

ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ-ЭНЕРГИИ В УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ И РАДИОЛОКАЦИИ

КУЗЬМИН Константин Анатольевич, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)

МОРОЗОВ Сергей Михайлович, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)

ПАВЛОВ Игорь Валентинович, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)

РЕУТ Владимир Антонович, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)

МОРОЗОВ Михаил Сергеевич, Московский авиационный институт

КОЧЕТКОВА Людмила Ивановна, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

В статье рассматривается решение задачи повышения выходной мощности и КПД приборов применением сильноточных релятивистских электронных потоков.

Введение. Развитие новых направлений науки и техники, таких как радиолокация космических объектов, системы дальней космической связи, передача энергии на большие расстояния по радиолучу, термоядерный синтез, ускорительная техника и т.д. требует значительного повышения выходной мощности и КПД приборов СВЧ. Увеличения мощности СВЧ-приборов можно добиться либо путем повышения ускоряющего напряжения, либо тока электронного пучка, либо обоих параметров сразу. Это позволяет использовать все многообразие физических принципов когерентного излучения заряженных частиц. Об этом, в частности, свидетельствует опыт развития релятивистской СВЧ-электроники, начало которой положили идеи В.Д. Гинзбурга, показавшего возможность получения когерентных колебаний коротковолнового диапазона длин волн с помощью потоков прямолинейно движущихся релятивистских электронов и потоков релятивистских доплеровских осцилляторов [1, 2].

Качественно новый этап в развитии релятивистской СВЧ-электроники наметился в 1970-е гг. после создания сильноточных релятивистских электронных потоков (РЭП), специально созданных линейных ускорителях и изучения электронных сгустков в накопительных кольцах. В течение последнего десятилетия реализовано много экспериментальных СВЧ-устройств релятивистской сильноточной электроники.

Исследования индуцированного излучения свободных электронов послужили основой приборов на классическом индуцированном (излучении свободных электронов) – электронных мазеров. Наибольшее распространение получил слабо реля-

тивистский МЦР, особенно одна из его высокоэффективных разновидностей – гиротрон. Гиротрон содержит адиабатическую термоэмиссионную магнетронную пушку и слабонерегулярный волновод. В гиротроне происходит взаимодействие потока возбужденных слаборелятивистских электронных осцилляторов с одной из собственных волн волновода вблизи частоты отсечки. Развитие гиротронов Горьковской-Нижегородской школы академика А.И. Гапонова привело к созданию источников миллиметрового излучения с мощностью на 2–3 порядка превосходящей другие приборы, работающие в коротковолновой части СВЧ-диапазона [3].

Поиск высокоэффективных способов генерации привел к появлению новых устройств, работающих в длинноволновой области спектра (более 1 м) – гироконов, магниконов и клистродов, которые обладают значительным уровнем выходной мощности и высоким КПД. Выходная мощность гироконов в настоящее время составляет единицы мегаватт в непрерывном режиме; длина волны около 1,5 м, КПД 75 %. В гироконе электронный луч, сканируемый в пространстве благодаря высокочастотной круговой развертке, проникает сквозь кольцевую щель в резонатор, представляющий собой свернутый в кольцо отрезок волновода, и возбуждает в нем бегущую электромагнитную волну. Возможности гироконов весьма широки, но из-за большой напряженности электрического поля в выходном резонаторе наиболее распространенной областью их применения является метровый диапазон длин волн. При продвижении в коротковолновую область в гироконах проявляются все особенности, свойственные традиционным мощным СВЧ-приборам.



Методика исследований. Увеличение мощности пролетных клистронов связано с необходимостью использования высоких ускоряющих напряжений. Наиболее мощные импульсные клистроны, разработанные в России, типа КИУ-12 и КИУ-15, и за рубежом, типа «SLAG», имеют выходную мощность 20...50 мВт, работают при ускоряющих напряжениях 200...300 кВ. Релятивистский эффект, обусловленный изменением массы электронов при увеличении их скорости до значений, сравнимых со скоростью света, существенно влияет на процессы скоростной модуляции и группирования электронного потока.

