РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Предельные значения КПД мощных клистронов

В. Е. Родякин^{1, *a*} В. Н. Аксенов^{1, 2, 6}

¹ Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

Россия, 140700, Московская область, г. Шатура, ул. Святоозерская, д. 1 ² Физический факультет и Международный лазерный центр,

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Россия, 119992, г. Москва, Ленинские горы, д. 1.

Поступила в редакцию 23.07.2021, после доработки 06.08.2021, принята к публикации 06.08.2021.

Представлены результаты теоретического исследования процессов группирования в мощных многорезонаторных клистронах. Исследования проводились с использованием одномерной и двумерной численных моделей при различных значениях параметра пространственного заряда. Приводятся данные о влиянии эффектов расслоения на КПД клистронов при различном числе группирующих резонаторов. В результате оптимизации параметров резонаторов определены предельные значения КПД, достижимые при различных значениях параметра пространственного заряда. Проводится сравнение полученной фундаментальной зависимости предельных значений КПД от параметра пространственного заряда с эмпирическими оценками других авторов, а также с экспериментальными данными, полученными для рекордных клистронов в ведущих клистронных центрах в нашей стране и за рубежом. Показано, что параметр пространственного заряда является универсальной характеристикой, определяющей зависимость КПД многорезонаторных клистронов от свойств используемого электронного потока. Обозначены перспективы повышения КПД многорезонаторных клистронов.

Ключевые слова: электровакуумные приборы СВЧ, резонаторы, электронные пучки, многорезонаторные клистроны, группирование электронных пучков, пространственный заряд, электронный КПД.

УДК: 53.06, 537.5, 621.385.624. PACS: 41.75.Fr, 85.45.Bz, 84.40.-х.

введение

Постоянное расширение применения мощных клистронных усилителей СВЧ-излучения в научных, гражданских и военных областях требует увеличения их мощности и эффективности. Для этого необходимо совершенствование конструкций данных приборов и проведение многочисленных исследований для решения физических и технических проблем, возникающих на пути поиска оптимальных параметров приборов. Из-за большого количества параметров улучшение рабочих характеристик мощных многорезонаторных клистронов является многофакторной задачей, которая усложняется нелинейным характером физических процессов, вызванных влиянием пространственного заряда плотных электронных пучков.

Для решения этой задачи необходимо проведение оптимизационных численных расчетов системы взаимодействия приборов с помощью электронноволновых программ. В течение последних 50 лет происходило постоянное совершенствование алгоритмов таких программ. С учетом особенностей физических процессов в системе взаимодействия клистрона в них применяются различные модели, позволяющие упростить нахождение решения совместной системы уравнений Максвелла и уравнений движения заряженных частиц и значительно сократить время численных расчетов приборов и оптимизации их параметров.

Одномерные (1D) модели [1–3] позволяют учесть продольное кулоновское взаимодействие потока и при расчетах клистронов оценить выходные характеристики приборов, такие как КПД, выходная мощность, усиление и полоса. Данные программы до сих пор активно используются в различных клистронных центрах мира. Относительно простые модели, заложенные в данные программы, обеспечивают высокую скорость расчетов и позволяют проводить оптимизацию параметров системы взаимодействия клистронов.

Однако для разработки высокоэффективных клистронов, для которых характерны сильно нелинейные режимы работы, аналитического или одномерного численного рассмотрения недостаточно. В работе [4] были показаны пределы применимости аналитических и одномерных численных моделей для описания нелинейных процессов в клистронах. Двумерные (2D) и двух с половиной мерные (2.5D) численные модели [5–7] позволяют учесть большее количество факторов, влияющих на физические процессы в клистронах, и обеспечивают хорошее соответствие результатов с экспериментом. Однако они требуют намного больше вычислительных ресурсов, чем 1D-программы и для автоматической оптимизации обычно не используются.

Исследованию нелинейных эффектов при группировании электронных потоков в клистронах с использованием аналитических и численных моделей было посвящено большое количество научных работ.

^a E-mail: vrodyakin@mail.ru

⁶ E-mail: v.aks@mail.ru

Однако большинство из них касалось рассмотрения влияния того или иного нелинейного эффекта на примере отдельного прибора, что ограничивало понимание закономерностей их влияния при различных параметрах электронных потоков, используемых в мощных клистронах.

