

09:10

Исследование энергетического спектра электронного пучка после взаимодействия с ВЧ полем в гиротроне

© Н.П. Венедиктов, М.Ю. Глявин, А.Л. Гольденберг, В.Е. Запелалов,
А.Н. Куфтин, М.А. Моисеев, А.С. Постникова

Институт прикладной физики РАН,
603600 Нижний Новгород, Россия
E-mail: glyavin@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 16 июня 1998 г.)

Функция распределения электронов по их остаточной энергии после взаимодействия с ВЧ полем определена методом тормозящего электрического поля. Показано, что в режиме с максимальным КПД в спектре отсутствуют электроны с энергией, меньшей 30% их первичной энергии, что позволяет рассчитывать на существенное повышение КПД в гиротронах с рекуперацией энергии.

Введение

Мощные генераторы когерентного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн — гиротроны [1–3] используются в таких энергетических приложениях, как электронно-циклотронный нагрев термоядерной плазмы и высокотемпературная обработка некоторых материалов. Типичные значения выходного КПД современных гиротронов составляют 30–40% [4]. Одним из достаточно простых и эффективных путей дальнейшего повышения КПД является рекуперация — процесс, при котором электроны после выхода из рабочего пространства тормозятся электрическим полем вблизи коллектора, имеющего потенциал ниже начального потенциала пучка, и отдают в источники питания часть своей кинетической энергии, не израсходованной при взаимодействии с ВЧ полем. Как уже известно, привлекательность рекуперации в гиротронах усилена тем, что в спектре отработавших электронов отсутствуют (или содержатся в малом количестве) частицы, имеющие энергию, меньшую некоторой величины E_{\min} , составляющей значительную часть (до 40%) ее начальной величины E_0 . Благодаря этому достаточно эффективная рекуперация может осуществляться и в простейшей одноступенчатой схеме. Таким образом, эффективность рекуперации энергии существенным образом зависит от энергетического спектра электронов после взаимодействия с ВЧ полем, который, как показали расчеты, в существенных деталях зависит от условий этого взаимодействия, особенно в переходной области от резонатора к выходному волноводу [5]. Несмотря на достаточно подробное теоретическое исследование энергетических спектров (см., например, [6–8]), непосредственное измерение функции распределения отработавших электронов по энергиям представляет особый интерес для объяснения особенностей работы различных гиротронов в режиме одноступенчатой рекуперации и разработки гиротрона с двух(много)-ступенчатой рекуперацией. Многоступенчатые схемы рекуперации могут быть спроектированы и реализованы при наличии достоверной информации об энергетическом спектре ”отрабо-

тавших” электронов и уверенности в правильности существующих методов расчета энергетических спектров. Данная работа посвящена экспериментальному определению энергетического спектра электронного потока после взаимодействия с ВЧ полем в короткоимпульсном гиротроне на частоте 83 GHz с выходной мощностью до 1 MW [9].

Метод измерения и экспериментальная установка

Для определения энергетического спектра электронов использовался метод тормозящего поля: электроны, обладающие поступательной скоростью, достаточной для преодоления тормозящего электрического поля, создают ток мишени, по зависимости которого от тормозящего напряжения можно определить распределение электронов по скоростям. Использованный в данной работе анализатор (рис. 1) и методика измерений, подробно описанные в [10], позволяют проводить измерения при рабочих напряжениях пучка (порядка нескольких десятков киловольт). Анализатор установлен в области коллектора, в него поступают электроны после взаимодействия с ВЧ полем. Через узкую продольную щель, прорезанную в коллекторе, в анализатор отводится примерно 1% полного тока пучка (вращая коллектор возможно в принципе определить азимутальное распределение электронного потока, хотя в данной работе подобное исследование не проводилось). Из простых оценок, основанных на адиабатическом приближении [11,12], следует, что в области тормозящего поля анализатора вращательная скорость электронов пренебрежимо мала по сравнению с их поступательной скоростью вдоль магнитного поля. В этом случае метод тормозящего поля позволяет определить функцию распределения электронов по полным скоростям (энергиям). При измерениях одновременно с импульсом ускоряющего напряжения пучка на катод прямоугольные импульсы подавались и на сетку анализатора, причем амплитуда сеточного импульса плавно уменьшалась от