В релятивистской области, когда энергия электронов достигает 100 и более киловольт, скоростная модуляция электронов в зазоре резонатора при воздействии модулирующего напряжения уменьшается по сравнению с нерелятивистским случаем. Кроме того, в режиме большего сигнала процесс скоростной модуляции становится резко нелинейным из-за различного изменения массы ускоренных и замедленных электронов. При снижении скоростной модуляции необходимая длина группирования увеличивается [4].

Переход к релятивистским скоростям характеризуется также понижением сил объемного заряда и осевой составляющей электрического поля за счет возрастания влияния экранирующего действия пролетных труб и конечной величины сечения электрического потока.

Оценим влияние этих эффектов на процессы скоростной модуляции и группирования. Основные соотношения при расчетах процессов скоростной модуляции в зазоре резонатора и последующего группирования электронного потока – коэффициент скоростной модуляции v , параметры расталкивания α_q и группирования χ . Коэффициент скоростной модуляции, определяющий отношение максимального изменения модуляции, определяющий отношение максимального изменения переменной скорости v к ее постоянному значению, в релятивистской области равен

$$v = \frac{1}{2} \frac{v_m}{v_0} MK_m, \quad (1)$$

где v_m/v_0 – отношение амплитуды переменного напряжения, M – коэффициент взаимодействия электронного потока с полем резонатора, K_m – релятивистская поправка, $K_m = 2/\gamma_0(\gamma_0 + 1)$; γ_0 – релятивистский фактор, равный отношению полной энергии электрона к его энергии покоя.

Значение релятивистского фактора γ_0 может быть найдено по расчетной формуле $\gamma_0 = 1 + 1,96 \cdot 10^{-6} v_0$ (v_0 выражено в вольтах). Из (1) видно, что с ростом ускоряющего напряжения при заданном значении релятивист-

ской поправки K_m резко уменьшается и, следовательно, коэффициент скорости модуляции снижается. С увеличением относительной амплитуды модулирующего напряжения v_m/v_0 процесс скоростной модуляции становится существенно нелинейным за счет различного изменения массы ускоренных и замедленных электронов.

Необходимо либо численно решать релятивистское уравнение движение электрона в зазоре резонатора, либо воспользоваться релятивистским уравнением скоростной модуляции, определяющим нормированную скорость электронного потока v/v_0 в зависимости от фазы пролета центра зазора $\omega t'$ и имеющим вид

$$\frac{v(\omega t')}{v_0} = \frac{\gamma_0}{\sqrt{\gamma_0^2 - 1}} \left\{ 1 - \left[\gamma_0 + (\gamma_0 - 1) \frac{M v_m}{v_0} \sin \omega t' \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (2)$$

Зависимость $v(\omega t')/v_0$ для релятивистского (кривая 1, $U_0 = 0,75$ МВ) и нерелятивистского (кривая 2) случаев при одинаковых значениях $U_m/U_0 = 0,8$ и угла пролета зазора $\xi_d \frac{\omega d}{v_0}$ (ω – круговая частота, d – длина зазора) показана на рисунке, а. Наряду с уменьшением скоростной модуляции, видна и ее сильная нелинейность в релятивистской области [8].

Эти особенности релятивистской скоростной модуляции снижают электронную нагрузку зазора резонатора и увеличивают погрешности при использовании малосигнальных формул для расчета электронной проводимости в режиме большего сигнала.