С целью систематизации и обобщения данных о влиянии различных одномерных и двумерных нелинейных явлений на физические процессы в системе взаимодействия мощных клистронов в работе [4] были приведены результаты исследований предельных значений КПД двухрезонаторных клистронов при различных значениях параметра пространственного заряда. В продолжении данной работы были проведены исследования зависимости предельных значений КПД многорезонаторных клистронов от числа резонаторов при различных значениях параметра пространственного заряда электронного пучка. Исследования проводились как с помощью 1Dпрограммы «Клистрон-МГУ» [1], так и с помощью 2.5D-комплекса программ PARS [8]. Этот комплекс программ был разработан авторами на основе модернизации программы «Арсенал-МГУ», зарекомендовавшей себя в нашей стране и за рубежом как надежный инструмент для разработки многочисленных клистронных усилителей [6, 9-11]. Для автоматического поиска оптимальных параметров исследуемых приборов был разработан специальный модуль автоматической оптимизации, который был включен как в 1D-программу, так и в 2.5D-комплекс программ PARS.

1. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КЛИСТРОНОВ

Исследуются особенности группирования в многорезонаторном клистроне аксиально-симметричного электронного пучка с ускоряющим напряжением V_0 и силой тока I_0 , модулированного высокочастотным сигналом входного резонатора на частоте f. В настоящей работе не рассматривается рекуперация энергии в коллекторе, а полный КПД клистрона определяется как

$$\eta = \frac{P_{\rm out}}{P_0} = \eta_{el}\eta_{\rm out},$$

где $P_{\rm out} = \eta_{\rm out} P_{RF}$ — выходная СВЧ мощность прибора в нагрузку, $P_0 = I_0 V_0$ — мощность немодулированного электронного потока, $P_{RF} = \eta_{el} P_0$ — СВЧ мощность, генерируемая модулированным электронным потоком в выходном резонаторе, η_{el} — электронный КПД клистрона, η_{out} — КПД выходной системы. КПД выходной системы высокоэффективных клистронов может принимать значения от 99% в *L*-диапазоне до 70% в *W*-диапазоне. В данной работе при оценках предельных значений КПД будем полагать $\eta_{\rm out} = 100\%$.

КПД мощных клистронов во многом определяется качеством сформированного электроннооптической системой электронного потока. Для обеспечения наилучших условий группирования электронов в сгустки необходимо, чтобы электроны пучка в системе взаимодействия не имели сильных радиальных пульсаций и не оседали на ее стенки. Такие условия обычно обеспечиваются в высокоэффективных клистронах за счет выбора величины фокусирующего магнитного поля, в несколько раз превышающей бриллюэновское значение. Поэтому в настоящей работе поиск предельных значений КПД проводился в предположении «замагниченного» электронного пучка, когда в условиях бесконечно большого фокусирующего магнитного поля радиальные и азимутальные компоненты скоростей электронов можно считать равными нулю. Предполагалось, что на влете во входной резонатор электроны не имеют радиальных компонент скорости, а сам электронный поток имеет однородное распределение плотности тока.

Важную роль для получения высоких КПД играет выбор конструкции резонаторов клистрона, которые должны обеспечивать эффективное взаимодействие возбуждаемых в них электромагнитных полей с электронным потоком. Для поиска оптимальных конструкций клистронов в работе рассматривались резонаторы с зазорами, имеющими фазовый угол пролета 45°. Такое значение фазового угла пролета характерно для резонаторов, используемых в высокоэффективных клистронах, поскольку обеспечивает значение коэффициента взаимодействия электромагнитных полей резонатора с электронным пучком, близким к максимальному. Для нахождения распределения собственных полей резонаторов в зазорах использовались аналитические формулы работы [12].

