

КПД гиротронов на второй гармонике гирочастоты с многоступенчатыми системами рекуперации остаточной энергии электронов

© М.Ю. Глявин,^{2,1} В.Н. Мануилов,^{1,2} М.В. Морозкин¹

¹ Институт прикладной физики РАН,
603950, Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: glyavin@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 1 июля 2014 г.)

Впервые проведена комплексная оптимизация выходного КПД гиротронов с многоступенчатой системой рекуперации энергии при учете как процесса взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полем в резонаторе, так и его последующего торможения в электрическом поле коллекторных иммерсионных линз. Использован энергетический подход, позволяющий оценить КПД такой системы „сверху“. Учтено влияние омических потерь на КПД гиротрона с рекуперацией. Показано, что КПД гиротронов на гармониках гирочастоты с 2-ступенчатой рекуперацией может быть повышен до значений, типичных для магнетронных технологических комплексов при одновременном увеличении рабочей частоты нагрева образцов по крайней мере на порядок.

Гиротроны на второй гармонике циклотронной частоты с умеренным уровнем мощности (10–30 kW), работающие в диапазоне частот 24–30 GHz, являются наиболее перспективными вариантами источников электромагнитного излучения для СВЧ-обработки композитных материалов [1–3]. Одним из наиболее важных параметров такого комплекса с точки зрения широкого промышленного применения считается энергопотребление, т.е. обеспечение высокого КПД в широком диапазоне режимов. Повышение КПД гиротрона возможно как путем коррекции качества формируемого винтового электронного пучка (ВЭП) [4] и профиля электродинамической системы [5], так и эффективного отбора энергии обратно в источник питания за счет рекуперации энергии отработавшего электронного потока [6–8] — осаднения ВЭП на систему электродов коллектора с потенциалами, меньшими, чем потенциал резонатора. Кроме увеличения КПД, рекуперация энергии электронов позволяет снизить тепловую нагрузку на коллектор, уменьшить рабочее напряжение и мощность основного высоковольтного источника питания, а также дает дополнительные возможности управления гиротроном. В настоящий момент в гиротронах экспериментально реализована лишь наиболее простая одноступенчатая рекуперация остаточной энергии отработанного электронного пучка [6–8], а опубликованные ранее теоретические работы по 2-ступенчатым коллекторам гиротронов [9–11] относились только к мощным гиротроном на первой гармонике для УТС. При этом оптимизация электронного КПД и КПД самой системы рекуперации проводились раздельно, без учета взаимного влияния этих систем друг на друга.

В статье впервые приведены результаты оптимизации для параметров и режимов генерации гиротрона,

работающего на второй гармонике с целью достижения максимального полного выходного КПД системы резонатор–многоступенчатый коллектор, который рассчитывался по соотношению [10,11]

$$\eta = \eta_0 / \left(1 - \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{U_i}{U_0} \right) \cdot \frac{I_i}{I_0} \right). \quad (1)$$

Здесь η_0 — КПД без рекуперации, N — количество разделенных энергетических фракций и ступеней рекуперации, I_i — ток i -й фракции, U_i — потенциал коллектора, на который осаждаются i -я фракция и U_0 — полное ускоряющее напряжение.

Анализ систем многоступенчатой рекуперации базировался на исследовании энергетических спектров $F(W) = dI/dW$ электронного пучка на выходе резонатора гиротрона (I — ток, W — энергия электронов). Величины η_0 и $F(W)$ рассчитывались на базе хорошо известной модели с фиксированной гауссовой продольной структурой ВЧ-поля (см., например, [12,13]), имеющей три свободных безразмерных параметра: безразмерную длину резонатора μ , безразмерную расстройку синхронизма Δ и безразмерную амплитуду ВЧ-поля в резонаторе F , возрастающую с увеличением тока пучка (см. подробнее соответствующие определения в работе [14]). Указанная модель обладает достаточно высокой точностью в области параметров, близких к оптимальным по КПД, по сравнению с моделью с нефиксированной структурой поля, и в то же время существенно экономнее с точки зрения времени моделирования по сравнению с моделью с нефиксированной структурой поля [15]. В качестве параметров электронного пучка были взяты значения пичч-фактора $g = 1.4$ и разброса

