

ОБ ЭСТАФЕТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ПРИ НАЛИЧИИ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: milv@ire.kharkov.ua*

Проведено теоретическое исследование коллективного (эстафетного) взаимодействия широкого ленточного электронного потока с бегущей пространственной гармоникой поля при наличии в пространстве дрейфа поперечного статического магнитного поля. Проанализирована возможность создания высокочастотных приборов типа клистрона бегущей волны, использующих пространственно-распределенную модуляцию скорости электронов с последующей динамической фокусировкой в пространстве дрейфа. Ил. 3. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: эстафетное взаимодействие, клистрон бегущей волны, ленточный электронный поток, поперечное магнитное поле, пространство дрейфа, динамическая фокусировка.

В приборах с эстафетным взаимодействием электронного потока с СВЧ-полем при скорости индивидуальных электронов, направленной перпендикулярно движению гармоники электромагнитного поля, реализуется синхронное перемещение электронного уплотнения (виртуального сгустка) в пространстве с фазовой скоростью волны в направлении ее движения. Возможности создания источников СВЧ-колебаний О-типа с эстафетным взаимодействием, использующих нерелятивистские электронные потоки и «фокусировку» траекторий в пространстве дрейфа, неоднократно анализировались [1, 2]. В работе [3] отмечено, что в клистроне бегущей волны [4, 5] при наличии поперечного магнитного поля и группировании электронов ленточного потока в пространстве дрейфа после пространственно-распределенной модуляции скорости электронов также может быть реализовано эстафетное взаимодействие. При этом группирование (динамическая фокусировка) виртуального электронного сгустка, перемещающегося с фазовой скоростью волны, происходит благодаря тому, что замедленные электроны перемещаются в пространстве дрейфа по траекториям с уменьшенным циклотронным радиусом, а ускоренные – с увеличенным [3]. Особенности такого взаимодействия анализируются в настоящей работе. Следует отметить, что конструкция двухрезонаторного отражательного клистрона с группированием в пространстве дрейфа за счет поперечного статического магнитного поля известна [6] и защищена патентом [7]. Отличие предложенной в работе [3] конструкции от [6] состоит в том, что в ней реализуется перемещение местоположения электронного уплотнения с фазовой скоростью волны в направлении движения последней, что позволяет использовать широкие ленточные электронные потоки. В отличие от усилительных клистронов с распределенным взаимодействием [8], в которых

используются распределенные резонаторы, в работе [3] предполагается использование волноведущих систем с минимальным коэффициентом стоячей волны. Схематическое изображение плоской модели усилителя клистронного типа с ленточным электронным потоком при наличии поперечного статического магнитного поля в пространстве дрейфа представлено на рис. 1.

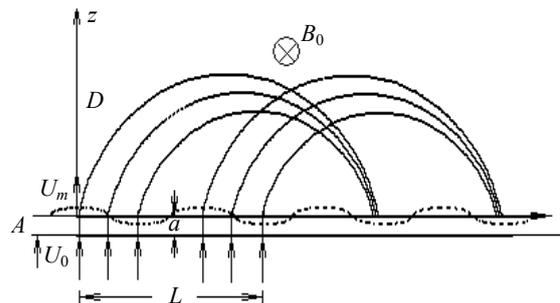


Рис. 1. Схематическое изображение плоской модели усилителя клистронного типа с ленточным электронным потоком при наличии поперечного статического магнитного поля в пространстве дрейфа

Буква A на рис. 1 обозначает волноведущую систему резонансного типа со щелью, осуществляющую модуляцию электронного потока по скорости и отбор энергии от электронов (участок взаимодействия). Буква D обозначает область дрейфа ($z \geq 0$), в которой действует поперечное (в направлении y) магнитное поле B_0 . Сплошные линии изображают «статические» траектории отдельных электронов в пространстве дрейфа (при отсутствии в нем ВЧ-поля). Протяженная в направлении x электронная пушка формирует на входе в область взаимодействия $-d \leq z < 0$ моноскоростной (со скоростью v_0) ленточный электронный поток шириной L . Переменное электрическое поле в пространстве

взаимодействия будем описывать бегущей в направлении x со скоростью v_Φ пространственной гармоникой

$$\tilde{E} = \tilde{E}_z = E_0 e^{i(\beta x - \omega t)}. \quad (1)$$

с амплитудой E_0 , частотой ω , фазовой постоянной $\beta = \omega/v_\Phi$. Штриховая линия на рис. 1 соответствует силовой линии электрического поля бегущей волны в определенный момент времени влета электронов, траектории которых приведены на рис. 1. При этом статическое магнитное поле B_0 является отражателем, обеспечивающим (по аналогии с отражательным клистроном) возвращение электронов потока в высокочастотный промежуток.