При заданных параметрах электронного пучка и электродинамических параметрах резонаторов основной задачей при разработке высокоэффективного клистрона является поиск оптимальной схемы группирователя, обеспечивающей максимальный электронный КПД прибора. В результате оптимизации должны быть определены длины труб дрейфа, частотные отстройки и добротности резонаторов. Существуют два основных подхода к повышению эффективности клистронов, основанные на использовании нелинейных эффектов при группировании электронных потоков, связанных с возбуждением высших гармоник пространственного заряда. В работах [13-15] было показано, что для возбуждения в пучке второй гармоники пространственного заряда и увеличения КПД клистронов можно использовать либо удлиненные трубы дрейфа, либо дополнительные резонаторы, настроенные на удвоенную частоту входного сигнала. В последнем случае можно использовать укороченные трубы дрейфа. В обоих случаях электронный пучок испытывает как группирующие, так и разгруппирующие воздействия таким образом, что электроны колеблются около центра сгустка, уменьшается разброс их скоростей и осуществляется постепенный сбор периферийных электронов ближе к центру сгустка.

Оба подхода активно использовались разработчиками высокоэффективных клистронов в ведущих клистронных центрах в нашей стране и за рубежом еще в прошлом веке. Большинство рекордных высокоэффективных клистронов были разработаны в это время с использованием либо удлиненных труб дрейфа, либо укороченных труб дрейфа с одним



Рис. 1. а — Рассчитанные продольные зависимости первой (1) и второй (2) гармоник конвекционного тока, а также удельной кинетической энергии электронов (3); б — фазовая диаграмма электронов в оптимизированном семирезонаторном клистроне с удлиненными трубами дрейфа

или двумя дополнительными резонаторами на второй гармонике [13, 16-20].

В настоящей работе при оптимизации схем группирователей высокоэффективных клистронов использовался первый подход. При заданном числе резонаторов первой гармоники поиск предельных значений КПД приборов проводился с помощью алгоритма автоматической оптимизации комплекса программ PARS. В качестве 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 было значение электронного КПД. В качестве примера оптимизации на рис. 1 представлены результаты группирования в оптимизированном семирезонаторном клистроне с удлиненными трубами дрейфа.

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, δ). Из нее следует, что полученные в результате оптимизации трубы дрейфа являются удлиненными, что позволяет выравнивать скорости электронов в сгустке и постепенно собирать периферийные электроны ближе к центру сгустка, повышая тем самым эффективность группирования.

При заданном числе резонаторов предельный электронный КПД клистрона, который может быть достигнут в результате оптимизации схемы группирователя, в основном зависит от величины силы тока. Силы пространственного заряда электронного пучка являются основным фактором, ограничивающим электронный КПД. Повышение тока электронного пучка снижает электронный КПД, поскольку при фиксированных геометрических размерах электронного пучка происходит увеличение плотности пространственного заряда и кулоновских сил, которые препятствуют группированию электронов в плотные сгустки с высоким содержанием гармоник тока. Величина силы тока зависит от эмиссионной способности электронной пушки, для характеристики которой в СВЧ электронике используют величину микропервеанса:

$$P_{\mu} = \frac{I_0}{V_0^{3/2}} 10^6.$$

С увеличением величины микропервеанса силы пространственного заряда увеличиваются, а эффективность группирования падает, что приводит к уменьшению КПД. Поэтому основным способом увеличения КПД является использование многолучевых и кольцевых электронных потоков, в которых силы пространственного заряда уменьшаются за счет использования пространственно-развитых электронных пучков. Наибольших успешных практических результатов в этом направлении удалось добиться в 70-е-80-е гг. в нашей стране, когда были



Рис. 2. Зависимость экспериментальных значений КПД для однолучевых (1) и многолучевых (2) клистронов, а также теоретическая [21] (3) и эмпирические зависимости предельных КПД клистронов от микропервеанса, предложенные в [22] (4), [23] (5) и [24] (6)

разработаны многолучевые конструкции клистронов с рекордными значениями КПД [16, 17].

Оценка предельных значений КПД в зависимости от параметров электронного потока очень важна для разработчиков при выборе рабочих параметров клистронов. Для этого используются различные оценочные кривые, полученные из одномерных численных расчетов. Кривая 3 на рис. 2 соответствует наиболее известной такой зависимости [21]. Также применяются многочисленные эмпирические зависимости КПД от величины микропервеанса. Наиболее популярны три из них. Первая зависимость [22] имеет вид:

$$\eta = 0.78 - 0.16P_{\mu} \tag{1}$$

и представлена на рис. 2 кривой 4. Вторая зависимость [23] приведена ниже:

$$\eta = 0.90 - 0.2P_{\mu} \tag{2}$$

и изображена на рис. 2 кривой *5*. Третья зависимость [24] имеет вид:

$$\eta = 0.85 - 0.2P_{\mu} \tag{3}$$

и изображена на рис. 2 кривой 6.