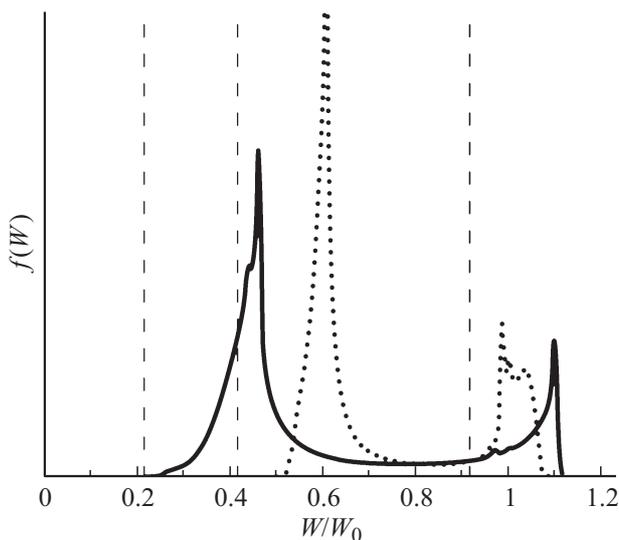


Рис. 1. Спектр отработанного электронного пучка в режиме с оптимальным электронным КПД $\eta_0 = \eta_{e \max}$; штрихпунктирными прямыми обозначены минимальные энергии электронов, осаждаемых на i -ю ступень коллектора. Пунктиром показан энергетический спектр при отстройке от оптимума η_0 .

поперечных скоростей электронов $\delta v_{tr} = 20\%$, типичных для технологических гиротронов [16].

Полученные спектры $F(W)$, как и для гиротрона на первой гармонике гирочастоты, характеризуются наличием ненулевой минимальной энергии электронов W_{\min} [17]. Типичная величина W_{\min} составляет около $0.2W_0$ вблизи точки максимума электронного КПД $\eta_{e \max}$ ($W_0 = eU_0$ — энергия электронов на входе в пространство взаимодействия). При отстройке от оптимальных по электронному КПД длины резонатора и величине тока W_{\min} может достигать $0.4W_0$ и более (рис. 1). В результате, несмотря на падение электронного КПД, полный КПД гиротрона может быть значительно увеличен по сравнению с $\eta_{e \max}$, так как возможности системы рекуперации по торможению электронного потока и возвращению остаточной кинетической энергии пучка обратно в источник питания при этом существенно возрастают. Типичные рассчитанные энергетические распределения отработанного электронного пучка имеют два максимума: область первого соответствует электронам, образующим основной сгусток, эффективно сгруппированный и затормозившийся ВЧ-полем. Область второго максимума расположена вблизи W_0 и соответствует частицам, находящимся в „хвостах“ функции распределения по скоростям, не взаимодействующим эффективно с ВЧ-полем, а также электронам с неоптимальными фазами влета, которые на выходе из резонатора могут иметь энергию больше начальной.

При поиске оптимальных величин потенциалов ступеней рекуперации и оптимизации полного выходного КПД гиротрона предполагалось, что потенциал первой ступени U_1 не может быть уменьшен по сравнению с

U_0 на величину, превышающую минимальную энергию электронов после взаимодействия W_{\min}/e . Иначе часть электронов неминуемо отразится обратно в рабочее пространство, а отражение даже небольшой части частиц (менее 1% от полного тока пучка) приводит к развитию неустойчивостей электронного потока в пространстве взаимодействия, ухудшению энергообмена электронного пучка с полем и быстрому падению выходной мощности и КПД прибора [7,8]. Рассматривались одно-, двух- и трехступенчатые системы рекуперации ($N = 1-3$).

Из вида характерного энергетического спектра $F(W)$ (рис. 1) можно сделать следующие качественные рекомендации по распределению энергетических фракций электронного пучка на разные ступени коллектора. Для достижения наибольшего КПД на первую ступень, потенциал которой определяется минимальной энергией отработанного электронного пучка, целесообразно высадить частицы, находящиеся левее первого максимума энергетического распределения. На вторую ступень, тормозящий потенциал которой $\Delta U_2 = U_0 - U_2$, может быть сделан существенно больше ΔU_1 — основную, наибольшую часть электронов, которые эффективно отдали энергию ВЧ полю и в энергетическом спектре расположены вблизи левого максимума $F(W)$. При наличии третьей ступени рекуперации для дальнейшего увеличения КПД на нее нужно высадить электроны с энергией, близкой к начальной (второй максимум $F(W)$). Хотя доля таких частиц невелика, вклад в увеличение КПД будет значителен за счет их большой энергии и соответственно большого значения тормозящего потенциала ΔU_3 .