Как известно, параметр группирования X позволяет определить относительную амплитуду первой гармоники конвекционного тока $I_{m1}/I_0 = 2J_1 (J_1(X) – функция Бесселя первого порядка). В кинематическом приближении$

$$X = v \xi_l \frac{1}{\gamma_0(\gamma_0 + 1)},$$

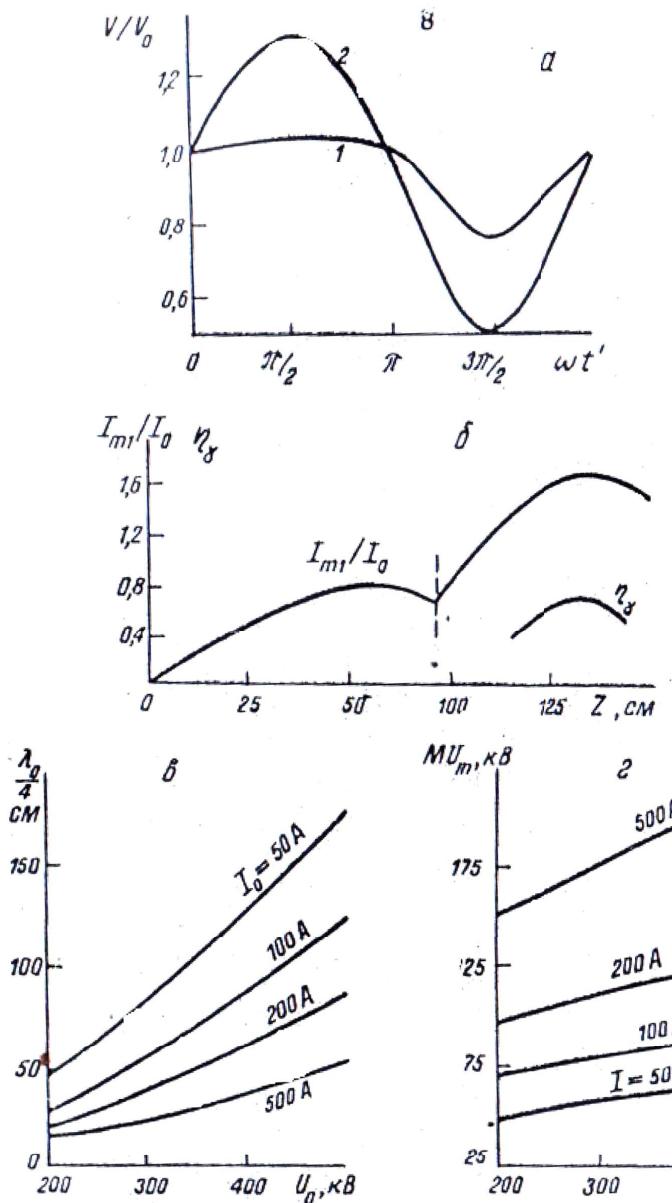
где ξ_l – угол пролета пространства дрейфа длиной линии 1, $\xi_l = \omega l / v_0$). С учетом объемного заряда

$$X = (v \sin \alpha_q \xi_l) / \alpha_q,$$

где $\alpha_q = F^{1/2} \omega_p / \omega$ – параметр расталкивания; ω_p – плазменная частота колебаний; $F^{1/2}$ – коэффициент расталкивания, характеризующий влияние экрана и конечности сечения электронного потока.

Значение параметра α_q позволяет оценить длину группирования $l = \lambda_q / 4 = \frac{\pi \omega'}{4 \alpha_q \vartheta_0}$, на ко-





К исследованию клистронного режима группирования электронного пучка

торой модуляция скоростная переходит в модуляцию по плотности (λ_q – плазменная длина волны). Так как $\alpha_q \sim \frac{1}{\gamma_0^2}$, то необходимая длина пространства группирования увеличивается в γ_0^2 раз. Нелинейность процесса группирования приводит к некоторому уменьшению оптимальной длины по сравнению с $\lambda_q/4$. При малосигнальной модуляции это можно оценить на основе решения релятивистского уравнения колебаний. Наиболее точно нелинейный процесс группирования РЭП описывается на основе численных дискретных моделей электронного потока, в частности, одномерной дисковой модели [9].