На этом же рисунке приведены экспериментально достигнутые значения КПД высокоэффективных однолучевых (1) и многолучевых (2) клистронов. Из них рекордные экспериментальные данные для различных значений микропервеанса соответствуют следующим клистронным усилителям [16–21], созданным еще в прошлом веке. Во всех рекордных приборах использовались либо дополнительные резонаторы на второй гармонике, либо удлиненные трубы дрейфа.

Большое количество различных оценок, используемых разработчиками для зависимости предельных КПД клистронов от микропервеанса, показывает, что ни одна из них не может удовлетворительно описать эту зависимость при различных параметрах электронного пучка. Это связано с тем, что микропервеанс не является единственной величиной от которой зависят силы пространственного заряда в клистронах, а следовательно, и предельные значения КПД. По этой причине предельный КПД при заданной величине микропервеанса оказывается неоднозначной величиной, а диаграмма предельных КПД от микропервеанса не полностью отражает зависимость эффективности клистронов от величины сил пространственного заряда электронных пучков.

2. 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 служит основной 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 [4] на основе исследований нелинейных процессов группирования в однокаскадном клистроне было показано, что основной характеристикой электронного потока, определяющей влияние на процесс его группировки со стороны сил пространственного заряда, служит следующий безразмерный параметр пространственного заряда:

$$\Omega_q = \frac{1+\gamma_0}{2\sqrt{\gamma_0}} \left(\frac{\omega_q}{\omega}\right),\tag{4}$$

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, $\gamma_b = \beta_e r_b$, $\beta_e = \frac{\omega}{v_0 \gamma_0}$, $v_0 = \frac{c}{\gamma_0} \sqrt{\gamma_0^2 - 1}$, $\sigma_{b0} = \frac{r_{b0}}{r_b}$, $\sigma_b = \frac{r_b}{r_T}$, $\eta_e = \frac{e}{m_0}$, $\gamma_0 = 1 + \frac{\eta_e V_0}{c^2}$, $\frac{\omega_p}{\omega} = 10^{-3} \sqrt{\frac{\gamma_0 P_{\mu}}{\pi \eta_e^{1/2} \varepsilon_0 (1+\gamma_0)^{3/2} \gamma_b^2 (1-\sigma_{b0}^2)}}$ — относительная плазменная частота электронного потока, ε_0 — электрическая постоянная вакуума, r_b — внешний радиус пучка, r_T — радиус трубы дрейфа, V_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 [25].

Для обобщения этого вывода на случай многокаскадного группирования был проведен поиск предельных КПД при различном числе резонаторов для трех различных клистронов. Параметры электронных потоков для этих приборов приведены в таблице. Первый прибор работает в сантиметровом диапазоне с релятивистским электронным пучком. Другие два прибора работают в дециметровом диапазоне со слаборелятивистскими пучками. В третьем приборе,



Таблица 1. Исходные параметры клистронов

Рис. 3. Рассчитанные с помощью 2D численной модели зависимости максимальных электронных КПД (a) и относительной длины прибора (б) от числа резонаторов для трех клистронов с различными параметрами электронного потока (табл. 1), но с одинаковым значением параметра пространственного заряда Ω_q

в отличие от второго, используется кольцевой пучок с большей величиной силы тока. Электронные пучки во всех трех приборах имеют различные значения микропервеанса, но одинаковые значения параметра пространственного заряда Ω_q .

Полученные в результате оптимизационных расчетов сравнительные зависимости предельных значений электронного КПД и относительной длины прибора от числа резонаторов представлены на рис. 3. Под относительной длиной прибора понимается расстояние между центрами входного и выходного резонаторов L_T , нормированное на значение редуцированной плазменной длины волны:

$$L_q = \frac{2\pi v_0}{\omega_q} \gamma_0^{3/2}.$$

Как видно из рисунка, кривые для всех трех приборов практически совпадают, что свидетельствует об идентичном характере группирования в них. Таким образом, независимо от величины микропервеанса КПД клистрона в основном определяется величиной Ω_q .

