

09

Многопараметрическое управление мощностью при микроволновой обработке материалов

© М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов, А.Г. Лучинин, М.В. Морозкин,
А.П. Фокин, В.В. Холопцев, А.И. Цветков

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

Поступило в Редакцию 29 августа 2012 г.

Оптимизация управления режимом генерации гиротрона за счет согласованного изменения катодного напряжения и магнитного поля соленоида позволяет существенно (до 3 раз) снизить энергопотребление в процессе микроволновой обработки материалов. Для этой цели экспериментально подтверждена возможность быстрой (с характерными временами порядка долей миллисекунды) модуляции микроволновой мощности при изменении рабочего магнитного поля током дополнительного соленоида, размещенного в области резонатора.

Использование интенсивного излучения миллиметрового диапазона длин волн перспективно для решения ряда задач, таких, например, как микроволновая высокотемпературная обработка материалов, выращивание алмазных пленок и дисков, создание пучков многозарядных ионов [1–3]. Созданные в ИПФ РАН на основе непрерывных гиротронов диапазона 24–30 GHz технологические комплексы являются уникальными по своим функциональным возможностям [4], а одной из наиболее актуальных проблем их дальнейшего совершенствования остается повышение энергетической эффективности. Ранее для повышения эффективности генерации микроволнового излучения в ИПФ РАН разработан непрерывный 24 GHz гиротрон на второй гармонике гирочастоты со схемой рекуперации остаточной энергии электронного потока, позволившей увеличить КПД до рекордного значения 60% [5]. В данной работе рассматривается дополнительный способ повышения энергоэффективности, основанный на многопараметрическом управлении режимом генерации гиротрона.

Как правило, в процессе СВЧ-нагрева материалов для реализации заданной зависимости температуры образца от времени требуются зна-

чительные изменения мощности микроволнового излучения. В настоящее время метод регулировки мощности технологических гиротронов заключается в изменении ускоряющего напряжения электронного пучка при фиксированных магнитном поле соленоида и токе пучка. Этот способ управления дает быстрый отклик и удобен для реализации, но в результате большую часть времени (а при выращивании алмазных пленок и дисков методом химического парофазного осаждения, так называемый CVD-метод, длительность технологического процесса может достигать сотен часов [2]) гиротрон работает в не оптимальном по КПД режиме.

Использование алгоритмов многопараметрического управления позволяет существенно снизить общее энергопотребление при выполнении процессов обработки. Мощность генерации определяется тремя основными техническими параметрами режима — напряжением и током электронного пучка, а также значением магнитного поля соленоида. Поскольку подавляющее большинство современных гиротронов работает в режиме температурного ограничения тока эмиссии, изменение рабочего напряжения практически не меняет ток пучка. Температура эмиттера и соответственно ток электронного пучка регулируются мощностью накала подогревателя, в результате чего характерные времена изменения тока существенно превышают требуемые для изменения выходной мощности гиротрона. Поэтому в данной работе предлагается алгоритм двухпараметрического управления, при котором каждому значению мощности однозначно соответствует набор двух параметров — ускоряющего напряжения и магнитного поля в пространстве взаимодействия, что обеспечивает работу в зоне генерации, соответствующей режиму максимальных КПД при неизменном токе электронного пучка.

Для двух реальных сценариев нагрева образцов на основе керамики из оксида алюминия (Al_2O_3) микроволновым излучением на рис. 1 показаны временные зависимости экспериментального КПД гиротрона в схеме с управлением мощностью изменением напряжения и рассчитанного на основе экспериментальных данных значения КПД при управлении по двум параметрам (напряжение и магнитное поле). Потребление энергии W от внешних источников за время T в зависимости от мощности P и эффективности генерации η можно оценить по формуле $W = \int_0^T P(t)/\eta(t)dt$. Как следует из данных рис. 1, энергопотребление может быть снижено в несколько раз для процессов,