Пространственно-распределенная модуляция электронов по скорости в высокочастотном промежутке осуществляется бегущей гармоникой электромагнитного поля. Группирование электронов в области дрейфа (динамическая фокусировка траекторий) происходит за счет магнитного поля, обеспечивающего возвращение электронов в волноведущую систему. Эффект модуляции потока по скорости поперечной бегущей компонентой \tilde{E}_z описывается в линейном приближении соотношением [9]

$$\tilde{v}_m(x_1, t_1) = v_0 \left[1 + \frac{1}{2} \xi M \sin \left(\beta x_1 - \omega t_1 + \frac{\varphi_0}{2} \right) \right], \quad (2)$$

где \tilde{v}_m – скорость электронов на входе в пространство дрейфа (после модуляции); $\varphi_0 = \omega d/v_0$ – угол пролета электронов через высокочастотный промежуток; $M = \frac{\sin \varphi_0/2}{\varphi_0/2}$ – параметр эффективности модуляции; $\xi = 2|e|E_0 d/mv_0^2 \ll 1$ – безразмерная (нормированная) амплитуда поля; x_1, t_1 – координата и время влета отдельного электрона в пространство модуляции при условии $0 \leq x_1 \leq L$; $0 \leq \omega t_1 \leq 2\pi$.

При наличии поперечного статического магнитного поля B_0 пространственно-распределенная модуляция скорости сопровождается группированием электронных траекторий вблизи невозмущенных и образованием в фокусе ленточного пучка электронных уплотнений (виртуальных сгустков), местоположение которых перемещается с фазовой скоростью волны. При кратковременном взаимодействии этих уплотнений с высокочастотным полем волноведущей системы на выходном участке в тормозящей фазе кинетическая энергия электронов передается поперечной компоненте поля.

Скорость электронов в точке возвращения x_L в пространство взаимодействия в момент t_L равна

$$\tilde{v}_L(x_L, t_L) = -v_0 \left[1 + \frac{1}{2} \xi M \sin \left(\beta x_1 - \omega t_1 + \frac{\varphi_0}{2} \right) \right]. \quad (3)$$

Как следует из соотношения для M , эффективность модуляции потока по скорости диодным промежутком максимальна при $\varphi_0 = 0$ и снижается с ростом угла пролета. Средняя за период мощность взаимодействия, затрачиваемая на модуляцию при условии $0 < \varphi_0 < 2\pi$, равна [9]

$$\bar{P}_a = \frac{1}{4} P_0 \xi^2 \frac{2(1 - \cos \varphi_0) - \varphi_0 \sin \varphi_0}{\varphi_0^2}, \quad (4)$$

где P_0 – мощность невозмущенного электронного луча. Для упрощения в дальнейшем полагаем $\varphi_0 = 0$ ($M = 1$).

Двумерные уравнения движения электронов в пространстве дрейфа, описывающие процесс группировки без учета сил пространственного заряда, и их решения при начальных условиях

$$t = t_1, \quad x = x_1, \quad z = 0, \quad \frac{dx}{dt} = 0, \quad \frac{dz}{dt} = \tilde{v}_m \quad \text{имеют вид [9]}$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \omega_H \frac{dz}{dt}; \quad \frac{d^2 z}{dt^2} = -\omega_H \frac{dx}{dt}; \quad (5)$$

$$x = x_1 + (1 - \cos \omega_H(t - t_1)) \frac{\tilde{v}_m}{\omega_H}; \quad (6)$$

$$z = \frac{\tilde{v}_m}{\omega_H} \sin \omega_H(t - t_1),$$

где $\omega_H = \frac{|e|}{m} B_0$ – циклотронная частота.

