ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2022, том 86, № 1, с. 88–92

УДК 621.385.624

ОСОБЕННОСТИ ГРУППИРОВАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ В МОЩНЫХ КЛИСТРОНАХ

© 2022 г. В. Е. Родякин[1], *, В. Н. Аксенов[2]

[1]Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения "Федеральный научно-исследовательский центр "Кристаллография и фотоника" Российской академии наук", Шатура, Россия

[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", физический факультет и Международный лазерный центр, Москва, Россия

*E-mail: vrodyakin@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2021 г.
После доработки 06.09.2021 г.
Принята к публикации 22.09.2021 г.

Теоретически исследованы особенности группирования кольцевых электронных потоков в мощных клистронах. Показано, что использование кольцевых потоков позволяет улучшить процесс группирования за счет уменьшения эффекта расслоения и провисания потенциала. Определены параметры кольцевых пучков, от которых зависит степень улучшения эффективности группирования. Показано, что при сохранении эффективности группирования использование кольцевых потоков позволяет увеличить силу тока пучка и выходную мощность на 30–100% по сравнению со сплошными электронными пучками. Определены зависимости степени возможного повышения силы тока от параметров кольцевых электронных пучков.

DOI: 10.31857/S0367676522010215

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное расширение применения мощных клистронных усилителей СВЧ излучения в научных, гражданских и военных областях требует увеличения их мощности, эффективности и продвижения в область миллиметровых длин волн. Одним из способов решения этих задач является применение распределенных электронных потоков (кольцевых, многолучевых, ленточных). Исследованиям особенностей группирования в мощных клистронах многолучевых и ленточных электронных пучков посвящено большое количество научных работ. Активное же применение кольцевых пучков сдерживается с одной стороны трудностями их формирования электронно-оптической системой клистрона, с другой стороны слабой изученностью условий, при которых реализуются преимущества от их использования в клистронах по сравнению со сплошными электронными потоками.

Преимущество кольцевых пучков перед сплошными заключается в том, что при их использовании улучшаются условия группирования электронного потока в сгустки за счет увеличения коэффициента взаимодействия пучка с полями резонаторов, а также уменьшения негативных эффектов расслоения и провисания потенциала. Для исследования влияния этих эффектов в кольцевых и сплошных электронных потоках необходимо провести сравнительный анализ их группирования с помощью двух с половиной мерный (2.5-D) численной модели. В данной работе приводятся результаты такого анализа.

При анализе электронно-волнового взаимодействия в клистронах использовался 2.5-D программный комплекс PARS, разработанный авторами [1] на основе модернизации программы "Арсенал-МГУ", зарекомендовавшей себя в нашей стране и за рубежом как надежный инструмент для разработки и исследований многочисленных клистронных усилителей [2–5].

ПАРАМЕТР ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА

Продольные силы взаимного отталкивания между электронами пучка, вызванные их пространственным зарядом, являются основным фактором, влияющим на процесс группирования мощных электронных пучков. Кроме того, на процесс группирования заметное влияние оказывает радиальная неоднородность сил пространственного заряда, которая является основ-

ной причиной расслоения. Данная неоднородность включает в себя как радиальное провисание потенциала, так и радиальную зависимость коэффициента редукции плазменной частоты. Оба фактора приводят к отличию протекания процесса группирования в различных слоях электронного пучка, что не позволяет обеспечить условия оптимального группирования во всех слоях одновременно, и вызывает уменьшение эффективности группирования. В работе [6] на примере однокаскадного клистрона было показано, что основной характеристикой электронного потока, определяющей влияние на процесс его группировки со стороны сил пространственного заряда, служит следующий безразмерный параметр пространственного заряда:

$$\Omega_q = \frac{1+\gamma_0}{2\sqrt{\gamma_0}}\left(\frac{\omega_q}{\omega}\right), \qquad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, $\frac{\omega_q}{\omega} = \frac{\omega_p}{\omega} R(\gamma_b, \sigma_{b0}, \sigma_b)$ – относительная редуцированная плазменная частота электронного потока, $\gamma_0 = 1 + \frac{\eta V_0}{c^2}$, $\gamma_b = \beta_e r_b$, $\beta_e = \frac{\omega}{\nu_0 \gamma_0}$, $\nu_0 = \frac{c}{\gamma_0}\sqrt{\gamma_0^2 - 1}$, $\frac{\omega_p}{\omega} = 10^{-3}\sqrt{\frac{\gamma_0 P_\mu}{\pi \eta^{1/2} \varepsilon_0 (1+\gamma_0)^{3/2} \gamma_b^2 (1-\sigma_{b0}^2)}}$ – относительная плазменная частота электронного потока, $\sigma_{b0} = \frac{r_{b0}}{r_b}$, ε_0 – электрическая постоянная вакуума, r_b – внешний радиус пучка, r_{b0} – внутренний радиус пучка, f – частота входного сигнала клистрона, $P_\mu = 10^6 \frac{I_0}{V_0^{3/2}}$ – микропервианс электронного пучка, I_0, V_0 – сила тока и ускоряющее напряжение пучка, $\sigma_b = \frac{r_b}{r_T}$ – коэффициент заполнения пучком трубы дрейфа, $\eta = \frac{e}{m_0}$, ε_0 – электрическая постоянная вакуума, r_T – радиус трубы дрейфа, ν_0, e и m_0 – скорость, заряд и масса покоя электрона, c – скорость света, $R(\gamma_b, \sigma_{b0}, \sigma_b)$ – коэффициент редукции плазменной частоты [7].

Интервал изменения параметра пространственного заряда от 0.05 до 0.2 охватывает практически весь спектр электронных пучков, используемых в мощных клистронах. Электронные пучки с низким значением Ω_q (0.05–0.08) обычно применяются в высокоэффективных клистронах. Пучки с большими значениями Ω_q используются в широкополосных клистронах, а также в клистронах коротковолновой части СВЧ диапазона. Поскольку для кольцевых электронных потоков коэффициент редукции, а следовательно, и параметр пространственного заряда Ω_q меньше, чем для сплошных, то следует ожидать улучшения условий для эффективного группирования при переходе от сплошных к кольцевым пучкам.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ КПД КЛИСТРОНОВ СО СПЛОШНЫМИ И КОЛЬЦЕВЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПОТОКАМИ

Для оценки степени повышения эффективности многокаскадного группирования при таком переходе был проведен сравнительный численный анализ зависимости предельных КПД клистрона дециметрового диапазона с $f = 323$ МГц от числа резонаторов основной гармоники для сплошного и кольцевого электронного пучка с одинаковым значением силы тока. Для исследований были выбраны следующие параметры электронного пучка: $V_0 = 88$ кВ, $I_0 = 17.25$ А, $r_b = 2.8$ см, $r_T = 3.6$ см. Эти параметры соответствуют известному суперклистрону непрерывного действия со сплошным электронным пучком TH2089 [8] французской компании Thales. Параметр пространственного заряда в этом приборе $\Omega_q = 0.075$. В качестве кольцевого пучка был выбран электронный поток с $\sigma_{b0} = 0.7$. Поиск предельных значений КПД для приборов со сплошным и кольцевым электронным потоком для каждого числа резонаторов проводился с помощью алгоритма автоматической оптимизации комплекса программ PARS. В качестве оптимизируемых параметров выступали: входная мощность, длины труб дрейфа, частотные отстройки резонаторов и величина нагруженной добротности выходного резонатора. Целевой функцией выступало значение электронного КПД. При этом пучки считались замагниченными, а для их анализа использовалась 1.5-D многослойная модель. В качестве примера оптимизации на рис. 1 представлены результаты группирования в оптимизированном семи-резонаторном клистроне с кольцевым электронным пучком.

На рис. 1*а* приведены продольные распределения первой и второй гармоник конвекционного тока, возбуждаемых в пучке при группировании. Кривая *3* на рисунке представляет собой продольное распределение удельной кинетической энергии электронов в пучке. Характер группировки показан на фазовой диаграмме (рис. 1*б*). Из нее следует, что оптимизированный по КПД клистрон имеет удлиненные трубы дрейфа, что позволяет выравнивать скорости электронов в сгустке и постепенно собирать периферийные электроны ближе к центру сгустка, повышая тем самым эффективность группирования.