Параметр пространственного заряда $\Omega_q(P_\mu, \gamma_0, \gamma_b, \sigma_b, \sigma_{b0})$ не только включает зависимость сил пространственного заряда от микропервеанса электронного пучка, но и учитывает также влияние релятивистских эффектов, геометрических соотношений радиуса пучка с электронной длиной волны, радиусом трубы дрейфа и внутренним

радиусом пучка. 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 многолучевых клистронах.

3. ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ РАССЛОЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРУППИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ПАРАМЕТРА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА

Для анализа влияния расслоения, вызванного неоднородностью сил пространственного заряда, на эффективность группирования были проведены сравнительные численные исследования максимально достижимых значений КПД клистронов при различном числе резонаторов для трех электронных потоков с различным значением параметра пространственного заряда, с использованием одномерной и двумерной численных моделей. Для каждого значения Ω_q при фиксированном числе резонаторов проводилась оптимизация параметров группирователя, позволяющая обеспечить максимальный КПД.

Результаты исследований представлены на рис. 4. Сплошные кривые 1, 3, 5 соответствуют результатам, полученным с помощью двумерной модели для значений параметра $\Omega_q = 0.15, 0.1, 0.05$. Пунктирные кривые 2, 4, 6 соответствуют результатам, полученным с помощью одномерной модели для тех же значений



Рис. 4. Рассчитанные с помощью 1D (2, 4, 6) и 2D (1, 3, 5) численных моделей зависимости максимальных значений электронного КПД от числа резонаторов для клистронов с различными значениями параметра пространственного заряда Ω_q: 0.05 (5, 6), 0.10 (3, 4), 0.15 (1, 2)

параметра Ω_q . Как видно из анализа рисунка, с увеличением числа резонаторов происходит увеличение максимального КПД клистронов. С ростом числа резонаторов это увеличение замедляется, приближаясь к предельному значению. С увеличением числа резонаторов также возрастает разница в значениях максимального КПД, полученных с помощью 1Dи 2D-моделей, что свидетельствует о возрастании влияния расслоения на процесс группирования с увеличением длины прибора и числа группирующих резонаторов.

При этом ограничение предельных значений КПД за счет расслоения значительно возрастает с ростом параметра пространственного заряда, достигая 15% для пучков с $\Omega_q = 0.15$. Это подтверждает выводы работы [4] о пределах применимости 1D численных моделей для анализа высокоэффективных клистронов. Их применение для анализа многорезонаторных высокоэффективных клистронов приводит к завышенным результатам предельных значений КПД.

4. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КПД МНОГОРЕЗОНАТОРНЫХ КЛИСТРОНОВ

Для определения зависимости максимально достижимых значений КПД от параметра пространственного заряда Ω_q при различном числе резонаторов первой гармоники N_{cav} были проведены теоретические исследования с помощью 2D-модели. Результаты исследований приведены на рис. 5. Кривая 1 соответствует теоретическому максимуму КПД двухрезонаторного клистрона в кинематическом режиме ($\Omega_q = 0$). Зависимости 2–8 максимальных значений КПД от Ω_q получены для клистронов с числом резонаторов от 2 до 8 соответственно. Во всем интервале изменения параметра Ω_q кривые, соответствующие различному числу резонаторов, постепенно сгущаются, приближаясь к предельному значению таким



Рис. 5. Рассчитанные с помощью 2D численной модели зависимости от Ω_q максимального электронного КПД клистронов с различным числом резонаторов (2–8), а также значение теоретического максимума КПД двухрезонаторного клистрона в кинематическом режиме (1)

образом, что дальнейшее увеличение числа резонаторов не приводит к заметному увеличению КПД.

Поэтому будем рассматривать максимальное значение КПД клистрона с $N_{cav} = 8$ в качестве предельного значения КПД.

