

01;09
©1994

ВЛИЯНИЕ ПОПУТНОЙ ВОЛНЫ НА РАБОТУ ОДНОРОДНОЙ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛОВ

С.Д.Коровин, С.Д.Полевин, А.М.Ройтман, В.В.Ростов

В большинстве экспериментальных исследований релятивистской лампы обратной волны используется вывод СВЧ излучения в сторону коллектора за счет отражения генерируемой встречной волны от запредельного сужения. В работах [1,2] указывалось, что наличие попутной волны заметно влияет на процессы энергообмена, если амплитуда ее основной гармоники настолько велика, что приращение энергии электронов на длине когерентного взаимодействия $L_k = \lambda/2$ сравнимо с начальной энергией частицы:

$$\left| \int_z^{z+L_k} eE_0 dr \right| \geq mc^2(\gamma_0 - 1), \quad (1)$$

где λ — длина волны, e , m — заряд и масса электрона, c — скорость света, γ_0 — релятивистский фактор, E_0 — напряженность электрического поля основной гармоники. Однако детального исследования этого влияния на работу ЛОВ не проводилось.

В настоящей работе решалась самосогласованная система уравнений, аналогичная [3], описывающая энергообмен между электронным пучком и электромагнитным полем в стационарном режиме. Рассматривалась лампа обратной волны с регулярной электродинамической структурой (однородная ЛОВ). Предполагалось, что на влете в пространство взаимодействия электроны попадают в поле двух волн и одновременно взаимодействуют с -1 пространственной гармоникой обратной волны и основной гармоникой попутной. Выбирались параметры электронного пучка и электромагнитной волны, близкие к реализуемым в эксперименте: $\gamma_0 = 2.2$, $I = 4$ кА, $Z = 1.2$ Ом, I — ток пучка, Z — сопротивление связи с -1 гармоникой электромагнитной волны. Полный угол пролета электронов в поле попутной волны на длине периодической структуры изменялся в расчетах до 7π . Следует отметить, что протяженности пространств взаимодействия с -1 и основной гармониками могут не совпадать, если длина периодической структуры, определяющая наличие -1 гармоники, не равна полной длине дрейфа электронов в поле попутной волны.

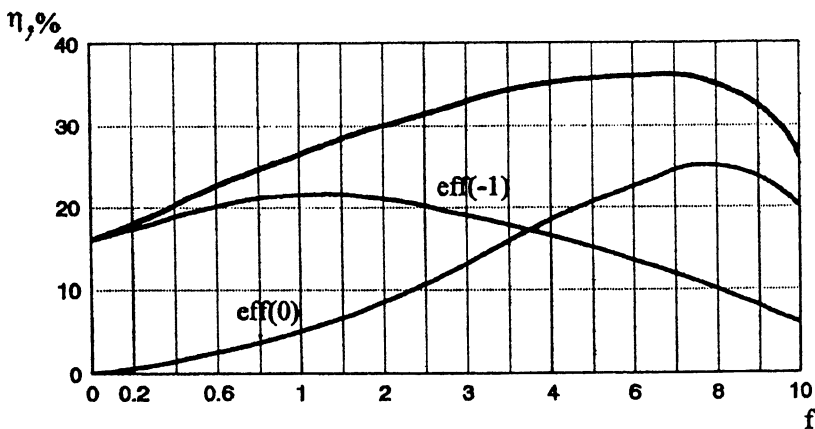


Рис. 1. Величина энергообмена электронного пучка с электромагнитным полем под действием -1 гармоники обратной волны ($\text{eff}(-1)$), основной гармоники попутной волны ($\text{eff}(0)$) и общая эффективность энергообмена в зависимости от соотношения амплитуд гармоник f .

Учет взаимодействия пучка с попутной волной приводит к дополнительному энергообмену электронного потока с высокочастотным полем под воздействием основной гармоники попутной волны и изменению процесса его модуляции, что в свою очередь значительно влияет на взаимодействие с обратной волной.

Характер влияния попутной волны зависит от нескольких факторов, основными из которых являются соотношения амплитуд участвующих во взаимодействии гармоник $f = \frac{E_0}{E_{-1}}$ и их фаз на входе в пространство взаимодействия $\psi = \varphi_0 - \varphi_{-1}$, где E_0 , φ_0 , E_{-1} , φ_{-1} — амплитуды и фазы нулевой гармоники попутной волны и -1 гармоники обратной волны соответственно.

