

09;12

Высокоэффективный релятивистский гиротрон сантиметрового диапазона длин волн с микросекундной длительностью СВЧ импульса

© Н.И. Зайцев, Н.С. Гинзбург, Н.А. Завольский,
В.Е. Запелалов, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин,
А.Н. Куфтин, В.К. Лыгин, М.А. Моисеев,
Ю.В. Новожилова, Р.М. Розенталь, В.И. Цалолихин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Поступило в Редакцию 19 октября 2000 г.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований создан релятивистский гиротрон с КПД 45%, мощностью до 7 MW при длительности импульса СВЧ до $6 \mu\text{s}$. В оптимальных условиях реализован одномодовый режим генерации с возбуждением электропрочной моды TE_{01} на частоте 9.2 GHz.

1. В настоящее время гиротроны являются наиболее высокоэффективными источниками мощного излучения миллиметрового диапазона. Так, на длине волны $\lambda = 3 \text{ mm}$ получена мощность излучения $\approx 2 \text{ MW}$ при длительности импульсов $30 \mu\text{s}$ [1]. Тем не менее возможности этих приборов как по уровню мощностей излучения, так и по рабочим диапазонам, где эти приборы могут быть конкурентоспособны, далеко не исчерпаны.

Очевидно, что увеличение мощности излучения должно быть связано с увеличением рабочих токов и напряжений, включая переход в релятивистскую область энергий. В теоретической работе [2] в рамках приближенной модели, основанной на сведении уравнений движения релятивистских частиц к уравнениям неизохронных осцилляторов, используемых в теории слаборелятивистских гиротронов, было показано, что КПД гиротрона остается достаточно высоким и в области умеренного релятивизма (200–500 keV). При этом для поддержания величины КПД на уровне 20–30% целесообразно уменьшать длину

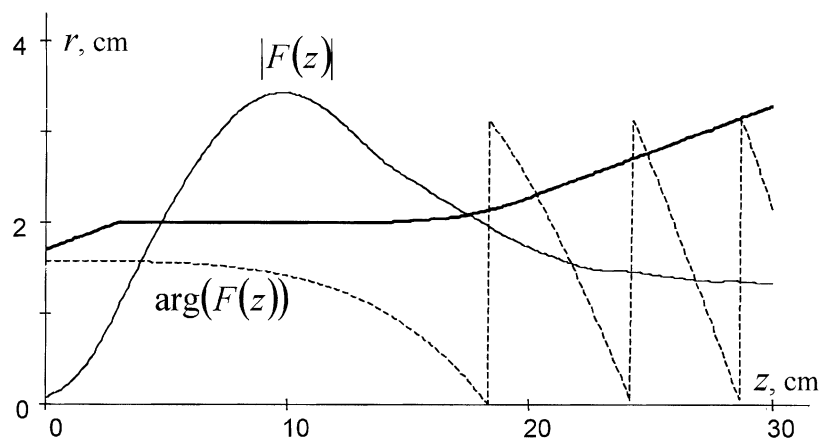


Рис. 1. Геометрия пространства взаимодействия и самосогласованная продольная структура модуля амплитуды $|F(z)|$ и фазы $\arg(F(z))$ поля рабочей моды в оптимальном режиме генерации.

пространства взаимодействия, расширяя тем самым ширину полосы циклотронного резонанса. Эти результаты были подтверждены экспериментально. В частности, в работах [3,4] были реализованы релятивистские гиротроны на рабочей моде TE_{13} с длиной волны 3 см и 8 мм при энергии частиц соответственно 300 и 900 keV с КПД 20 и 6%. При этом, однако, использовался релятивистский электронный пучок, формируемый со взрывоэмиссионного катода, и длительность СВЧ импульсов не превышала нескольких десятков наносекунд.

На новом этапе исследований моделирование релятивистского гиротрона было проведено на основе релятивистских уравнений движения и уравнений неоднородной струны, определяющих самосогласованный профиль поля [5]. Такое моделирование показало, что падение КПД при переходе в релятивистскую область существенно меньше, чем предсказывается приближенной асимптотической теорией [2], и при дополнительной оптимизации профиля резонатора КПД гиротронов может превышать 50% [6]. Результаты моделирования были положены в основу разработки высокоэффективного релятивистского гиротрона на моде TE_{01} с рабочей частотой 9.2 GHz.