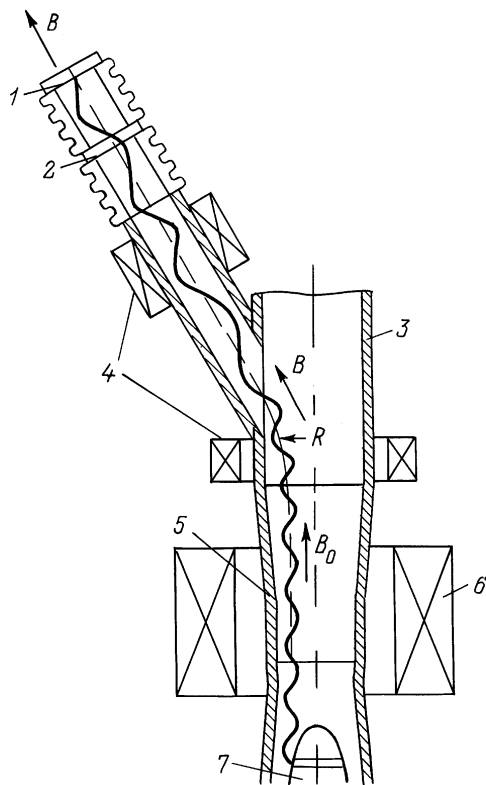


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 — мишень анализатора, 2 — сетка, 3 — коллектор, 4 — дополнительный соленоид, 5 — резонатор гиротрона, 6 — основной соленоид, 7 — электронная пушка.

импульса к импульсу от максимального значения (около 90 kV), определявшегося возможностями источников питания и электрической прочностью изоляторов анализатора, до нуля. Сигналы, пропорциональные току мишени и тормозящему напряжению, поступали в автоматизированную систему сбора и обработки данных. В экспериментах использовалась система автоматизации сбора и обработки данных на основе модуля КАМАК и компьютеров HiCom(Dec) и IBM PC [13,14], обеспечивающая высокую точность и скорость измерений. Это позволило уменьшить ошибки, связанные с долговременной нестабильностью источников питания, и получить большой массив данных, повышающий достоверность результатов измерений. Для подавления помех при обработке результатов использовалось вычитание сигнала, возникающего в измерительной аппаратуре в отсутствие тока эмиссии. Проверка точности измерений проводилась по зависимости тока мишени от тормозящего напряжения в отсутствие генерации. Такие зависимости представляли собой ступеньку с очень крутым спадом при напряжении сетки, равном ускоряющему напряжению пучка. При этом ширина области уменьшения тока, соответствующая разбросу энергий электронов в пучке, составляла около 3% от ускоряющего напряжения, что хорошо согласуется с имеющимися данными [15].

Результаты измерений и теоретических расчетов

Задачей описанных ниже экспериментов являлось определение энергетического спектра электронного потока после взаимодействия с ВЧ полем в резонаторе экспериментального гиротрона [9,16]. Его основные рабочие параметры: рабочая мода $TE_{11,3}$, частота генерации 83 GHz, выходная мощность 1 MW, длительность импульса 100 μ s, ускоряющее напряжение 70 kV, ток пучка 40 A, магнитное поле 3 T. В ходе экспериментов изменялись ускоряющее напряжение, магнитное поле и ток пучка. Мы ограничимся описанием основных закономерностей, выведенных из измерений энергетических спектров электронов.

На рис. 2 представлены функции распределения электронов по энергии после взаимодействия с ВЧ полем при различных значениях магнитного поля в пределах полосы генерации при номинальных значениях тока и напряжения ($U_0 = 70$ kV, $I = 30$ A). В распределении, соответствующем режиму генерации с максимальным КПД (около 40%) при оптимальной расстройке циклотронного резонанса $B = B_{opt}$ [17], наибольшее число электронов имеет энергию примерно вдвое меньше, чем начальная энергия электронов E_0 (до взаимодействия с ВЧ полем определяемая полным ускоряющим напряжением U_0). Слева от максимума (при меньших энергиях) число электронов незначительно, а справа склон функции распределения пологий, причем имеются и электроны с энергиями, превышающими начальную. Такое энергетическое распределение хорошо согласуется с полученными при расчетах [18]. При отстройке от оптимального режима генерации спектр энергии расширяется, а его максимум смещается к начальной энергии электронов. В большинстве случаев при отклонении тока и напряжения пучка, магнитного поля от значений, соответствующих оптимальному режиму генерации микро-

