

## РАДИОФИЗИКА

УДК 621.372.413

О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ КПД  
ЦИКЛОТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

А. В. Пеклевский, В. Л. Саввин

(кафедра радиофизики)

Проведен численный анализ процессов преобразования энергии в циклотронном преобразователе энергии с учетом поля пространственного заряда электронного потока и тормозящего электрического поля в области реверса. Установлено, что при определенных условиях кулоновское поле пучка может заметно улучшить КПД преобразования энергии циклотронного вращения электронов в энергию его поступательного движения (до 90% и более). Введение тормозящего электрического поля в область реверса позволит сократить габариты устройства в целом без понижения уровня КПД преобразователя. Рассматривается возможность работы преобразователя на высоких уровнях мощности (до 50 кВт и более).

Среди первоочередных проблем, возникающих при разработке микроволновых систем передачи энергии, следует выделить увеличение удельной мощности и эффективности приемно-преобразующих устройств, повышение их надежности и экологической безопасности. Циклотронный преобразователь энергии (ЦПЭ) имеет высокие значения выходного напряжения и эффективности преобразования и весьма перспективен для использования в микроволновых системах передачи энергии. По сравнению с полупроводниковыми ректеннами циклотронный преобразователь отличается стабильностью работы, устойчивостью к перегрузкам и полным отсутствием переизлучения на высших гармониках частоты передачи [1–3].

Принцип работы циклотронного преобразователя энергии довольно прост (рис. 1). Цилиндрический электронный поток, вылетающий из электронной пушки, пролетает через резонатор с поперечным электрическим ВЧ-полем, где приобретает дополнительную кинетическую энергию вращательного движения пучка вокруг оси системы с циклотронным радиусом  $R_c$ . При согласовании проводимостей на входе в резонатор вводимая энергия микроволн  $P_\omega$  полностью преобразуется в энергию циклотронного вращения электронов. Затем вращающийся электронный поток попадает в область реверса, где продольная компонента магнитного поля  $B(z)$  изменяется по величине и направлению. Здесь под действием радиальной компоненты магнитного поля энергия циклотронного вращения электронов преобразуется в дополнительную кинетическую энергию их продольного движения, которая позволяет электронам преодолеть тормозящий потенциальный барьер коллектора. При полном оседании электронного потока на поверхность коллектора достигается максимальный ток в нагрузке преобразователя, согласованное значение которой обеспечивает высокую эффективность

преобразования энергии микроволн в энергию постоянного тока [4–6].

На электронный поток в области реверса помимо внешнего магнитного поля действует поле его пространственного заряда. Влияние поля пространственного заряда определяется током  $I$ , потенциалом  $V_0$  и начальным радиусом  $R_0$  пучка и может изменять эффективность процессов преобразования [4]. Сокращение расстояния между резонатором и коллектором приводит к появлению в области реверса тормозящего электрического поля, которое также необходимо учитывать.

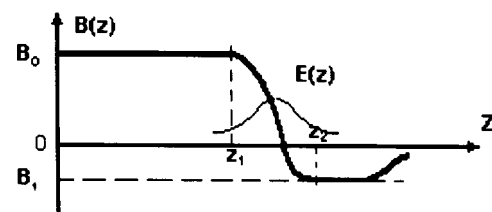
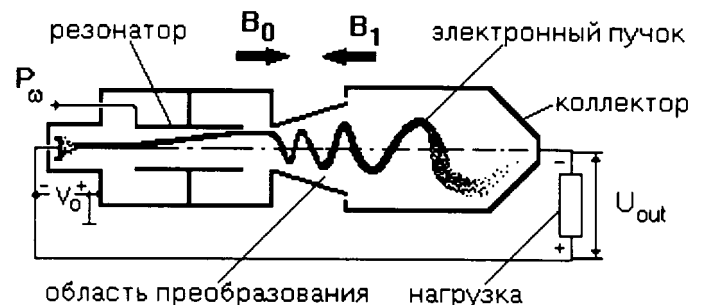