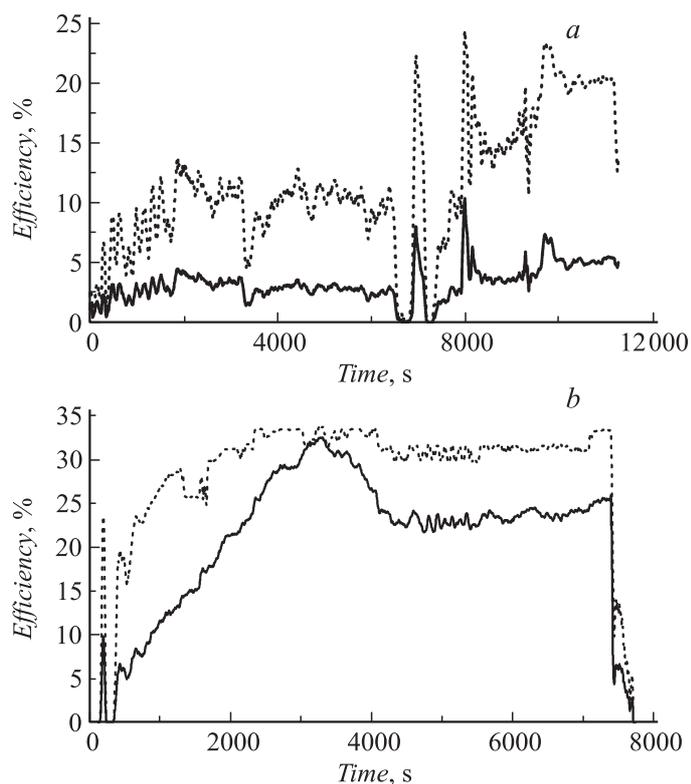


Рис. 1. Экспериментальные зависимости КПД для однопараметрического (пунктир) и двухпараметрического (непрерывная линия) режимов управления. Отношение затраченной энергии W_1 при однопараметрическом управлении к энергии W_2 при двухпараметрическом управлении: a — $W_1/W_2 = 3.5$, b — $W_1/W_2 = 1.3$.

требующих малой СВЧ-мощности (когда параметры режима генерации значительно отличаются от оптимальных по КПД, настраиваемых на максимально достижимую мощность), и почти в полтора раза для процессов, требующих мощностей, близких к максимальным.

Для того чтобы уменьшить время изменения магнитного поля, предлагается использовать дополнительную катушку малой индуктивности,

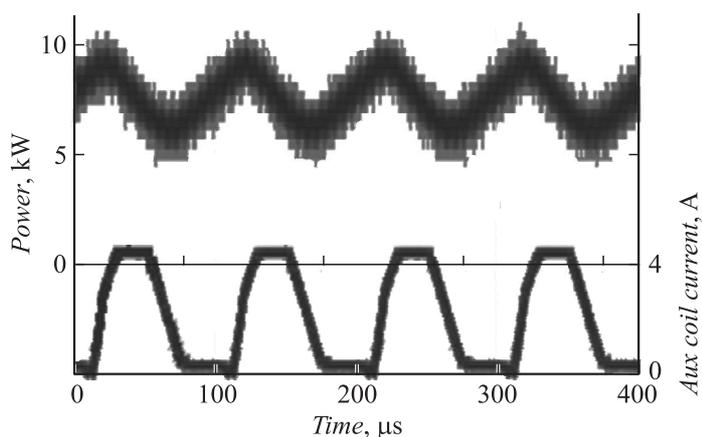


Рис. 2. Осциллограммы тока дополнительного соленоида (нижняя кривая) и соответствующей мощности излучения гиротрона (верхняя кривая).

намотанную на корпус прибора в области резонатора [6]. Результаты экспериментов свидетельствуют, что использование такой катушки позволяет осуществлять модуляцию выходной мощности с частотой до 20 kHz. В качестве примера на рис. 2 представлены осциллограммы тока дополнительного соленоида и соответствующей микроволновой мощности при фиксированных напряжении электронного пучка и токе основного соленоида.