Время пролета отдельным электроном области дрейфа (до плоскости $z = 0$) и координата возвращения электрона в пространство взаимодействия после модуляции по скорости определяются из (6):

$$t_L - t_1 = \pi R(t_1, x_1) / \tilde{v}_m(t_1, x_1) = \pi / \omega_H; \quad (7)$$

$$x_L = x_1 + 2R(t_1, x_1) = x_1 + (1 - \cos \omega_H(t_L - t_1)) \frac{\tilde{v}_m}{\omega_H}, \quad (8)$$

при условии $2R_{\min} < x_L < x_1 + 2R_{\max}$, где $R(t_1, x_1) = \frac{\tilde{v}_m}{\omega_H}$ – возмущенный циклотронный радиус (радиус движения электрона в пространстве дрейфа); $R_{\min} = \frac{v_0}{\omega_H} \left(1 - \frac{1}{2} \xi M \right)$,

$R_{\max} = \frac{v_0}{\omega_H} \left(1 + \frac{1}{2} \xi M \right)$ – минимальный и максимальный циклотронные радиусы (радиусы движе-

ния в пространстве дрейфа замедленных и ускоренных электронов); $R_0 = \frac{v_0}{\omega_H}$ – радиус движения невозмущенных электронов. Границы области формирования виртуального электронного сгустка на участке взаимодействия определяются приближенно соотношением $2R_{\min} \leq x_L \leq L + 2R_{\max}$.

Механизм группирования поперечного тока в плоскости $z = 0$ иллюстрирует рис. 2, на котором приведены зависимости безразмерной координаты x_L/L от «входной» безразмерной координаты x_1/L при $R_0/L = 1$; $\beta L = 20$ и различных значениях параметра ξM ($\xi M = 0$ – сплошная кривая, $\xi M = 0,05$ – штриховая, $\xi M = 0,1$ – штрихпунктирная). Области, в которых происходит фокусировка электронов в окрестности невозмущенной траектории, образуют уплотнения заряда, перемещающиеся в направлении x со скоростью, равной скорости движения бегущей гармоники поля. На рис. 2 эти области (виртуальные сгустки) определяются участками слабого изменения функций $x_L(x_1)$ и отмечены утолщениями.

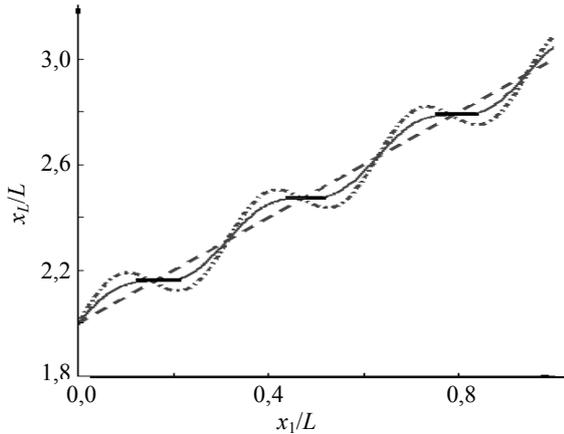


Рис. 2. Зависимости координаты выходного участка пространства взаимодействия от «входной» координаты при различных значениях параметра ξM

Из сравнения кривых на рис. 2 видно, что оптимальным для группирования электронов является слабая модуляция скорости ($\xi M < 0,1$). При сильной модуляции ($\xi M \geq 0,1$) на выходном участке происходит их разгруппировка. Свойство перемещающихся виртуальных сгустков иметь неограниченную скорость движения в направлении x позволяет характеризовать усилитель как систему с эстафетным взаимодействием. Поперечная (реальная) скорость электронов в точке возврата в пространство взаимодействия, опреде-

ляемой соотношениями (6), (7), соответственно, равна

$$\tilde{v}_L(x_L, t_L) = -v_0 \left[1 + \frac{1}{2} \xi M \sin \left(\beta x_1 - \omega t_1 + \frac{\phi_0}{2} \right) \right]. \quad (9)$$