2. Оптимизация профиля резонатора проводилась на основе стационарной модели релятивистского гиротрона с самосогласованной нефиксированной структурой поля. Для оценки устойчивости возбуждения рабочей моды в условиях конкуренции с паразитными модами использовалась нестационарная модель. В качестве рабочих принимались следующие значения параметров: рабочая мода — TE_{01} , длина волны $\lambda \cong 3.25$ см ($f = 9.2$ GHz), радиус однородного участка резонатора $R_0 = 2$ см, радиус инжекции электронного пучка в пространство взаимодействия $R_b = 0.75$ см, ускоряющее напряжение $U = 280$ кВ, ток пучка $I = 60$ А, питч-фактор $g = 1.3$, относительный разброс электронов по поперечным скоростям $\delta v_{\perp} \approx 30\%$. Оптимальная конфигурация резонатора, длина однородного участка которого составляет 11 см, приведена на рис. 1 (жирная линия). На этом же рисунке представлены продольное распределение модуля амплитуды и фазы рабочей моды в оптимальном режиме генерации.

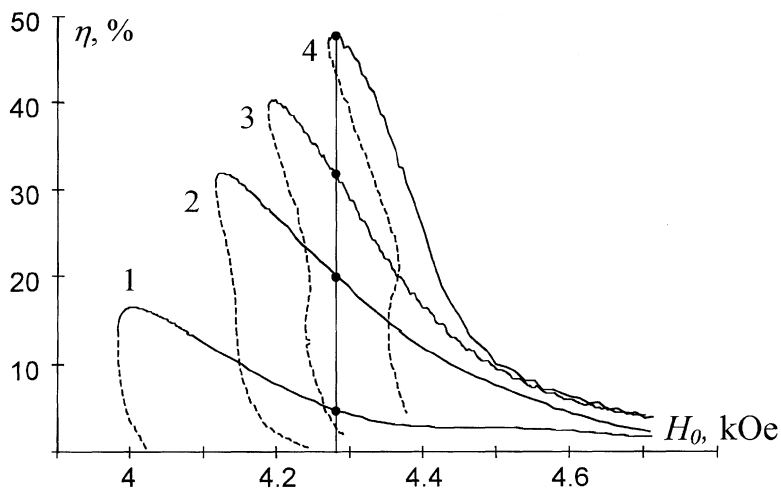


Рис. 2. Зависимость КПД от величины магнитного поля при различных ускоряющих напряжениях и соответствующих величинах тока инжекции и питч-фактора: 1 — $U = 180$ кВ, $I = 48$ А, $g = 0.82$; 2 — $U = 230$ кВ, $I = 54$ А, $g = 1.03$; 3 — $U = 255$ кВ, $I = 57$ А, $g = 1.13$; 4 — $U = 280$ кВ, $I = 60$ А, $g = 1.3$. Пунктиром показаны неустойчивые режимы генерации.

На рис. 2 приведены зависимости КПД от величины магнитного поля для последовательно возрастающих величин напряжения, реализующихся в процессе включения гиротрона. При этом соответствующие каждому напряжению значения токов и питч-факторов выбирались исходя из результатов моделирования формирования винтового пучка в магнетронно-инжекторной пушке. Как видно из рис. 2, максимум КПД 48% достигается на кривой 3 при значении магнитного поля 4.25–4.3 кОе и соответствует жесткому режиму самовозбуждения. Тем не менее при меньших напряжениях (кривые 1, 2) при той же величине магнитного поля режим возбуждения является мягким в том смысле, что данная ветвь стационарного режима автоколебаний достигается при малых величинах начальных возмущений. В результате при оптимизированном профиле резонатора выход на режим генерации с высоким КПД возможен на фронте импульса ускоряющего напряжения, в течение которого рабочая мода стартует в мягком режиме с относительно невысоким КПД и при дальнейшем росте напряжения рабочая точка адиабатически перемещается на устойчивую ветку резонансной кривой 3, которой соответствует высокий КПД.