Изменение процессов энергообмена в зависимости от f рассматривалось в предположении синфазности волн $\psi_{z=0} = 0$ и без учета пространственного заряда пучка. Согласно [4], соотношение амплитуд -1 и 0 (основной) гармоник симметричных E -волн в слабофривированном волноводе зависит от геометрии электродинамической системы и радиуса трубчатого пучка. В экспериментах величина f обычно лежит в диапазоне от 2 до 6.

Расчеты показывают, что наличие попутной волны приводит к более интенсивной модуляции пучка и при $f \leq 4$, когда соотношение (1) еще не выполняется, фаза высокочастотного тока в оптимальных по энергообмену режимах смещается к центру области тормозящих фаз -1 гармоники обратной волны. В этом случае под воздействием обратной волны электронный пучок теряет уже до 22% своей началь-

ной кинетической энергии (рис. 1). Одновременно с ростом f возрастает значение энергообмена с попутной волной, а его знак зависит от угла пролета электронов в поле попутной волны и является положительным при углах, кратных 2π . Оптимальная длина периодической структуры уменьшается от $\xi_k = 3.6$ для $f = 0$ до $\xi_k = 2.5$ для $f = 4$, где $\xi = kz/2\gamma_0^2$. При $f > 4$ модуляция электронов по скорости становится настолько интенсивной, что не удается обеспечить благоприятной фазировки электронов в поле обратной волны. Эффективность энергообмена с обратной волной падает. Оптимальная протяженность пространства взаимодействия возрастает. Вместе с тем начинает выполняться соотношение (1) и часть электронов под воздействием электрического поля основной гармоники быстро теряет свою кинетическую энергию и выходит из взаимодействия. В этих условиях основную роль в энергообмене играет попутная волна (рис. 1). В результате, несмотря на снижение эффективности взаимодействия с обратной волной, общий КПД прибора остается высоким. Исходя из проведенных расчетов, режиму с максимальной эффективностью соответствовало соотношение $f = 6 - 8$, когда теоретический КПД однородной ЛОВ достигал 36%. При $f \geq 10$ ухудшается процесс группирования электронов в компактные, долгоживущие сгустки и КПД прибора падает.

Повысить эффективность энергообмена при любом значении $f \leq 10$ можно, если обеспечить начальную модуляцию электронов в поле только попутной волны, а взаимодействие с обратной волной осуществить в тот момент, когда фаза формируемого сгустка соответствует его торможению. На практике такой вариант можно реализовать при смещении гофрированной структуры относительно запредельного сужения или уменьшения амплитуды гофрировки в начале пространства взаимодействия. Численные расчеты предсказывают повышение эффективности ЛОВ за счет этого еще в 1.1–1.2 раза.

Как показали расчеты, основной причиной влияния на процессы модуляции и энергообмена соотношения фаз $\psi_z = 0$ является то, что их сдвиг приводит к смещению начальной фазы высокочастотного тока относительно обратной волны. Максимальная эффективность энергообмена достигается при небольшом (0.2π) смещении начальной фазы ВЧ тока в область торможения обратной волной (КПД 40% при $f = 2$). При увеличении сдвига фаз эффективность энергообмена уменьшается и становится минимальной в случае противофазных полей. Одновременно с изменением соотношения фаз изменяется оптимальная длина гофрированной структуры. При фиксированных геометрии периодической

