием ошибок в измерениях и требует дополнительных исследований.

Численное исследование нестационарных процессов в релятивистском гиротроне проводилось на базе PIC-кода KARAT, позволяющего непосредственно моделировать уравнения Максвелла в совокупности с уравнениями движения макрочастиц. Вследствие аксиальной симметрии системы и рабочей моды (TE_{01}) использовалась двумерная версия кода. В моделировании предполагалось, что в резонатор гиротрона инжектируется пучок с энергией 230 keV и нулевым разбросом по поперечным скоростям. Питч-фактор выбирался исходя из результатов специального моделирования формирования винтового пучка в магнетронно-инжекторной пушке и составлял порядка единицы.

На рис. 2 представлены геометрия пространства взаимодействия и мгновенное положение макрочастиц в процессе моделирования. Электроны двигались в магнитном поле соленоида, распределение которого было близко к однородному на участке от 0 до 30 см. Далее имело место осаждение электронного пучка на стенку волновода в краевом поле соленоида. Величина магнитного поля варьировалась в пределах 4.2–4.5 kOe, соответствующих различным расстройкам циклотронного резонанса. Следует отметить, что при моделировании электроны осаждались непосредственно после отражателя, в то время как в эксперименте электроны осаждались на расстоянии порядка 50 см после

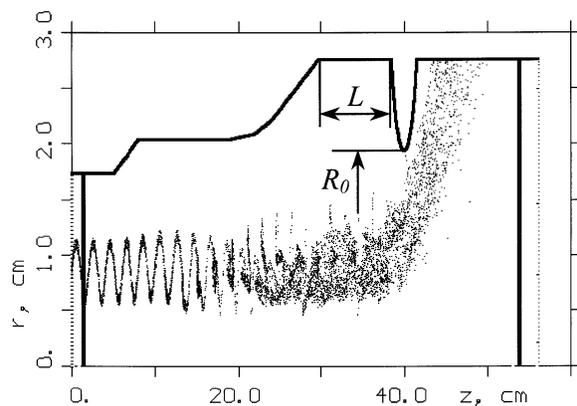


Рис. 2. Геометрия пространства взаимодействия и мгновенное положение макрочастиц при моделировании в рамках PIC-кода KARAT.

отражателя. Тем не менее результаты моделирования стационарных режимов показывают, что в выходном волноводе с радиусом, существенно превышающим критическое значение, взаимодействием пучка с выходным излучением можно пренебречь, поскольку в этой области условия циклотронного резонанса на заданной частоте излучения существенно нарушены.

На рис. 3 приведены полученные с помощью моделирования зависимости усредненной по интервалу 1 ns мгновенной мощности от времени при токах инжекции 15, 30 и 45 А и экспериментальные осциллограммы при токах 17, 28 и 45 А. Видно, что при моделировании также имело место увеличение глубины модуляции по мере роста тока, при этом период модуляции хорошо согласовывался с экспериментальными данными и примерно соответствовал времени соответствующего распространения возмущений по цепи обратной связи.

Увеличение тока свыше 30 А при моделировании приводило к возбуждению дополнительной моды H_{02} на второй гармонике циклотронной частоты, вследствие чего глубина модуляции, за счет снижения эффективности взаимодействия с рабочей модой, была существенно ниже наблюдаемой в эксперименте, где генерация на гармониках циклотронной частоты подавлялась существующим разбросом электро-

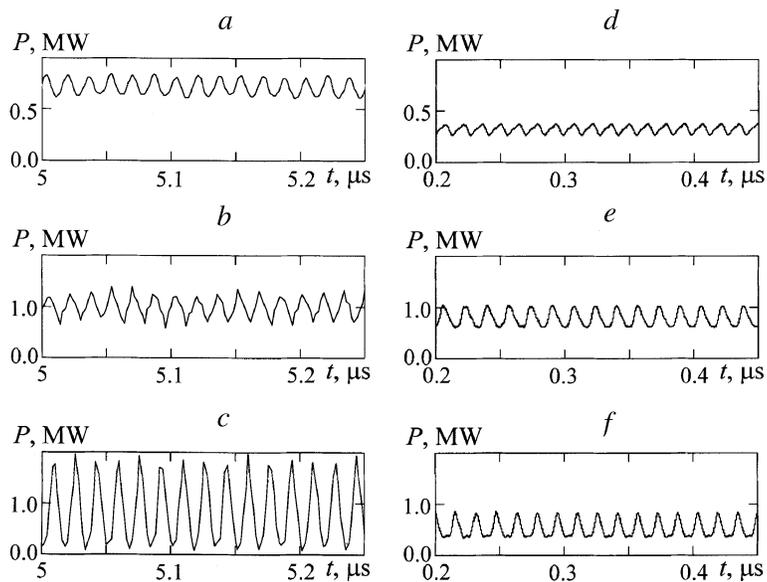


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных осциллограмм с результатами моделирования: *a, b, c* — осциллограммы при токах пучка 17, 28 и 45 А соответственно; *d, e, f* — результаты моделирования при токах инжекции 15, 30 и 45 А.

нов по поперечным скоростям. При моделировании учет начального разброса поперечных скоростей электронов также приводил к подавлению генерации на гармониках циклотронной частоты, однако в этом случае требовалось многократное увеличение числа макрочастиц и соответственно времени счета. В результате на данном этапе соответствия с экспериментальными данными при больших токах инжекции достигнуто не было.

Отметим в заключение, что дальнейшее развитие экспериментальных исследований предполагает возможности повышения средней мощности и КПД автомодуляционных режимов генерации. В этой связи моделирование показывает, что увеличение КПД возможно путем оптимизации коэффициента отражения от нерегулярности. На рис. 4 представлены зависимости средней мощности и глубины модуляции от внутреннего радиуса отражателя при токе инжекции 30 А. Видно,

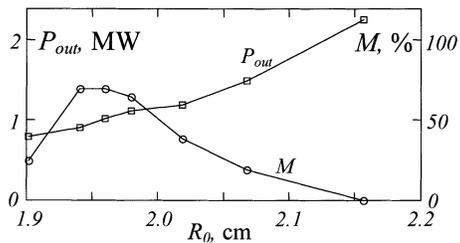


Рис. 4. Зависимость средней мощности и глубины модуляции от радиуса отражателя при токе пучка 30 А.

что мощность генерации растет пропорционально увеличению зазора, а глубина модуляции достигает максимума 70% при $R_0 \approx 1.95$ см. В этом случае средняя мощность генерации составляет порядка одного мегаватта при КПД 15%. По причинам, указанным выше, моделирование при больших токах не проводилось. Тем не менее можно ожидать, что аналогичные зависимости будут иметь место и для больших мощностей пучка, что при условии эффективного подавления генерации на паразитных модах позволит в эксперименте увеличить выходную мощность до уровня нескольких мегаватт при КПД свыше 15%.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 00-02-16412.

Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 11. С. 73–80.
- [2] Гольденберг А.Л., Денисов Г.Г., Запечалов В.Е., Литвак А.Г., Флягин В.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 6. С. 635.
- [3] Moiseev M.A., Zapevalov V.E., Zavolsky N.A. // Int. J. IR & MM waves. 2001. V. 22. N 6. P. 813–833.
- [4] Зайцев Н.И., Гинзбург Н.С., Иляков Е.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 7. С. 8.
- [5] Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A. // Int. J. Electronics. 1986. V. 61. P. 881.
- [6] Гинзбург Н.С., Глявин М.Ю., Завольский Н.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 11. С. 53.
- [7] Глявин М.Ю., Запечалов В.Е., Куфтин А.Н., Лучинин А.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 5. С. 440–444.