На рис. 3 показаны зависимости стартовых токов рабочей TE_{01} и наиболее опасной паразитной TE_{21} моды, построенные при трех значениях ускоряющего напряжения. При ускоряющих напряжениях до 230 кV стартовый ток паразитной моды превышает стартовый ток основной моды в области рабочих значений магнитного поля ($H_0 \approx 4.3$ кОе), однако при дальнейшем росте напряжения стартовый ток основной моды увеличивается при одновременном уменьшении стартового тока паразитной моды. Результаты моделирования показывают, что при адиабатическом увеличении ускоряющего напряжения и тока пучка за счет механизма нелинейной конкуренции происходит подавление генерации на моде TE_{21} и установление одномодового режима генерации на моде TE_{01} . Однако этот вопрос требует специального исследования, поскольку характерные времена процессов установления колебаний соизмеримы с длительностью переднего фронта импульса ускоряющего напряжения.

3. Дополнительный анализ и моделирование временной динамики были проведены с использованием двумерной версии PIC-кода KARAT. Код KARAT непосредственно моделирует уравнения Максвелла в совокупности с уравнениями движения макрочастиц, при этом движение частиц является трехмерным, а геометрия системы предполагается

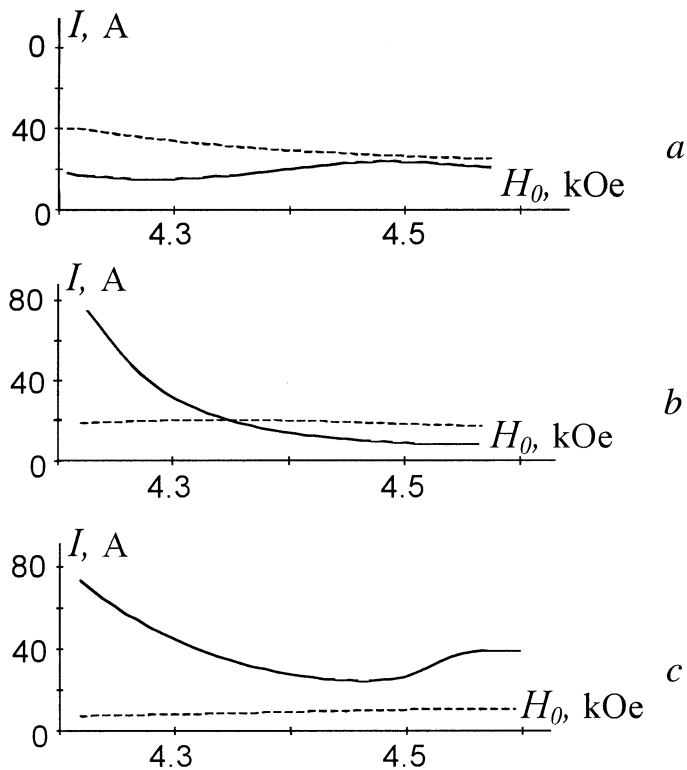


Рис. 3. Зависимости стартовых токов рабочей моды TE_{01} (сплошные линии) и паразитной моды TE_{21} (пунктирные линии) от магнитного поля при разных ускоряющих напряжениях (a — 180 kV, b — 230 kV, c — 280 kV).

аксиально-симметричной. Кроме того, данный код позволяет задать зависимость ускоряющего напряжения и тока пучка от времени, обеспечивая возможность моделирования режима включения, близкого к экспериментальному.

При мгновенном включении тока и ускоряющего напряжения генерация на рабочей моде TE_{01} отсутствовала, что подтверждает жесткий характер возбуждения генерации. Запуск генерации с высоким КПД достигался путем монотонного увеличения ускоряющего напряжения