На рис. 3 схематически изображен алгоритм управления по двух параметрам. Трехмерная поверхность представляет собой экспериментальную зависимость мощности излучения от магнитного поля и ускоряющего напряжения. Пунктиром изображена линия максимальной эффективности генерации. Изменяя параметры таким образом, чтобы всегда оставаться на этой линии, можно получать необходимую величину мощности с максимальным КПД. При этом, чтобы избежать срыва автоколебаний для перехода на большую мощность, необходимо сначала увеличить рабочее магнитное поле, а затем увеличить напряжение, а для снижения мощности требуется сначала уменьшить напряжение, а потом уменьшить магнитное поле.

На настоящий момент с высокой точностью измерены выходные характеристики технологического гиротрона с рабочей частотой 24 GHz

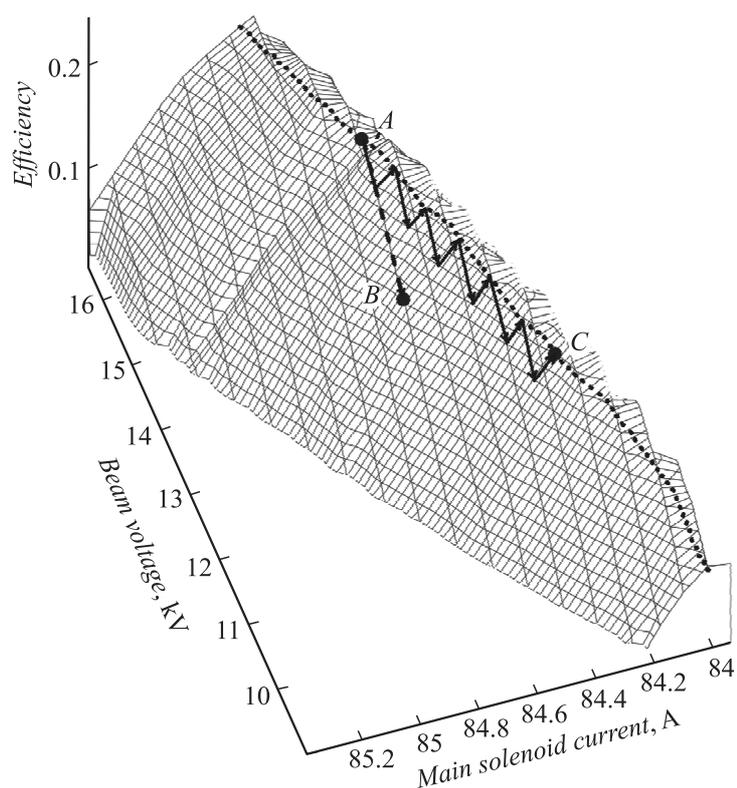


Рис. 3. Зависимость КПД гиротрона от магнитного поля соленоида и напряжения электронного пучка. Алгоритм двухпараметрического управления выходной мощностью гиротрона обозначен стрелками между точками *A* и *C*. Однопараметрическому управлению соответствует переход от *A* к *B*. Режимы генерации в точках *B* и *C* совпадают по мощности микроволнового излучения.

в различных режимах и разработан программный код для двухпараметрического управления мощностью гиротрона (алгоритм изменения напряжения и магнитного поля соответствует сценарию, обозначенному стрелками на рис. 3), что позволяет реализовать предложенный метод на существующих технологических комплексах.

Список литературы

- [1] *Rybakov K.I., Semenov V.E., Egorov S.V., Ereemeev A.G., Plotnikov I.V., Bykov Yu.V.* // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 023 506.1–023 506.9.
- [2] *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 Materials. 2006. V. 15. P. 502–507.
- [3] *Golubev S., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Skalyga V., Vodopyanov A., Zorin V., Bokhanov A.* // Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res. B. 2007. V. 256. P. 537–542.
- [4] *Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I., Denisov G., Bogdashev A., Kalynova G., Semenov V., Zharova N.* // IEEE Trans. on Plasma Science. 2004. V. 1. P. 67–72.
- [5] *Morozkin M.V., Glyavin M.Yu., Denisov G.G., Luchinin A.G.* // Int. J. IRRMM Waves. 2008. V. 29. P. 1004–1010.
- [6] *Glyavin M., Luchinin A., Morozkin M.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 074 706-(1–3).