Полученные в результате оптимизационных расчетов сравнительные зависимости предель-

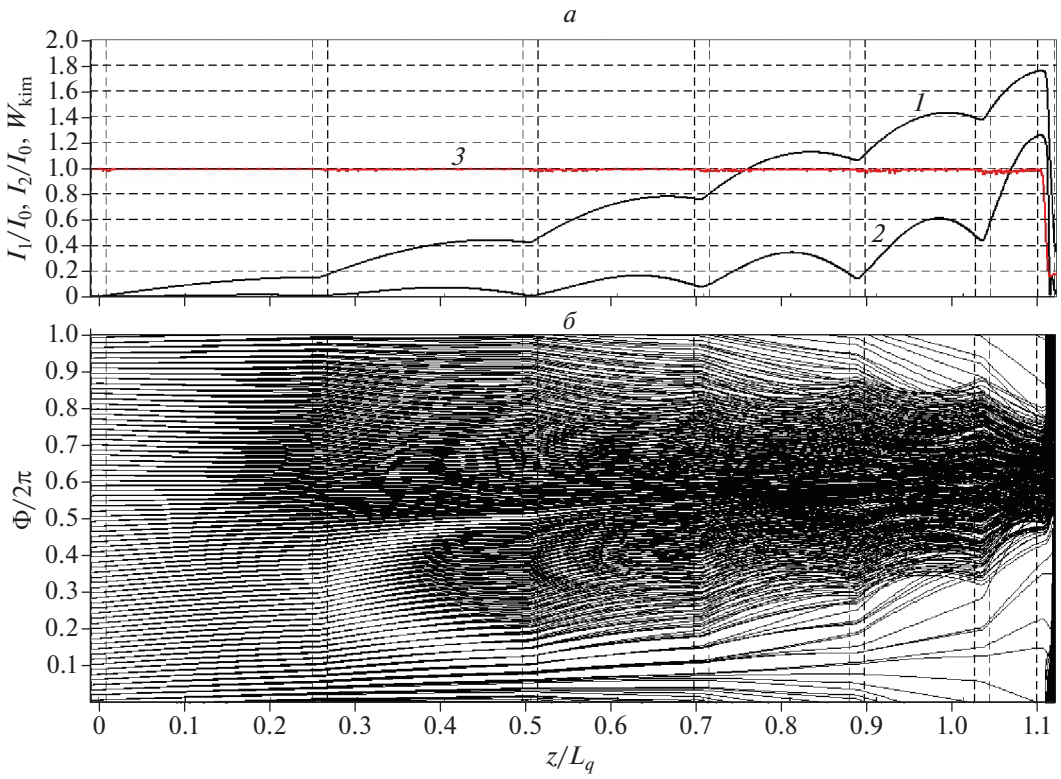

Рис. 1. Рассчитанные продольные зависимости первой (*1*) и второй (*2*) гармоник конвекционного тока, а также удельной кинетической энергии электронов (*3*) (*а*); Фазовая диаграмма электронов в оптимизированном семи-резонаторном клистроне с кольцевым электронным пучком (*б*).

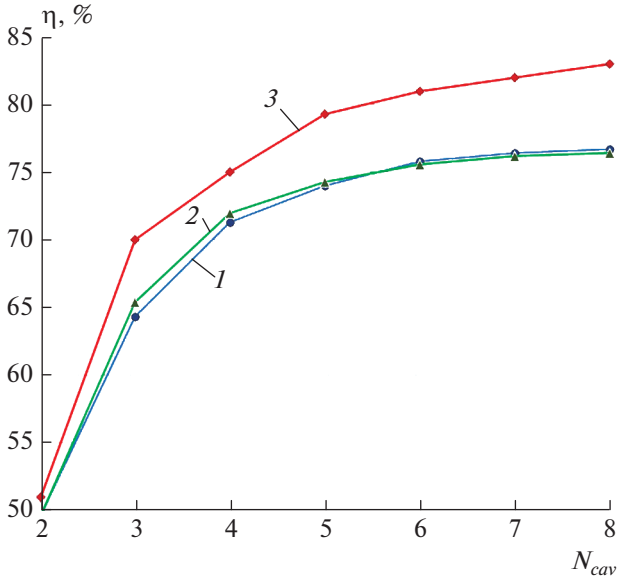

Рис. 2. Зависимости предельных электронных КПД от числа резонаторов для клистронов со сплошным пучком $I_0 = 17.25$ А, $\Omega_q = 0.075$ (*1*), кольцевым пучком $I_0 = 27.3$ А, $\Omega_q = 0.075$ (*2*), кольцевым пучком $I_0 = 17.25$ А, $\Omega_q = 0.06$ (*3*).

ных значений электронного КПД для клистронов со сплошным (кривая *1*) и кольцевым пучком (кривая *3*) представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, использование кольцевого пучка с выбранными параметрами позволяет в среднем увеличить КПД на 5% даже для многорезонаторных клистронов.