Для каждого N на плоскости параметров (F, μ) были рассчитаны значения КПД, оптимальные по остальным параметрам. Оптимизация проводилась следующим образом: сначала в приближении моноскоростного пучка (все частицы имеют одну и ту же осцилляторную скорость на входе в резонатор) для каждой пары значений (F, μ) проводилась оптимизация по магнитному полю (расстройке циклотронного резонанса Δ). Затем для получения реалистичных энергетических спектров в модель вводился разброс вращательных скоростей электронов на входе в пространство взаимодействия. Для этой уточненной модели при найденных ранее значениях (F, μ, Δ) вычислялись энергетические спектры электронов в области коллектора и проводилась окончательная оптимизация по полному КПД с рекуперацией путем подбора потенциалов ступеней U_i .

Соответствующие точкам оптимума потенциалы ступеней торможения приведены на рис. 1 для спектра, соответствующего $\mu = 20$, $F = 0.1$. Пунктирными линиями показаны энергии W_i , соответствующие минимальным энергиям электронов, осаждаемых на i -ю ступень коллектора с потенциалом $U_i = U_0(1 - W_i/W_0)$ при трехступенчатой рекуперации. В случае двухступенчатой рекуперации оптимальный потенциал второй ступени практически такой же, как и в случае трехступенчатой рекуперации, различия составляют деся-

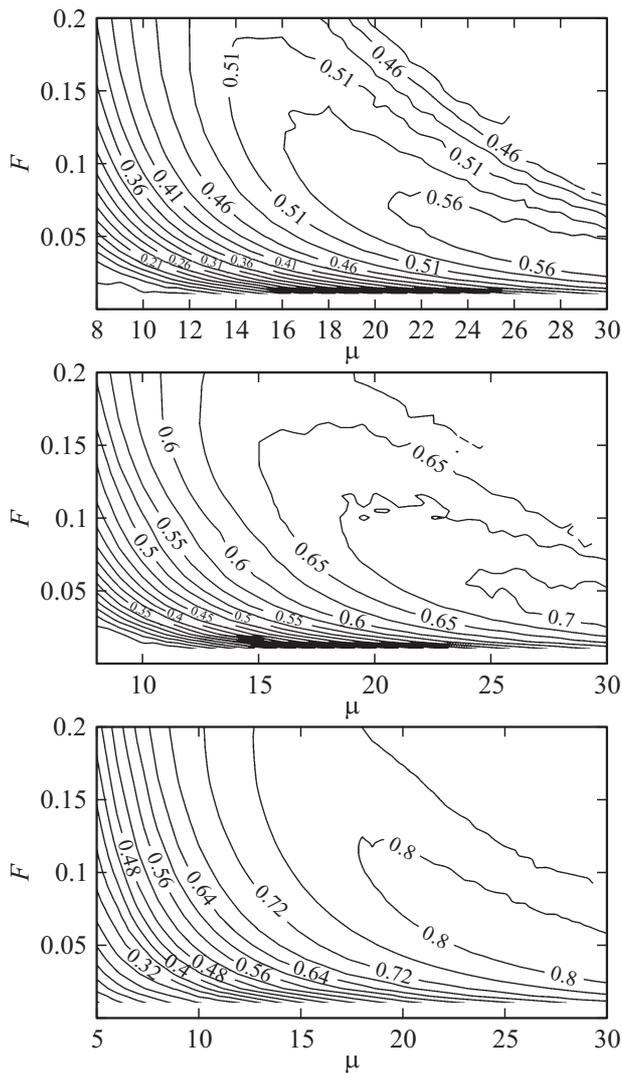


Рис. 2. Линии изо-КПД на плоскости параметров (μ , F) для гиротрона с одно-, двух- и трехступенчатой рекуперацией.

тые доли процента. Проведенные расчеты потенциалов ступеней подтверждают предварительные качественные рекомендации по выбору U_i . Полученные в результате расчетов линии уровня изо-КПД $\eta = \text{const}$ представлены на рис. 2.