Зависимость предельного КПД для клистронов от параметра пространственного заряда представлена кривой 3 на рис. 6. Для ее построения использовались значения предельных КПД, полученных в результате оптимизации параметров пяти различных клистронов с различными значениями параметра Ω_q , которые отмечены на рис. 6 точками 5. Данная кривая носит фундаментальный характер и опреде-



Рис. 6. Зависимость экспериментальных значений КПД от Ω_q для однолучевых (1) и многолучевых (2) клистронов, а также рассчитанные с помощью 2D (3) и 1D (4) численных моделей зависимости предельных КПД клистронов от Ω_q . Точки 5 соответствуют предельным значениям КПД клистронов, использовавшихся при расчетах $\eta_{lim}(\Omega_q)$ (кривая 3)

ляет влияние пространственного заряда аксиальносимметричных электронных потоков любой конфигурации на предельное значение КПД клистронов. Кривая 4 на этом рисунке соответствует зависимости предельного КПД от Ω_q , полученного путем оптимизации параметров вышеуказанных пяти клистронов с помощью 1D-модели. Она носит информативный характер и еще раз свидетельствует о необходимости использовать 2D численные модели для оптимизации высокоэффективных клистронов.

На этом же рисунке приведены значения экспериментально достигнутых КПД высокоэффективных однолучевых (1) и многолучевых (2) клистронов. Рекордные значения полученных КПД в области значений параметра Ω_q от 0.05 до 0.08 занимают в основном низковольтные многолучевые клистроны, разработанные еще в СССР. Почти все они используют дополнительные резонаторы на второй гармонике. В области высоких значений параметра Ω_a от 0.14 до 0.16 находится группа высокомощных релятивистских клистронов с КПД от 44% до 48%, которые были разработаны для накачки ускорителей [19]. Большинство из них имеет 5-7 резонаторов первой гармоники и удлиненные трубы дрейфа. Использование же резонаторов на второй гармонике в клистронах с высокой плотностью электронных потоков влечет за собой опасность возбуждения паразитных колебаний в приборе. Так, при попытке модернизации известного шестирезонаторного клистрона 5045 Стэнфордского ускорительного центра было обнаружено возбуждение паразитных мод при штатной длительности импульса 3.5 мкс. Схема модернизированного прибора имеет 10 резонаторов, 2 из которых настроены на вторую гармонику. При испытаниях клистрона в режиме коротких импульсов с длительностью 0.1 мкс был зафиксирован КПД



Рис. 7. Зависимость от микропервеанса экспериментальных значений КПД для однолучевых (1) и многолучевых (2) клистронов, теоретическая [21] (3) и эмпирическая [22] (4) зависимости предельных значений КПД клистронов, а также нижняя (6) и верхняя (7) границы области предельных значений КПД, рассчитанных с помощью 2D численной модели. Точки 5 соответствуют предельным КПД клистронов, использовавшихся при расчетах η_{lim}(Ω_q) (кривая 3 на рис. 6)

54% [26], близкий к предельному значению для области высоких значений параметра Ω_q от 0.14 до 0.16.

При использовании полученной фундаментальной зависимости предельных КПД клистронов от параметра пространственного заряда $\eta_{lim}(\Omega_q) = \eta_{lim}(P_{\mu}, \gamma_0, \gamma_b, \sigma_b, \sigma_{b0})$ и формулу (4) были проведены оценки границ области предельных значений КПД клистронов на диаграмме $\eta(P_{\mu})$. Полученная в результате оценок область выделена на рис. 7 голубым цветом и располагается между нижней и верхней граничными кривыми 6 и 7.

Для определения верхней и нижней границ области предельных значений КПД использовалось практически значимое значение $\sigma_b = 0.7$. Нижняя граница соответствует релятивистским клистронам со сплошным электронным пучком. Для таких клистронов типичное значение параметра $\gamma_b = 0.4$. Поэтому в качестве нижней границы области предельных значений КПД была выбрана зависимость $\eta_{lim1}(P_{\mu}, 2.0, 0.4, 0.7, 0),$ представленная на рис. 7 кривой 6. Верхняя граница соответствует нерелятивистским кольцевым пучкам. Для таких клистронов типичное значение параметра $\gamma_b = 0.2$. Поэтому в качестве верхней границы области предельных значений КПД была выбрана зависимость $\eta_{lim2}(P_{\mu}, 1.03, 0.2, 0.7, 0.6),$ изображенная на рисунке кривой 7. В данную область предельных значений попадают все точки 5, которые соответствуют рассчитанным предельным значениям КПД пяти клистронов, использовавшихся для построения фундаментальной зависимости предельных КПД от параметра Ω_q (кривая 3 на рис. 6).