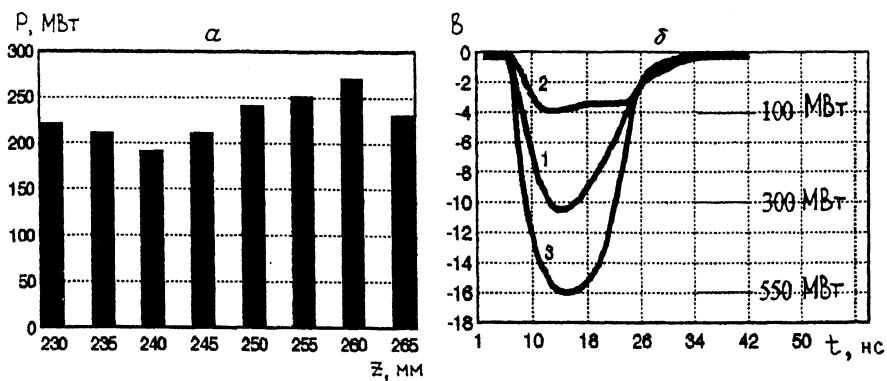


Рис. 2. Зависимость мощности микроволнового излучения от координаты вывода пучка из пространства взаимодействия (а) и огибающие СВЧ импульса: 1 — без смещения гофрированной структуры от запредельного сужения, 2 — со смещением 11 мм, 3 — со смещением 36 мм (б).

структуры и параметрах электронного пучка изменение в соотношении фаз может приводить к срыву стационарного режима генерации. В экспериментах величина сдвига фаз зависит от конструкции запредельного сужения, определяющего фазу отражения попутной волн, а также от смещения гофрированной структуры относительно запредельного сужения.

Таким образом, теоретическая эффективность однородной релятивистской ЛОВ при наличии взаимодействия с попутной волной и в предположении отсутствия пространственного заряда может достигать 45%. Учет последнего не вносит значительных изменений в закономерности процессов модуляции и энергообмена. Однако влияние сил пространственного заряда пучка снижает амплитуду ВЧ тока, что приводит к падению КПД. При соответствующем реализованному в эксперименте значению пространственного заряда пучка, эффективность энергообмена уменьшается в 1.3 раза.

Экспериментальные исследования проводились на ускорителе "Синус-6" [5], созданном в Институте сильноточной электроники СО РАН. Электродинамическая система ЛОВ состояла из набора колец из нержавеющей стали. Полная длина периодической структуры составляла 161 мм, период гофрировки 16.1 мм. Глубина гофрировки 2.2 мм, что при диаметре трубчатого электронного пучка 18 мм определяет $f \approx 4$. Для транспортировки релятивистского электронного пучка (РЭП) использовался импульсный соленоид с напряженностью магнитного поля до 25 кЭ.

В экспериментах исследовалась зависимость мощности выходного излучения от координаты вывода РЭП из взаимодействия с попутной волной при постоянном угле пролета в поле обратной волны. Для этого пучок высаживался магнитным полем на цилиндрический коллектор за гофрированной структурой. Изменением протяженности магнитного поля достигалось изменение положения места высадки и соответственно угла пролета электронов в поле попутной волны. Полученные результаты представлены на рис. 2, а. Максимальная мощность, полученная в этой серии экспериментов составила 300 Мвт при КПД 22%. Длина волны излучения 3.25 см.

В других экспериментах проводилась оптимизация эффективности энергообмена по смещению гофрированной структуры относительно запредельного сужения (рис. 2, б). При смещении 36 мм и параметрах пучка, близких к расчетным, пиковая мощность СВЧ излучения достигала 550 МВт при КПД 25%. Для аналогичной электродинамической системы, когда были снижены значения напряжения на катоде и тока пучка, мощность излучения составила 400 МВт, что соответствовало КПД 30%. Было замечено, что смещение гофрированной структуры относительно запредельного сужения приводит к периодическому изменению выходной мощности излучения. Одновременно наблюдался переход от стационарного к нестационарным режимам генерации.

Таким образом, за счет использования взаимодействия с попутной волной реализована однородная релятивистская ЛОВ с эффективностью 30%.

Список литературы

- [1] *Быков Н.М. и др.* В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1988. С. 101–124.
- [2] *Абубакиров Э.Б., Петелин М.И.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 6. С. 1085–1089.
- [3] *Коровин С.Д., Полевин С.Д., Ройтман А.М., Ростов В.В.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18 Вып. 8. С. 63–67.
- [4] *Ковалев Н.Ф.* // Электроника СВЧ. 1978. В. 3. С. 102–106.
- [5] *Быков Н.М. и др.* // ПТЭ. 1991. В. 2. С. 38–40.

Институт сильноточной
электроники СО РАН
Томск

Поступило в Редакцию
12 октября 1993 г.