Отличительной особенностью зон изо-КПД при использовании рекуперации является то, что сам максимум КПД расположен в районе очень больших длин резонатора и малых амплитуд ВЧ поля, а зоны имеют вид вытянутых вдоль оси μ плато (см. рис. 2). Таким образом, оптимизация по полному КПД с учетом рекуперации требует увеличения длины резонатора. Однако для практических применений слишком длинные цилиндрические резонаторы малого диаметра (отношение длины резонатора к длине волны $L/\lambda \sim 15-20$, отношение диаметра резонатора к длине волны $D/\lambda \sim 2$) нетехнологичны, поскольку существующие способы их изготовления могут приводить к возникновению ко-

нусности. Последняя приводит к резкому изменению добротности [18]. Кроме того, с увеличением длины резонатора растет и доля омических потерь, что ведет к снижению выходного КПД. Поэтому реальная длина пространства взаимодействия не должна быть слишком большой и вместо максимального расчетного КПД целесообразно в качестве точки оптимума взять значения КПД и длины резонатора, соответствующие левому краю (т.е. минимальным μ) зоны высокого КПД по уровню $0.95\eta_{\text{max}}$. Такой подход при незначительном снижении КПД позволяет уменьшить длину резонатора по крайней мере в 1.5–2 раза. Тем не менее даже при таком выборе точки оптимума величина μ оказывается на 20–30% больше, чем в гиротронах без рекуперации. На основании выполненных расчетов можно утверждать, что при использовании одноступенчатой рекуперации КПД увеличивается с 42% (максимально возможное при заданном питч-факторе g значение η_0) до 58%. Выигрыш при добавлении каждой последующей ступени рекуперации несколько уменьшается, так, при двух ступенях ($N = 2$) КПД составляет 71%, при трех ($N = 3$) достигает 82%.

Приведенные на рис. 2 плоскости изо-КПД найдены без учета омических потерь в резонаторе, поскольку, как правило, омическая добротность много больше дифракционной, а КПД с учетом омических потерь $\eta = (1 - Q/Q_{\text{ohm}})\eta_0$. Омическую добротность можно оценить по формуле

$$Q_{\text{ohm}} = 650v_{m,p}\lambda^{1/2}(1 - m^2/v_{m,p}^2)$$

[11,18], где m , p — азимутальный и радиальный индексы рабочей моды, $v_{m,p}$ — p -й корень производной функции

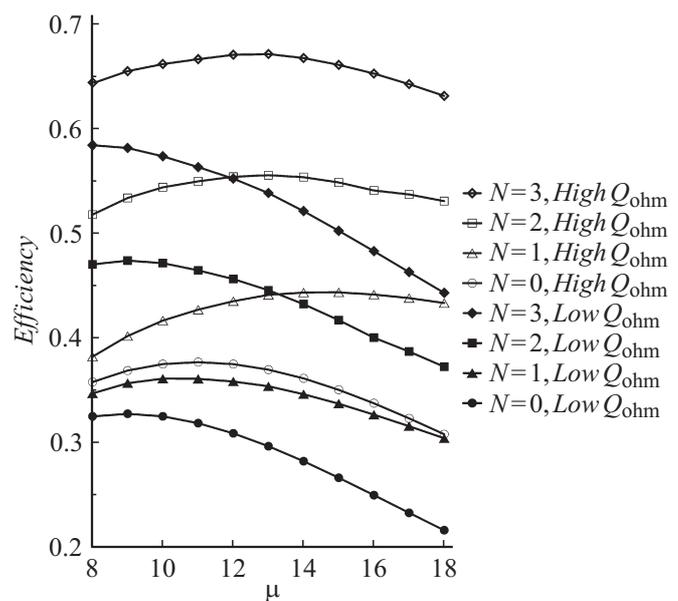


Рис. 3. Зависимость КПД от безразмерной длины резонатора с учетом омических потерь для различного числа ступеней рекуперации.

Бесселя $J'_m(\nu)$. Полная добротность

$$Q = Q_{\text{ohm}} Q_{\text{dif}} / (Q_{\text{ohm}} + Q_{\text{dif}}),$$

где дифракционная добротность $Q_{\text{dif}} \sim 25(L/\lambda)^2$ [11]. Для случая, когда дифракционная и омическая добротности сопоставимы (например, если отмеченное выше увеличение оптимального μ вызывает значительное возрастание Q_{dif}), требуется учитывать омические потери при оптимизации системы с рекуперацией. На рис. 3 показаны зависимости КПД гиротрона с учетом рекуперации при различном числе ступеней рекуперации N для двух значений омической добротности. Низкая омическая добротность (Low Q_{ohm}) взята равной 10 000, высокая (High Q_{ohm}) — 30 000. Эти оценочные значения примерно дают границы изменения омической добротности для технологических гиротронов в зависимости от различных параметров. При высокой добротности, как видно из рисунка, при одноступенчатой рекуперации оптимальная длина резонатора всегда увеличивается, однако для систем с многоступенчатой рекуперацией она с учетом омических потерь будет примерно такой же, как в гиротроне без рекуперации. Если же Q_{ohm} низкая, то оптимальное $\mu \sim 8-10$ оказывается несколько меньше, чем в системе без рекуперации. Интересно отметить, что с учетом омических потерь абсолютный прирост максимально достижимого КПД является почти линейной функцией N . В то же время высокие значения омической добротности приводят к значительному снижению максимально достижимого КПД, еще существеннее снижение максимально достижимого КПД при низких Q_{ohm} .