В работе [6] на основе исследований нелинейных процессов группирования в однокаскадном клистроне, был сделан вывод о том, что параметр пространственного заряда Ω_q является универсальным параметром, характеризующим эффективность группирования. Для обобщения этого вывода на случай многокаскадного группирования был проведен поиск предельных КПД при различном числе резонаторов для кольцевого пучка с тем же значением $\sigma_{b0} = 0.7$, но имеющим большее значение силы тока $I_0 = 27.3$ А, соответствующее тому же значению $\Omega_q = 0.075$, что и для сплошного пучка. На рис. 2 зависимость предельного КПД для такого электронного пучка представлена кривой *2*, которая практически совпадает с предельной кривой *1*. Таким образом, независимо от того, какой электронный пучок используется, КПД клистрона в основном определяется величиной Ω_q.

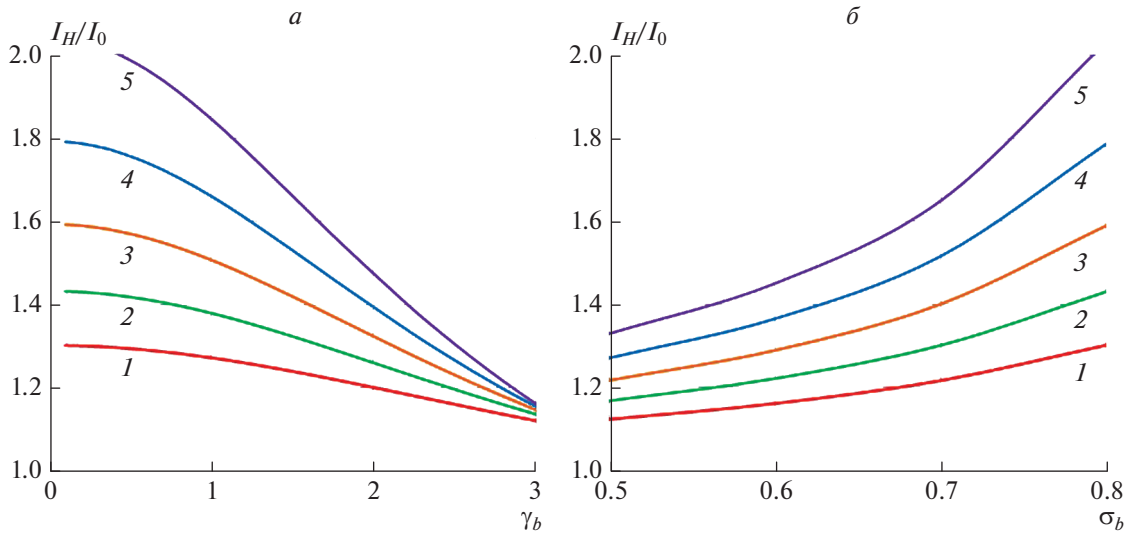

Рис. 3. Зависимости увеличения силы тока при замене кольцевого пучка сплошным при сохранении значения КПД для различных значений σ_{b0}: 0.5 (*1*), 0.6 (*2*), 0.7 (*3*), 0.8 (*4*), 0.9 (*5*) от параметра γ_b при $\sigma_b = 0.8$ (*а*) и параметра σ_b при $\gamma_b = 0.4$ (*б*).

ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОГО ПОВЫШЕНИЯ СИЛЫ ТОКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОЛЬЦЕВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

Данный факт позволяет провести анализ параметров, от которых зависит величина возможного повышения силы тока при переходе от сплошных к кольцевым пучкам при сохранении той же эффективности группирования, что и для сплошного пучка. Для этого, используя формулу (1), запишем равенство для параметров пространственного заряда для сплошного пучка с током I_0 и кольцевого пучка с током I_H:

$$\frac{I_0 R^2(\gamma_b, 0, \sigma_b)}{r_b^2} = \frac{I_H R^2(\gamma_b, \sigma_{b0}, \sigma_b)}{\left(r_b^2 - r_{b0}^2\right)}, \qquad (2)$$

Отсюда получим выражение для относительного увеличения силы тока кольцевого пучка по сравнению со сплошным, при котором параметры пространственного заряда, а следовательно, и КПД клистронов для обоих типов пучков совпадают:

$$\frac{I_H}{I_0} = \left[\frac{R(\gamma_b, 0, \sigma_b)}{R(\gamma_b, \sigma_{b0}, \sigma_b)}\right]^2 \left(1 - \sigma_{b0}^2\right). \qquad (3)$$

Из выражения (3) следует, что относительный выигрыш в величине силы тока, а следовательно, и мощности, при замене сплошного пучка на кольцевой зависит от трех параметров. На рис. 3*а* приведены зависимости этой величины от параметра γ_b при различной толщине кольцевого потока σ_{b0} для практически значимого коэффициента заполнения $\sigma_b = 0.8$.