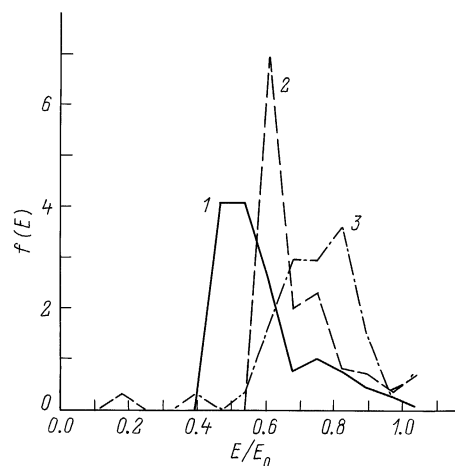


Рис. 2. Функция распределения электронов по энергии при различных значениях магнитного поля в пределах полосы генерации одной моды: 1 — $B = B_{opt}$, 2 — $B \cong 1.015B_{opt}$, 3 — $B \cong 1.02B_{opt}$, КПД = 40 (1), 20 (2), 10% (3).

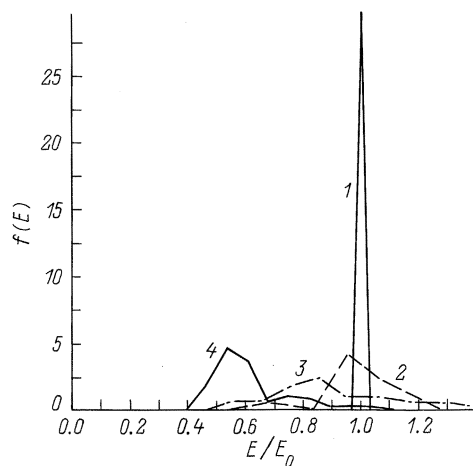


Рис. 3. Функция распределения электронов по энергии при различных значениях ускоряющего напряжения: $U_0 = 16$ (1), 33 (2), 50 (3), 70 kV (4); КПД $\rightarrow 0$ (1), ≤ 5 (2), ≈ 10 (3), $\approx 40\%$ (4).

волнового излучения, происходили изменения спектра, сходные с приведенным.

Проверить точность измерений можно, оценивая КПД гиротрона по спектру энергии. С учетом нормировки функции распределения $\int f(E)dE = 1$ КПД гиротрона вычисляется по формуле

$$\eta = 1 - \frac{\int_0^{E_{\max}} f(E)E dE}{E_0}. \quad (1)$$

Для режима генерации с высоким КПД (40–35%) результаты оценки КПД по формуле (1) и полученные при калориметрическом измерении выходной мощности совпадают. По мере снижения КПД оценка по спектру энергии оказывается завышенной тем сильнее, чем больше отстройка магнитного поля от оптимального значения. Расхождение, по-видимому, объясняется появлением в спектре большого числа электронов с энергией, существенно большей, чем начальная, которые не фиксируются в эксперименте. На это указывает и характер поведения $f(E)$ в области максимального тормозящего напряжения.

Рис. 3 иллюстрирует эволюцию энергетического спектра электронов по мере увеличения ускоряющего напряжения U_0 при фиксированном магнитном поле соленоида и токе пучка ($I = 20$ А). В отсутствие генерации ($U_0 = 16$ kV) спектр представляет собой узкий пик с вершиной, соответствующей ускоряющему напряжению. Ширина пика составляет несколько процентов, что хорошо согласуется с [10]. При превышении ускоряющим напряжением порогового значения (примерно 30 kV) возникает слабая генерация микроволнового излучения. Приведенный спектр ($U_0 = 33$ kV) существенно шире, чем предыдущий, что свидетельствует о значительном энергообмене между электронами и ВЧ полем. Однако