Тем не менее выигрыш по КПД от применения системы рекуперации в обоих случаях остается значительным и для $N = 2$ доходит до полутора раз, что позволяет надеяться на реализацию полного КПД гиротрона порядка 50–55% даже в простейших вариантах с однородным магнитным полем в пространстве взаимодействия. Трехступенчатая схема, согласно теоретическим расчетам, позволяет увеличить КПД до 60–65%. В принципе снижение скоростного разброса, повышение пич-фактора и профилирование магнитного поля в области резонатора позволяют осуществить дальнейшее повышение КПД. Найденные тенденции при этом, очевидно, сохраняются. На первом этапе технической реализации многоступенчатых комплексов рекуперации предпочтительны 2-ступенчатые схемы, которые проще как с точки зрения источников питания, так и решения проблемы сепарации электронного пучка в пространстве на разные энергетические фракции с целью их дальнейшего осаждения на разные ступени коллектора.

Таким образом, открывается возможность практической реализации технологических комплексов для СВЧ-обработки композитных материалов на базе непрерывных гиротронов с КПД, повышенным до значений, типичных для магнетронных систем при одновременном увеличении рабочей частоты нагрева образцов по крайней мере на порядок.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект 14-12-00887.

Список литературы

- [1] Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I., Denisov G., Bogdashev A., Kalynova G., Semenov V., Zharova N. // IEEE Trans. Plasm. Sci. 2004. Vol. 32. N 1. P. 67–72.
- [2] Bykov Yu., Denisov G., Ereemeev A., Gorbatushkov V., Kurkin V., Kalynova G., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I. // Rev. Scien. Instrum. 2004. Vol. 75. P. 1437.
- [3] Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V., Koldanov V.A., Litvak A.G., Ovechkin N.M., Radishev D.B., Bykov Yu.V., Caplan M. // Diamond and Related Mater. 2006. Vol. 15. P. 502–507.
- [4] Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Моисеев М.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. Вып. 2. С. 121–133.
- [5] Быков Ю.В., Гольденберг А.Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. Вып. 7. С. 1066–1067.
- [6] Sakamoto K., Tsuneoka M., Kasugai A., Imai T., Kariya T., Hayashi K., Mitsunaka Y. // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 73. N 26. P. 3532–3535.
- [7] Glyavin M.Yu., Kuffin A.N., Venediktov N.P., Zapevalov V.E. // Int. J. Infrar. Millimeter Waves. 1997. Vol. 18. N 11. P. 2129–2136.
- [8] Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Лучинин А.Г., Морозкин М.В., Соболев Д.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51. Вып. 10. С. 850–854.
- [9] Singh A., Rajapatirana S., Men Y., Granatstein V.L., Ives R.L., Antolak A.J. // IEEE Trans. Plasm. Sci. 1999. Vol. 27. N 2. P. 490–502.
- [10] Бородачева Т.В., Гольденберг А.Л., Мануилов В.Н. // Гиротрон: сб. науч. тр. ИПФ АН СССР. Горький, 1989. С. 161.
- [11] Manuilov V.N., Moiseev M.A., Skryabin A.Yu., Zavol'sky N.A. // Proceedings International University Conference „Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies“. Sankt-Peterburg, Russia, 1999. P. 134–137.
- [12] Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. JHU Press, 2004. 335 p.
- [13] Tsimring Sh.E. Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. Wiley-Interscience, 2006. 573 p.
- [14] Нусинович Г.С., Эрм Р.Э. // Электроника СВЧ. 1972. Вып. 8. С. 55–60.
- [15] Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Моисеев М.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. Вып. 4. С. 307–320.
- [16] Глявин М.Ю., Кунцевич А.Д., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Пролявин М.Д., Фокин А.П. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 23. С. 80–86.
- [17] Bratman V.L., Denisov G.G., Savilov A.V. // Int. J. Infr. Millimeter Waves. 1995. Vol. 16. N 3. P. 459–471.
- [18] Запезалов В.Е., Малыгин О.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26. Вып. 7. С. 903–905.