Рассмотрим основные уравнения дисковой модели с учетом последовательной нелинейности процесса, обусловленной изменением массы электронов и функции взаимодействия.

Результаты исследований. Электронный поток в пределах одной электронной длины волны $\lambda_l = \lambda\beta_0$ разбивается на N бесконечно

тонких жестких дисков (или колец для трубчатого потока), взаимодействующих между собой (λ – рабочая длина волны, $\beta_0 = v_0/c$, c – скорость света). В релятивистской области при увеличении продольной массы электрона в $\gamma_0^3 = (1 - \beta_0^2)^{-3/2}$ раз уравнение движения i -го диска в поле других дисков примет вид

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{e}{m_0}(1 - (\frac{N_i}{C})^2)^{3/2} \sum_{j=1}^N E_{ij}. \quad (3)$$

Здесь E_{ij} – напряженность поля, определяющая силу взаимодействия между i -м и j -м дисками, $E_{ij} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} F_{ij} sign(z_i - z_j)$; σ – поверхностная плотность заряда диска; F_{ij} – нормируемая на единицу функция взаимодействия между дисками, конкретный вид которой определяется конфигурацией электронного потока и пролетных труб; v_i , z_i – скорость и координата i -го диска; e , m_0 – заряд и масса покоя электрона; ϵ_0 – электрическая постоянная вакуума [7].

Перейдя к безмерной координате θ и углу пролета $\xi = \omega_1 - \omega_1 r$, с учетом того, что величина σ равна

$$\sigma = \rho_0 \frac{\lambda_e}{N} = \rho_0 \frac{2\pi v_0}{\omega N}$$

(ρ_0 – постоянная плотность объемного заряда), получим релятивистское уравнение движения в безразмерном виде

$$\frac{d^2\theta_i}{d^2\xi^2} + \frac{\pi}{N} \alpha_p^2 \left[1 - \beta_0^2 \left(\frac{d\theta_i}{d\xi} \right) \right]^{3/2} \sum_{j=1}^N F_{ij} sign(\theta_i - \theta_j) = 0; \quad (4)$$

$$\left(d_p = \omega_p / \omega; \omega_p = \left(\frac{1}{\epsilon_0} \frac{l}{m_0} \rho_0 \right)^{1/2} \right).$$

Так как в процессе нелинейного группирования релятивистского электронного потока масса электрона, зависящая от его скорости, существенно изменяется, это отражается в уравнении (4). Плазменную частоту определяет также масса покоя m_0 .

Действие сил объемного заряда при группировании электронного потока определяется напряженностью электрического поля $\bar{E} = -\text{grad}V - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}$ (U и \bar{A} – скалярный и векторный потенциалы).

При нерелятивистских скоростях электронного потока собственным магнитным



полем пучка можно пренебречь и основываться только на скалярном потенциале [5]. В этом случае поле объемного заряда носит потенциальный характер. Функция взаимодействия определяется решением уравнения Пуассона для скалярного потенциала U .

Для релятивистских скоростей электронного потока необходимо учитывать вихревую составляющую поля объемного заряда и определять запаздывающие скалярный U и векторный A потенциалы из решений соответствующих волновых уравнений. Переход в подвижную систему координат, движущуюся со скоростью v_0 , позволяет использовать квазистатическое приближение для определения функции взаимодействия и коэффициента редукции, что связано с переходом волнового управления для скалярного потенциала в уравнение Пуассона в подвижной системе координат. Значения функции взаимодействия и коэффициента редукции не зависят от системы координат, так как определяются осевым электрическим полем объемного заряда – Лоренц-инвариантом. Но при релятивистских скоростях значения этих величин резко уменьшаются за счет снижения напряженности электрического поля объемного заряда. Это учитывается введением постоянной распространения для подвижной системы координат в нерелятивистских выражениях коэффициента редукции и функции взаимодействия [6].