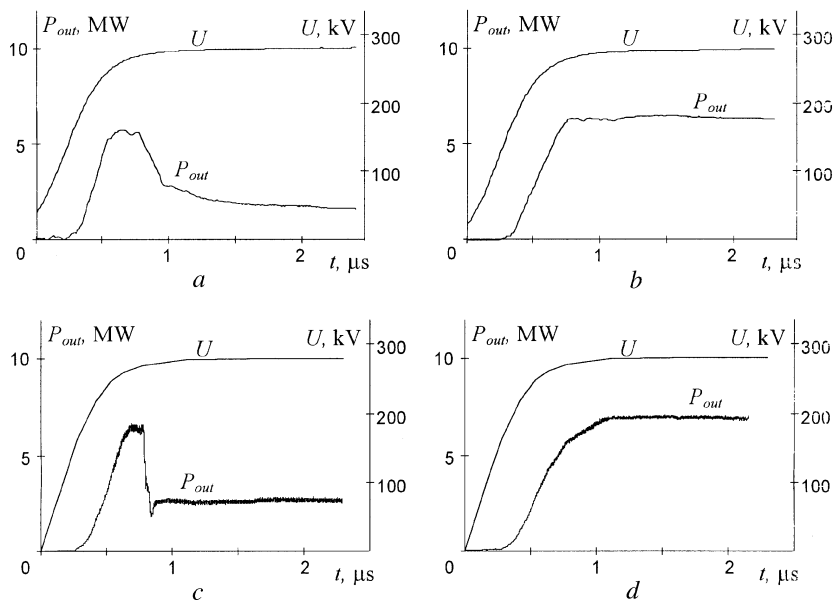


Рис. 4. Осциллограммы ускоряющего напряжения и выходной мощности при переходных процессах в зонах неустойчивой ($a - H_0 < 4.3 \text{ kOe}$) и устойчивой генерации ($b - H_0 \approx 4.35 \text{ kOe}$). Аналогичные зависимости, полученные при моделировании с использованием кода KARAT (c, d).

в течение нескольких сотен наносекунд. На рис. 4 приведены экспериментальные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения и выходной мощности, а также аналогичные зависимости, полученные путем моделирования в области, где реализуется режим с высоким КПД ($H_0 > 4.3 \text{ kOe}$) и в области ($H_0 < 4.3 \text{ kOe}$), где происходит срыв указанного режима. Как видно из сравнения рисунков, характер переходных процессов для основной моды TE_{01} хорошо соответствует результатам моделирования.

4. Экспериментальные исследования гиротрона проводились на базе ускорителя "Сатурн" (ИПФ РАН) [7], позволяющего формировать одиночные импульсы ускоряющего напряжения с длительностью плоского участка импульса (с относительным изменением напряжения не

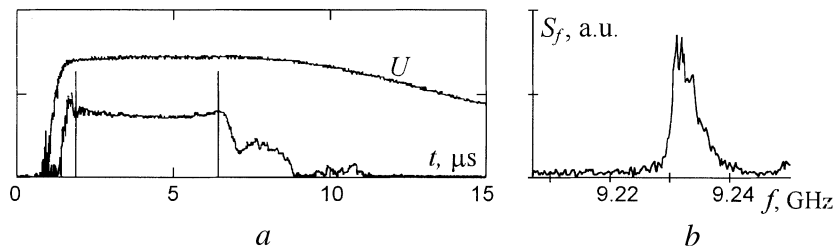


Рис. 5. Осциллограммы импульса ускоряющего напряжения и выходного сигнала (*a*), а также спектр выходного излучения (*b*) на участке стационарной генерации в оптимальном режиме (отмечен вертикальными линиями).

более 3%) до $6 \mu\text{s}$ и амплитудой до 300 kV. Для формирования винтового РЭП на основе программы ЭПОС [8] была разработана трехэлектродная пушка магнетронно-инжекторного типа с термоэмиссионным катодом. В эксперименте пушка работала в режиме ограничения тока инжекции пространственным зарядом (ρ -режиме), формируя трубчатый электронный пучок со средним диаметром 15 mm, максимальным током 55 A и пич-фактором 1.3.

Максимальная мощность излучения составила 7 MW при длительности импульса до $6 \mu\text{s}$ и КПД 45%. На рис. 5, *a* представлены осциллограммы импульса ускоряющего напряжения и выходного сигнала в рабочем режиме генерации. На рис. 5, *b* построен спектр выходного излучения на участке стационарной генерации, где ширина линии излучения не превышает 5 MHz. На рис. 6 приведены зависимости выходной мощности от величины резонансного магнитного поля. На том же рисунке построены теоретические зависимости, полученные на основе стационарной теории с нефиксированной структурой поля и при моделировании с использованием кода KARAT. Видно хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных. Различие в значении оптимального магнитного поля для стационарной модели и кода KARAT может быть объяснено более полным учетом в последнем случае таких факторов, как пространственный заряд пучка, конечная толщина стенки пучка, разброс электронов по скоростям и др.