Оценку плотности поперечного сгруппированного тока можно получить из двумерного закона сохранения заряда

$$j_0(x_1, t_1) dt_1 dx_1 = j(x_L, t_L) dt_L dx_L, \quad (10)$$

где $j_0(x_1, t_1) = j_0$ – плотность тока невозмущенного потока. Из (10), учитывая, что $\frac{dt_L}{dt_1} \approx 1$,

$$\frac{dx_L}{dx_1} = 1 + \frac{1}{2} \frac{\beta \xi M v_0}{\omega_H} (1 - \cos \omega_H (t_L - t_1)) \times \cos(\beta x_1 - \omega t_1 + \frac{\phi_0}{2}),$$

т. е. пренебрегая временной модуляцией скорости при условии (7), можно получить приближенное соотношение для сгруппированного в плоскости $z = 0$ тока:

$$j(x_L, t_L) \approx j_0 \frac{\partial x_1}{\partial x_L} \frac{\partial t_1}{\partial t_L} \approx j_0 \frac{1}{\frac{dt_L}{dt_1} \frac{dx_L}{dx_1}} = j_0 \frac{1}{1 + \frac{\beta \xi M v_0}{\omega_H} \cos(\beta x_1 - \omega t_1 + \frac{\phi_0}{2})}. \quad (11)$$

Из (11) видно, что переменная составляющая тока обусловлена только пространственно-распределенной модуляцией скорости электронов.

Влияние эффекта группирования на среднюю за период локальную мощность взаимодействия гармоники (1) с поперечной компонентой сгруппированного тока можно оценить в линейном приближении для режима заданного тока (11). В этом случае

$$P_a = \frac{1}{2} j \tilde{E}_z^* \approx - \frac{\beta \xi^2 M v_0}{4d |e| \omega_H} P_0 \cos \left(\frac{\phi_0}{2} + \theta_0 \right), \quad (12)$$

где θ_0 – фазовый сдвиг бегущей гармоники поля за время движения электронов в пространстве дрейфа. Из (12) следует, что эффект группирования сопровождается появлением мощности взаимодействия с отрицательным знаком при оптимальном фазовом сдвиге $\frac{\phi_0}{2} + \theta_0 = 2\pi n$, когда электроны, образуя поперечную компоненту сгруппированного тока, попадают в тормозящую фазу поля. Сравнение соотношений (12) и (4) показывает, что даже при неоптимальном для взаимодействия в канале угле пролета мощность взаимодействия за счет предварительной модуляции и динамической фокусировки может обеспе-

чить режим автомодуляции. Оптимальными для взаимодействия заданной гармоники (1) с заданным током (11) являются нулевые углы пролета при фазовом сдвиге $\theta_0 = 2\pi$.

Проведя разложение функции (11) по пространственным гармоникам в движущейся системе координат при выполнении соотношений (7) для стационарного тока, получим

$$j(x_L, t_L) = j_0 + 2j_0 \times \sum_{n=1}^{\infty} J_n(nX) (-1)^n \cos n(\omega t_L - \beta_n x_L - \varphi_0), \quad (13)$$

где $J_n(nX)$ – функции Бесселя; $X = \xi M \frac{\omega \nu_0}{\omega_H \nu_\Phi}$.

Для амплитуды первой бегущей пространственной гармоники поперечного тока из (13) следует

$$j_1(x_L, t_L) / \cos(\beta_1 x_L - \omega t_L) \approx j_0 J_1 \left(\xi M \frac{\omega \nu_0}{\omega_H \nu_\Phi} \right), \quad (14)$$

где $J_1(X)$ – функция Бесселя первого порядка.

Из (14) видно, что эффективность синхронного (эстафетного) взаимодействия определяется параметром эффективности модуляции скорости, соотношением частот (несущей и циклотронной) и соотношением скоростей невозмущенного потока и поля. Соотношение скоростей ν_0, ν_Φ , как следует из (14), может быть произвольным. Оптимальные для группирования и эстафетного взаимодействия условия в линейном и нелинейном режимах были проанализированы. Из анализа мощности взаимодействия в режиме заданного тока в линейном приближении следует, что даже при малом угле пролета $\varphi_0 \sim 0$ мощность взаимодействия за счет предварительной модуляции и динамической фокусировки может быть достаточно высокой.