Рис. 1. Схема циклотронного преобразователя энергии:  $B_0$ ,  $B_1$  — начальное и конечное значения индукции магнитного поля в области реверса,  $V_0$  — ускоряющее напряжение электронной пушки,  $U_{out}$  — выходное напряжение

Вопросам детального анализа электронных процессов в области реверса и возможности увеличения

кпд преобразователя посвящена эта работа. Для выявления роли кулоновского взаимодействия в потоке мы сознательно пренебрегли рядом факторов, таких как начальный разброс скоростей в потоке, влияние внешнего экрана, пульсации начального радиуса пучка.

Для численного анализа процессов преобразования энергии в ЦПЭ разработана специальная программа, использующая трехмерную спиралевидную модель электронного потока в виде большого числа (100 и более) элементарных спиралевидных взаимодействующих пучков [4].

Программа позволяла вычислять эффективность преобразования энергии вращения потока в энергию его поступательного движения ( $\eta$ ), разброс продольных скоростей электронов пучка ( $\Delta V_Z$ ), максимальное отклонение пучка от оси системы, форму поперечного сечения потока и контролировать момент оседания электронов на поверхность трубы дрейфа.

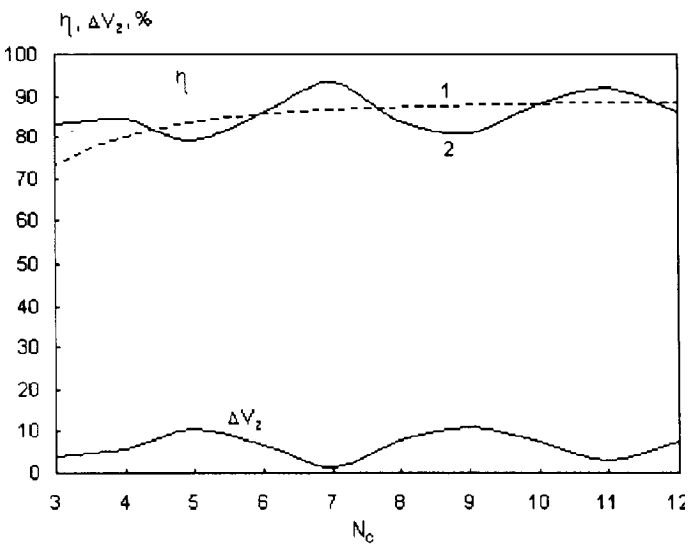


Рис. 2. Зависимость кпд преобразователя при выключенных (1) и включенных (2) кулоновских полях (параметр входной мощности  $W = P_{\omega}/V_0 I = 2$ ,  $g = R_0/R_c = 0,5$ ,  $V_0 = 5$  кВ,  $I = 1,5$  А). На нижней кривой показан разброс продольных скоростей электронов пучка в случае включенных кулоновских полей

Вычисления зависимостей  $\eta$  и  $\Delta V_Z$  от размеров области реверса магнитного поля показали, что при определенных условиях эффективность преобразования с учетом кулоновских сил может быть выше, чем без него (рис. 2). Это можно объяснить тем, что кулоновское поле пучка в присутствии продольного магнитного поля придает электронам пучка дополнительный вращательный момент, вследствие чего пучок начинает вращаться вокруг собственной оси как целое. Исследование механизма возбуждения разброса продольных скоростей в электронном пучке под действием сил пространственного заряда и радиального магнитного поля показало, что одним из условий достижения максимального кпд является соблю-

дение баланса радиальных сил, действующих на электронный пучок, при котором сохраняются форма его поперечного сечения и вращение пучка вокруг своей оси. В численном эксперименте этот баланс устанавливается соотношением между константой реверса магнитного поля  $B_0/B_1$  и длиной области изменения магнитного поля  $N_c$  (выраженной в длинах циклотронных волн), которые определяют форму и интенсивность магнитных полей.