Функция взаимодействия для аксиально-симметричных конфигураций электронного потока и пролетных труб представляет собой бесконечный ряд по функциям Бесселя и Неймана. Поэтому при численных расчетах этот бесконечный ряд аппроксимируют более простой, например, показательной функцией $F_{ij} = \exp(-K|\theta_i - \theta_j|)$, где K – параметр дальнодействия, характеризующий радиус действия сил объемного заряда, $K = (Lv_0\gamma_0)/(\omega b)$; α – коэффициент, зависящий от отношения радиусов пучков и пролетной трубы, $\alpha = 1,2[1(\beta/a)^2]$. Влияние релятивистских скоростей учтено введением постоянной распространения $\omega/v_0\gamma_0$.

Однако такая запись функции взаимодействия F_{ij} возможна лишь в режиме малого сигнала, когда при переходе в подвижную систему координат движение всех дисков можно считать нерелятивистским. При этом функция взаимодействия для всех дисков неизменна и определяется лишь расстоянием между ними $|\theta_i - \theta_j|$. Существенно нелинейный режим в релятивистской области характеризуется тем, что невозможно выбрать такую систему координат, где движение всех дисков

было бы нерелятивистским. В этом случае необходимо использовать функцию взаимодействия

$$F_{ij} = \exp\left(-\frac{K(\theta_i - \theta_j)}{\gamma_0 \sqrt{1 - \beta_0^2} \frac{d\theta_i}{ds} \frac{d\theta_j}{ds}}\right). \quad (5)$$

Рассмотренная методика численного моделирования позволяет рассчитывать нелинейное клистронное группирование РЭП. Изменение относительной амплитуды первой гармоники конвекционного тока I_m/I_0 вдоль оси двухкаскадного группирователя для параметров пучка $U_0 = 100$ кВ, где радиусы пучка и пролетной трубы равны, соответственно, $b = 1$ см, 1,25 см, а рабочая длина волны $\lambda = 10$ см, показано на рисунке, б. При амплитудах модулирующих напряжений и можно получить значение $U_m = 30$ кВ и $U = 100$ кВ можно получить значение $I_m/I_0 \sim 1,8$. Величина группировки, с учетом энергетического разброса, позволяет оценить показатель качества группирования (см. рисунок, б) η_γ , который в релятивистской области составит $\eta_\gamma = \frac{1}{2} \frac{I}{I_0} \frac{\gamma - 1}{\gamma_0 - 1}$ (γ – релятивистский фактор, соответствующий электрону с минимальной энергией).

Зависимости $\frac{\lambda_0}{4}$ от ускоряющего напряжения $I_0 = 50 - 500$. А для различных токов даны на рисунке, в, а значения амплитуды модулирующего напряжения U_m с учетом коэффициента взаимодействия M обеспечивающего оптимальное значение параметра группирования $X = 1,84$ на длине $\frac{\lambda_0}{4}$ в зависимости от U_0 на рисунке, г. Учет нелинейности процесса группирования приводит к уменьшению оптимальных длин группировки по сравнению с $\frac{\lambda_0}{4}$ и увеличению требуемых амплитуд модуляции M_{0m} .