при невысоком КПД $\leq 5\%$ взаимодействие электронов с ВЧ полем имеет линейный характер и число замедленных и ускоренных частиц примерно одинаково, а максимум спектра располагается немного ниже ускоряющего напряжения. При дальнейшем увеличении напряжения ($U_0 = 50$ kV, КПД $\approx 10\%$) максимум спектра смещается в сторону меньших значений энергии. Наблюдаемый спектр энергии электронов достаточно широк и может иметь несколько максимумов. Возможно, наличие электронов с малой энергией является причиной снижения КПД и мощности гиротрона в некоторых экспериментах по рекуперации [19], поскольку при снижении потенциала коллектора электроны с малой энергией отражаются от потенциального барьера и возвращаются в резонатор, ухудшая условия взаимодействия электронного пучка с ВЧ полем рабочей моды [6]. Оценки КПД по спектру энергии при различных напряжениях пучка вплоть до оптимального напряжения U_0 гораздо лучше, чем в предыдущем случае, совпадают со значениями КПД, найденными из прямых измерений выходной мощности. В режиме генерации с высоким КПД ($U_0 = 70$ kV, КПД $\approx 40\%$) максимум спектра примерно соответствует половине ускоряющего напряжения, а электроны с энергиями меньше $0.4E_0$ не обнаруживаются, при этом ширина спектра существенно меньше, чем в режимах с неоптимальными условиями взаимодействия. Приведенный спектр хорошо согласуется с экспериментальным спектром, полученным для другого режима с высоким КПД, показанным на рис. 2. Различия заключаются в смещении максимума спектра примерно на 3% в сторону большей энергии и несколько большим числом электронов с энергией $E > E_0$.

Представляет интерес сравнение экспериментальных материалов с результатами расчета энергетического спектра электронов. Численное моделирование процесса взаимодействия электронного потока с ВЧ полем выполнялось на основе модели, подробно описанной в [18,20]. Спектр осцилляторных скоростей электронов на входе в рабочее пространство лампы $f(\nu_{\perp})$ аппроксимировался нормальным законом распределения, достаточно близким к распределению $f(\nu_{\perp})$, наблюдаемым при электронно-оптических экспериментах [21]. Поскольку взаимодействие электронов с ВЧ полем продолжается, хотя и спада по интенсивности, и за пределами резонатора в выходном волноводе на расстояниях, сравнимых с длиной резонатора, при численных расчетах длина области интегрирования уравнений гиротрона выбиралась достаточно большой, чтобы дальнейшее вычисление не меняло результата вычисления КПД более чем на 1%. Вычисления проводились с профилем резонатора и распределением магнитного поля, близких к реальным.

Экспериментальный и расчетный энергетические спектры для гиротрона в оптимальном режиме генерации, представленные на рис. 4, имеют заметные различия в деталях, существенные при работе в режиме рекуперации. Например, при расчетах минимальная энергия электронов в пучке E_{\min} составляет около 20% от их

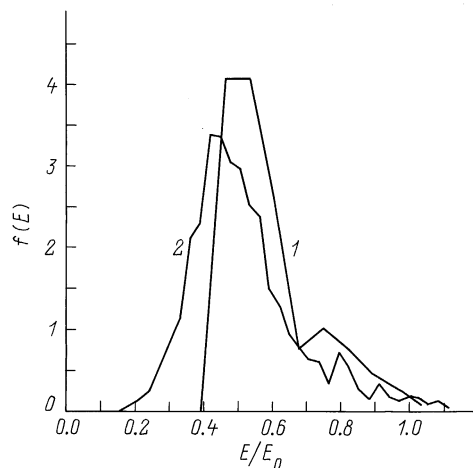


Рис. 4. Экспериментальная (1) и расчетная (2) функции распределения электронов по энергии в режиме максимального КПД.

начальной энергии, а при измерениях — около 40%. Еще раньше было замечено, что такой параметр, как E_{\min} , существенно зависит от продольного распределения ВЧ поля в резонаторе; вероятно, в расчетах и экспериментах эти структуры не вполне согласуются. Во всяком случае возможность существования спектров с $E_{\min} \approx 0.4E_0$ косвенно подтверждается значительным, в 1.5–1.6 раза, повышением КПД в гиротронах с рекуперацией энергии, достигнутым в экспериментах [19]. Приведенный спектр является достаточно характерным и воспроизводился для нескольких гиротронов с различными электродинамическими системами и рабочими модами. В гиротронах с рекуперацией максимальное отличие потенциала коллектора U_{\max}^{col} составляло около 40% от ускоряющего напряжения, а при дальнейшем понижении U^{col} наблюдалось падение выходной мощности и рост тока на корпус лампы, связанные с существенным увеличением числа отраженных от коллектора электронов.