Из анализа зависимостей видно, что чем тоньше кольцевой пучок, тем больше выигрыш по величине силы тока. Поскольку при больших значениях параметра γ_b заметно уменьшается коэффициент взаимодействия электронного пучка с полями резонаторов, то в большинстве высокоэффективных клистронов используются электронные пучки с параметром $\gamma_b < 1.0$, В этой области при использовании кольцевых пучков можно увеличить силу тока на 30–100% в зависимости от его толщины. На рис. 3*б* приведены зависимости относительного увеличения силы тока кольцевого пучка от коэффициента заполнения σ_b при различных значениях толщины пучка σ_{b0} для типичного значения $\gamma_b = 0.4$. Приведенные зависимости показывают, что наибольшего увеличения силы тока можно добиться при замене сплошного пучка на тонкий кольцевой с внешним радиусом близким к радиусу трубы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили, что использование кольцевых электронных потоков позволяет улучшить процесс группирования в мощных клистронах и повысить их КПД. При этом для многорезонаторных высокоэффективных клистронов, в которых увеличение КПД на каждый процент дается с большим трудом, увеличение КПД на 5–6% за счет использования кольцевых потоков является весьма эффективным решением задачи увеличения их КПД.

Подтвержден и обобщен на случай многокаскадного группирования вывод работы [6] о том, что основным параметром, характеризующим эффективность группирования, является параметр пространственного заряда Ω_q. Его использование

для оценок предельных КПД является более обоснованным, чем величины микропервеанса, который до настоящего времени широко применяется большинством разработчиков.

Показано, что замена сплошного электронного пучка на кольцевой позволяет увеличить силу тока пучка и мощность прибора на 30–100% при том же значении КПД. Получено аналитическое выражение для выбора параметров кольцевого электронного потока, обеспечивающую такую замену.

Данные выводы справедливы как для однолучевых, так и многолучевых клистронов. Использование кольцевых пучков в многолучевых клистронах для увеличения их мощности и эффективности наиболее перспективно в дециметровом и сантиметровом диапазонах, где возможно обеспечить формирование таких пучков. В миллиметровом диапазоне, где использование многолучевых конструкций ограничено малыми поперечными размерами электродинамических структур, применение кольцевых электронных потоков может позволить обеспечить рекордные значения выходной мощности однолучевых клистронов [9].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках темы государственного задания ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н.* // Журн. радиоэлектрон. 2019. № 6. С. 21.
2. *Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E. et al.* // KEK Rep. 1997. No. 1. P. 185.
3. *Ding Y., Xiao X., Rodyakin V.E., Sandalov A.N.* // Proc. 2nd ICMMWT (Beijing, 2000). P. 299.
4. *Shen B., Ding Y., Sandalov A.N. et al.* // Proc. IVESC2004 (China, 2004). P. 312.
5. *Shen B., Ding Y., Zhang Z. et al.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. V. 61. No. 6. P. 1848.
6. *Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н.* // Журн. радиоэлектрон. 2020. № 12. С. 33.
7. *Branch G.M., Mihran T.G.* // IRE Trans. Electron Devices. 1955. V. 2. No. 2. P. 3.
8. *Bastien C., Faillon G., Simon M.* // Proc. IEDM 1982. (San Francisco, 1982). P. 190.
9. *Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н.* // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. и астрон. 2021. № 2. С. 29.

Features of the hollow electron beams bunching in high-power klystrons

V. E. Rodyakin[a], *, V. N. Aksenov[b]

[a] *Institute on Laser and Information Technologies – Branch of the Federal Scientific Research Centre “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Shatura, 140700 Russia*

[b] *Physics Department and International Laser Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: vrodyakin@mail.ru*

The results of a theoretical study of the features of the hollow electron beams bunching in high-power klystrons are presented. It is shown that the use of hollow beams can improve the bunching process by reducing the effect of radial stratification and potential depression. The parameters of hollow beams, which determine the degree of improvement in the bunching efficiency, are determined. It is shown that, while maintaining the bunching efficiency, the use of hollow beams can increase the beam current and output power by 30–100% compared to solid electron beams. The dependences of the degree of possible current increase on the parameters of hollow electron beams are determined.