Заключение. При использовании релятивистских электронных потоков с энергией выше 1 МэВ модуляция электронов по энергии в зазорах резонаторов приводит в основном к изменению массы электронов, но не их скорости, близкой к скорости света. Поэтому клистронная группировка малоэффективна. Имеются результаты расчетов по оптимизации восьмирезонаторных релятивистских клистронов на энергию 1,0...1,5 МэВ для $\lambda = 12$ см. Расчетная длина такого клистрона составляет около 20 м (длина первой пролетной трубы ~ 6 м), что практически нереализуемо. Однако, для электронов с энергией выше 1 МэВ возможен клистронный механизм группировки с одновременным ускорением пучка.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин К.А., Морозов С.М. Определение структуры измерительных стендов СВЧ-установки для сушки и обжига строительного кирпича // Инженерный Вестник Дона. – 2018. – № 2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4951>.
2. Кузьмин К.А., Морозов С.М. Определение оптимальных режимов работы СВЧ-установки для сушки и обжига строительного кирпича // Инженерный Вестник Дона. – 2018. – № 3. – С. 75–83.
3. Морозов С., Кузьмин К., Макаров Г. Нейросетевой принцип реализации цифровых фильтров // веб-конференция МАТЕС. – 2018. – № 193. – С. 102–115.
4. Расчет параметров и характеристик СВЧ-установки для сушки и обжига кирпича / С.М. Морозов [и др.] // Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 9. – С. 37–49.
5. Федулов В.И., Морозов С.М. Потери кинетической энергии частицы в неоднородном потенциальном поле // Современное телевидение и радиоэлектроника: 19-я Междунар. науч.-техн. конф. – М., 2011. – С. 299–301.
6. Федулов В.И., Морозов С.М. О нелинейных характеристиках структур с неоднородным потенциальным полем // Современное телевидение и радиоэлектроника: 19-я Междунар. науч.-техн. конф. – М., 2011. – С. 301–304.
7. Fedulov V.I. ARW977788 Emerging Applications of Vacuum-Arc-Produced Plasma, Ion and Electron Beams / ed. by E.M. Oks and I.G. Brown. Dordrecht, 2003, p. 213–225.
8. Landau L., Lifchic E. The theory of a field. Moscow, 1988. Vol. 2, p. 78–79.
9. Kroemer Herbert. Electrical and Computer Engineering Department, University of California, Santa Barbara, 2001.

Кузьмин Константин Анатольевич, канд. пед. наук, доцент кафедры «Естественно-научные техни-

ческие дисциплины и информационные технологии», Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет). Россия.

Морозов Сергей Михайлович, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Естественно-научные технические дисциплины и информационные технологии», Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет). Россия.

Павлов Игорь Валентинович, канд. пед. наук, доцент кафедры «Естественно-научные технические дисциплины и информационные технологии», Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет). Россия.

Реут Владимир Антонович, канд. пед. наук, доцент кафедры «Естественно-научные технические дисциплины и информационные технологии», Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет). Россия.

215100, Смоленская обл., г. Вязьма, ул. Ленина, 77.
Тел.: (48131) 6-18-66.

Морозов Михаил Сергеевич, ведущий инженер Московский авиационный институт. Россия.
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4.
Тел.: (499) 158-29-77.

Кочеткова Людмила Ивановна, преподаватель кафедры «Технология и организация строительного производства», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия.

129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.
Тел.: (495) 781-80-07.

Ключевые слова: электронный поток; мощность СВЧ; принципы когерентного излучения заряженных частиц; гиротрон; релятивистские скорости; коэффициент скоростной модуляции.

UHF ENERGY APPLICATION IN ACCELERATION TECHNOLOGY AND RADIOLOCATION

Kuzmin Konstantin Anatolyevich, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the chair “Science and Technical Disciplines and Information Technology”, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University), Russia.

Morozov Sergey Mikhaylovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the chair “Science and Technical Disciplines and Information Technology”, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University), Russia.

Pavlov Igor Valentinovich, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the chair “Science and Technical Disciplines and Information Technology”, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University), Russia.

Reut Vladimir Antonovich, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the chair “Science and Technical Dis-

ciplines and Information Technology”, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University), Russia.

Morozov Mikhail Sergeevich, Leading Engineer, Moscow Aviation Institute.

Kochetkova Lyudmila Ivanovna, Teacher of the chair “Technology and Organization of Construction Production”, National Re-search Moscow State University of Civil Engineering, Russia.

Keywords: electronic stream; microwave power; principles of coherent radiation of charged particles; gyrotron; relativistic speeds; speed modulation coefficient.

The article discusses the solution to the problem of increasing the output power and efficiency of devices using high-current relativistic electron flows.