Заключение

Проведенные эксперименты позволили получить спектр энергии электронного потока в различных режимах. Можно утверждать, что характер спектра существенно зависит от условий генерации. В режимах с максимальным КПД спектр начинается с энергий порядка 30–40% от первичной энергии пучка. При этом в схеме с одноступенчатой рекуперацией возможно повышение КПД примерно в 1.5 раза, что и имеет место в ряде гиротронов с пониженным потенциалом коллектора. Сравнение результатов измерений и расчетов при хорошем совпадении значений КПД обнаружило различия в деталях энергетического распределения «отработавших» электронов, что свидетельствует о необходимости уточнения расчетной модели.

Список литературы

- [1] Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1414–1453.
- [2] Гольденберг А.Л., Денисов Г.Г., Запелалов В.Е., Литвак А.Г., Флягин В.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 6. С. 635–669.
- [3] Гиротроны. Сб. науч. тр. / Под ред. В.А. Флягина. Горький: ИПФ АН СССР, 1989. 216 с.
- [4] Flyagin V.A., Goldenberg A.L., Zapevalov V.E. // Proc. Intern. Workshop "Strong Microwaves in Plasmas." N. Novgorod, 1993. P. 597–600.
- [5] Гольденберг А.Л., Завольский Н.А., Мануилов В.Н. и др. // Материалы конф. "Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ". Саратов, 1997. С. 24–26.
- [6] Sakamoto K., Tsuneoka M., Kasugai A. et al. // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 73. N 26. P. 3532–3535.
- [7] Piosczyk B., Latrou C., Dammertz G., Thumm M. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1996. Vol. 24. N 3. P. 579–585.
- [8] Bratman V.L., Denisov G.G., Savilov A.V. // Int. J. IR and MM Waves. 1995. Vol. 16. N 3. P. 459–471.
- [9] Венедиктов Н.П., Запелалов В.Е., Куфтин А.Н. // Гиротроны. Горький, 1989. С. 12.
- [10] Венедиктов Н.П., Глявин М.Ю., Гольденберг А.Л. и др. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 4. С. 95–98.
- [11] Гольденберг А.Л., Панкратова Т.Б. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1971. № 9. С. 81–89.
- [12] Гольденберг А.Л., Лыгин В.К., Мануилов В.Н. и др. // Гиротрон. Горький, 1981. С. 86–101.
- [13] Artyuch S.I., Kuftin A.N., Postnikova A.S. et al. // Int. J. Electronics. Vol. 72. 1992. N 5, 6. P. 1145–1152.
- [14] Kuftin A.N., Lygin V.K., Postnikova A.S. et al. // Proc. 8th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons. N. Novgorod, 1996.
- [15] Bratman V.L., Glyavin M.Yu., Goldenberg A.L. et al. // Conference digest 22nd Intern. Conf. on IRMM Waves, Wintergreen (Virginia), 1997. P. 186–187.
- [16] Flyagin V.A., Kuftin A.N., Luchinin A.G. et al. // Proc. Joint IAEA Tech. Committee Meeting on ECE and ECRH (EC-7 Joint Workshop). Hefei. P.R. China. P. 355–372.
- [17] Венедиктов Н.П., Глявин М.Ю., Запелалов В.Е., Куфтин А.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41. № 5. С. 670–680.
- [18] Goldenberg A.L., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Zavolsky N.A. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 1997. Vol. 18. N 1. P. 43–55.
- [19] Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A. // Int. J. Electronics. 1986. Vol. 61. N 6. P. 881–894.
- [20] Kuftin A.N., Lygin V.K., Manuilov V.N. et al. // Conference digest 22nd Intern. Conf. on IRMM Waves. Wintergreen (Virginia), 1997. P. 188–189.
- [21] Нусинович Г.С., Эрм Р.Э. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1972. № 8. С. 55–60.