На этом же рисунке приведены значения экспериментально достигнутых значений КПД высокоэффективных однолучевых (1) и многолучевых (2) клистронов. Как видно из рисунка, нижняя граница хорошо соответствует текущим рекордным значениям КПД клистронов. Верхняя граница показывает перспективы увеличения рекордных значений КПД при использовании кольцевых электронных потоков. Особенно это актуально для клистронов в коротковолновой части СВЧ-диапазона, использующих электронные пучки с высокими значениями микропервеанса.

Кривая 3 на рисунке, соответствующая теоретической зависимости, полученной в [21], в условиях неоднозначности определения предельных значений КПД как функции величины микропервеанса дает вполне адекватные оценки этих значений. В области низких значений микропервеанса, где в основном используются многолучевые приборы с низкими значениями ускоряющего напряжения, она близка к верхней границе области предельных значений. При увеличении же величины микропервеанса, где рекордные по КПД приборы используют сплошные однолучевые мощные релятивистские электронные пучки, кривая 3 приближается к нижней границе области предельных значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили определить степень влияния эффектов расслоения на эффективность группирования мощных электронных потоков при различных значениях параметра пространственного заряда и числа группирующих резонаторов. При этом ограничение предельных значений КПД за счет расслоения значительно возрастает с ростом параметра пространственного заряда, достигая 15% для пучков с $\Omega_q = 0.15$. Это подтверждает выводы работы [6] о пределах применимости 1D численных моделей для анализа высокоэффективных клистронов. Их применение для анализа многорезонаторных высокоэффективных клистронов приводит к завышенным результатам предельных значений КПД.

Подтвержден и обобщен на случай многокаскадного группирования вывод работы [4] 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.

В результате оптимизации параметров резонаторов определены предельные значения КПД, достижимые при различных значениях параметра пространственного заряда. Полученная фундаментальная зависимость предельных значений КПД от параметра пространственного заряда хорошо согласуется с эмпирическими оценками других специалистов, а также с экспериментальными данными, полученными для рекордных клистронов в ведущих клистронных центрах в нашей стране и за рубежом.

Показано, что достигнутые к настоящему времени рекордные значения КПД в области высоких значений микропервеанса могут быть значительно улучшены за счет использования кольцевых электронных потоков.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Канавец В. И., Сандалов А. Н. // Электронная техника, сер. І. Электроника СВЧ. 1971. № 3. С. 11.
- 2. *Faillon G.* Klystron de puissance a large bande. Rev. Tech. Thomson CSF. 1976. **2**, N 2. P. 290.
- Yonezawa H., Okazaki Y. A one dimensional disk model simulation for klystron design. SLAC-TN-84-5. May 1984.
- 4. Родякин В. Е., Пикунов В. М., Аксенов В. Н. // Журнал Радиоэлектроники. 2020. № 12. С. 33.
- Shintake T. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A. 1995. 363, Issues 1–2. P.83.