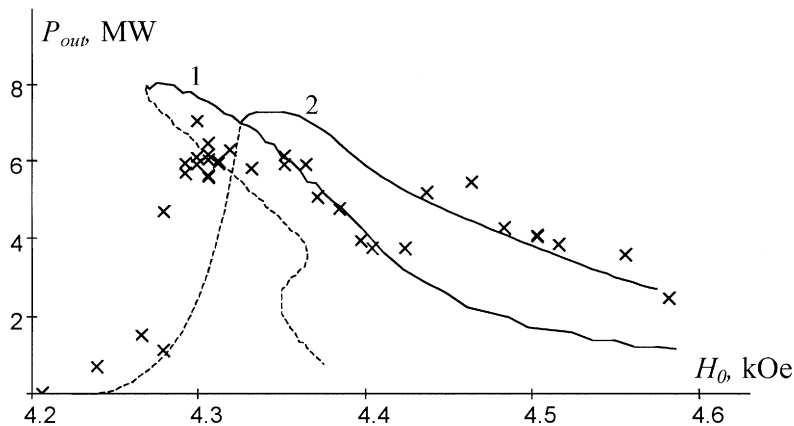


Рис. 6. Зависимость выходной мощности от величины продольного магнитного поля: 1 — стационарная модель, 2 — код KARAT, × — экспериментальные данные.

Следует отметить, что длительность СВЧ импульса в оптимальном режиме генерации соответствовала длительности плоского участка импульса ускоряющего напряжения (рис. 5). При этом важно подчеркнуть, что при отстройке магнитного поля от оптимального значения, когда возбуждалась паразитная мода TE_{21} , наблюдалось резкое сокращение длительности импульса до нескольких сотен наносекунд. Этот факт свидетельствует о преимуществе использования в качестве рабочих азимутально-симметричных TE_{0n} мод, у которых отсутствуют нормальные составляющие электрических полей на стенках электродинамической системы, что снижает вероятность инициации СВЧ пробоя.

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтверждают возможность реализации релятивистского гиротрона с высоким, до 45%, КПД. В оптимальных условиях получен одномодовый режим генерации с возбуждением электропрочной моды TE_{01} на частоте 9.2 GHz, мощностью 7 MW при длительности импульса до $6 \mu s$. Экспериментальные зависимости выходной мощности от величины резонансного магнитного поля хорошо согласуются с результатами стационарной теории с нефиксированной структурой поля и моделированием в рамках двумерной версии PIC-кода KARAT.

Список литературы

- [1] Гольденберг А.Л., Денисов Г.Г., Запечалов В.Е., Литвак А.Г., Флягин В.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 6. С. 635.
- [2] Bratman V.L., Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Petelin M.I., Strelkov P.S. // Int. J. Electronics. 1981. V. 51. N 4. P. 541.
- [3] Гинзбург Н.С., Кременцов В.И., Петелин М.И., Стрелков П.С., Шкварунец А.К. // ЖТФ. 1979. Т. 49. № 2. С. 378.
- [4] Gold S.H., Fliflet A.W., Manheimer W.M., Mccowan R.B., Lee R.C., Granatstein V.L., Hardesty D.L., Kinkead A.K., Sucky M. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1988. V. 16. N 2. P. 142.
- [5] Moiseev M.A., Nemirovskaya L.L., Zapevalov V.E., Zavolsky N.A. // Int. Journal of IR and MM waves. 1997. V. 18. N 11. P. 2117.
- [6] Завольский Н.А., Запечалов В.Е., Моисеев М.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001 (в печати).
- [7] Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кораблев Г.С., Кулагин И.С., Лыгин В.К., Мовшевич Б.З., Цалолыхин В.И., Шпелев М.Ю. // Приборы и техника эксперимента. 1995. № 3. С. 138.
- [8] Лыгин В.К., Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1987. В. 7. С. 36.