В этом случае вращение потока может приводить к усреднению неоднородности воздействия радиального магнитного поля по сечению пучка и уменьшению разброса продольных скоростей электронов, если ток пучка не превышает бриллюеновского значения. Следует также отметить, что максимальная эффективность преобразования и минимальный разброс продольных скоростей достигаются в том случае, если на длине области преобразования укладывается целое число оборотов пучка вокруг собственной оси.

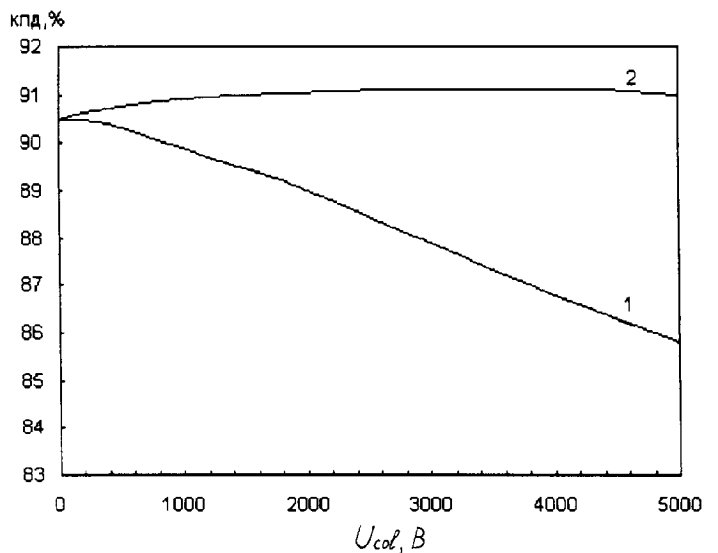


Рис. 3. Зависимость кпд преобразователя для различных профилей поля предколлектора: 1 — линейный, 2 — косинусоидальный профиль ( $N_c = 6$ ,  $W = 2$ ,  $g = 0,5$ ,  $V_0 = 5$  кВ,  $I = 1,5$  А)

Моделирование процессов в области реверса с учетом тормозящего электрического поля показало, что присутствие этого поля позволяет поддерживать достигнутый баланс сил и вращение электронного пучка вокруг своей оси даже в конце области, когда наблюдается увеличение радиуса пучка и ослабление действия кулоновских сил. В случае линейного профиля электрического поля эффективность преобразования изменяется незначительно: с увеличением тормозящего потенциала коллектора  $U_{col}$  до 5 кВ кпд уменьшается на 5–6% (рис. 3). При косинусоидальном профиле поля наблюдается даже некоторый прирост кпд из-за увеличения плотности пространственного заряда потока вследствие его замедления. Таким образом, включение тормозящего электричес-

кого поля в области реверса позволит сократить габариты ЦПЭ без ухудшения его выходных характеристик.

Процесс преобразования исследовался при различных значениях параметра поперечного сечения пучка  $g = R_0/R_c$  (до 0,5) и параметра входной мощности  $W = P_\omega/V_0I$  (до 5) и показал, что увеличение тока и начального радиуса потока, выбор оптимальных размеров области реверса с тормозящим полем позволяют повысить значения удельной мощности циклотронного преобразователя (до 50 кВт и более) с кпд на уровне 80–90%.

#### Литература

1. СВЧ-энергетика // Под ред. Э. Окресса. М., 1971.
2. Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л. // УФН. 1977. **123**, № 4. С. 633.
3. Ванке В.А., Лопухин В.М., Росновский В.К. и др. // Радиотехн. и электроника. 1982. **27**, № 5. С. 1014.
4. Ванке В.А., Зайцев А.А., Лопухин В.М. и др. // Там же. 1978. **23**, № 6. С. 1217.
5. Блейвас И.М., Ванке В.А., Рыбникова Л.М. и др. // Там же. 1982. **27**, № 5. С. 1009.
6. Vanke V.A., Savvin V.L. // Proc. Second Intern. Symp. — SPS'91, Power from Space. Paris, 1991. P. 515.

Поступила в редакцию  
19.09.97