- Sandalov A. N., Pikunov V. M., Rodyakin V. E. Faillon G., Thaler Y. Animation of Nonlinear Electron-Wave Interaction in Klystrons // KEK report 1/1997, P. 185.
- Vlasov A. N., Antonsen T. M., Chernin D.P, Levush B., Wright E. L. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. 30, N. 3. P. 1277.
- 8. *Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н.* // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 6. С. 21.
- Ding Y., Xiao X., Rodyakin V.E., Sandalov A. N. Theoretical and experimental investigations of the high power MBK, based on 2.5 D Arsenal - MSU Computer Code // Proc. of the 2nd ICMMWT, September 2000, Beijing, China, P. 299.
- Shen B., Ding Y., Zhang Z. et al. // IEEE Tr. on Electron Devices. 2014. 61, N 6, P. 1848.
- Fukuda S. et al. // Development of a High-Power VHF Klystron for JHF. APAC'98, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 1998.
- 12. Kosmahl H.G., Branch G.M. // IEEE Trans. on ED. 1973. 20, N 7. P. 621.
- 13. Lien E. L. High efficiency amplifiers // MOGA-70. P. 11.
- 14. Бурнейка К. П., Канавец В. И., Мозговой Ю. Д., Сандалов А.Н. // Электронная техника, сер. І: Электроника СВЧ. 1971. в. 1. С. 29.
- 15. Канавец В. И., Сандалов А. Н. // Электронная техника, сер. І: Электроника СВЧ. 1971. в. 3. С. 11.
- 16. Лебединский С.В., Канавец В.И., Васильев Е.И. и др. // Электронная техника, сер. І. Электроника СВЧ. 1977. в. 1. С. 41.
- Кочетова В.А., Кучугурный В.И., Лебединский С.В. и др. // Радиотехника и электроника. 1981. 26, № 1. С. 132.
- Bastien C., Faillon G., Simon M. Extremely High Power Klystrons for Particle Accelerators // Electron Devices Meeting, 1982, San Francisco, P. 190.
- Lee T. G., Lebacgz J. V., Konrad G. T. A fifty Megawatt klystron for the Stanford Linear Collider. // IEDM, Dec., 1983. SLAC-Pub 3214, Sept. 1983.
- Артюх И.Г., Абанович С.А., Никитин А.П., Сандалов А.Н. Мощный усилительный клистрон непрерывного действия. В кн.: Физика и применение микроволн. Изд. МГУ, 1991. Ч. 1, С. 58.
- Сандалов А. Н., Теребилов А. В. // Радиотехника и электроника. 1983. 28, № 9. С. 1803.
- Beunas A., Faillon G., Choroba S. // A high power long pulse high efficiency multi beam klystron. 5th MDK Workshop, Geneva, Switzerland, Apr. 2001.
- Symons R. S. Scaling laws and power limits for klystrons. // IEDM. 1986. 32. P. 156.
- Jensen E., Syratchev I. CLIC 50 MW L-Band Multi-Beam Klystron. 7th International High Energy Density and High Power RF Workshop, Kalamata, Greece, 13-17th June 2005.
- 25. Mihran T. G. // J. Appl. Phys. 1967. 38. P. 159.
- 26. Kowalczyk R., Haase A., Jongewaard E. et al. Test of a BAC klystron // IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2017.

The Limiting Efficiency Values of Powerful Klystrons V.E. Rodyakin^{1,a}, V.N. Aksenov^{2,b}

¹Institute of Laser and Information Technologies, Crystallography and Photonics Federal Scientific Research Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow oblast, Shatura, 140700 Russia ²Department of Physics and International Laser Center, Lomonosov Moscow State University Moscow, 119992 Russia E-mail: ^avrodyakin@mail.ru, ^bv.aks@mail.ru The results of a theoretical study of electron beam bunching processes in high-power multicavity klystrons are presented. The studies were carried out using one-dimensional and two-dimensional numerical models for different values of the space charge parameter. The data on the effect of stratification effects on the efficiency of klystrons with a different number of bunching cavities are presented. As a result of the optimization of the cavity parameters, the limiting efficiency values that are achievable at different values of the space charge parameter have been determined. The obtained fundamental dependence of the limiting efficiency values on the space charge parameter is compared with the empirical estimates of other specialists, as well as with experimental data obtained for record klystrons in leading klystron centers in our country and abroad. It is shown that the space charge parameter is a universal characteristic that determines the dependence of the efficiency of multicavity klystrons on the properties of the electron flow. The prospects of increasing the efficiency of multicavity klystrons are indicated.

Keywords: microwave vacuum electronic devices, cavities, electron beams, multicavity klystrons, bunching of electron beams, space charge, electronic efficiency. PACS: 41.75.Fr, 85.45.Bz, 84.40.-x.

Received 23 July 2021.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2021. 76, No. 5. Pp. 333-341.

Сведения об авторах

1. Родякин Владимир Евгеньевич — науч. сотрудник; e-mail: vrodyakin@mail.ru.

2. Аксенов Владимир Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: v.aks@mail.ru.