Зависимости амплитуды нормированной первой гармоники сгруппированного тока от соотношения скоростей в стационарном режиме, следующие из (14), представлены на рис. 3 при значении магнитного поля $B_0 = 1070$ гс и различных, характерных для приборов сантиметрового диапазона, соотношениях частот: $\frac{\omega}{\omega_H} = 1$ –

сплошная кривая ($\lambda = 10$ см); $\frac{\omega}{\omega_H} = 2,5$ – штриховая

кривая ($\lambda = 4$ см); $\frac{\omega}{\omega_H} = 3,3$ – штрихпунктирная

кривая ($\lambda = 3$ см); $\frac{\omega}{\omega_H} = 5$ – точечная ($\lambda = 2$ см).

Из рис. 3, например, видно, что при $\frac{\omega}{\omega_H} = 3,3$ оптимальным значением параметра ν_0/ν_Φ является 0,56.

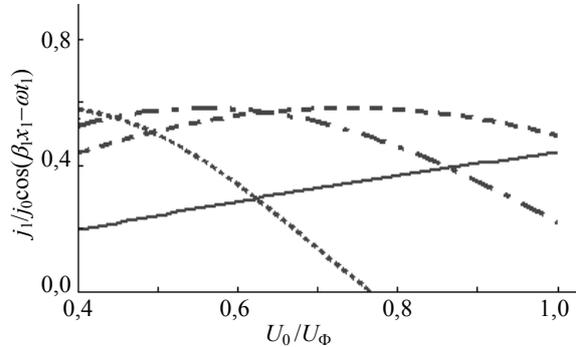


Рис. 3. Зависимости амплитуды первой гармоники сгруппированного поперечного тока от соотношения скоростей при различных соотношениях частот

Из (12) следует, что взаимодействие основных пространственных гармоник поля и тока на выходном участке зависит от фазового сдвига θ_0 и является оптимальным при $\theta_0 = \pi$, когда уплотнения заряда (виртуальные сгустки) попадают в тормозящую фазу поля.

Коллективное (эстафетное) взаимодействие в оптимальном режиме ($\varphi_0 = 0, \theta_0 = \pi$) определяется соотношением

$$P_L \approx P_L^0 \xi J_1 \left(\xi M \frac{\omega \nu_0}{\omega_H \nu_\Phi} \right), \quad (15)$$

где P_L^0 – мощность невозмущенного ленточного потока. И, следовательно, в рассмотренной постановке задачи оптимальным для эстафетного взаимодействия является значение параметра $\xi M \frac{\omega \nu_0}{\omega_H \nu_\Phi} = 1,84$.

Основным результатом теоретического исследования является подтверждение возможности использования предложенного в работе [3] механизма группирования электронного ленточного потока в поперечном магнитном поле для создания эффективных источников колебаний коротковолнового диапазона с кратковременным распределенным коллективным взаимодействием.

1. Алексеев Г. А. Вопросы создания источников СВЧ-колебаний с эстафетным взаимодействием / Г. А. Алексеев, А. Я. Кириченко, В. И. Михайлов // III Всесоюз. симп. по приборам, технике и распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн: тез. докл. / Ин-т прикладной физики АН СССР. – Горький, 1980. – Т. 1. – С. 3–4.
2. Алексеев Г. А. О некоторых возможностях использования эстафетного взаимодействия электронных потоков для создания источников мм и субмм волн / Г. А. Алексеев, В. И. Михайлов // Тр. ИРЭ АН УССР. – 1978. – 24. – С. 94–104.

3. Алексеев Г. А. О механизме группировки электронного потока в клистроне бегущей волны с поперечным магнитным полем / Г. А. Алексеев, А. Я. Кириченко, В. И. Михайлов // Тр. ИРЭ АН УССР. – 1980. – 26. – С. 130–141.
4. Mihran T. G. The Duplex Traveling-Wave Klystron / T. G. Mihran // Proc. IRE. – 1952. – 40, N 3. – P. 308–315.
5. Pohl W. J. The Design and Demonstration of a Wide-Band Multiple-Beam Traveling-Wave Klystron / W. J. Pohl // IEEE Trans. Electron Devices. – 1965. – ED-12, N 6. – P. 351–368.
6. Lau Y. Y. Collective-Interaction Klystron / Y. Y. Lau // Phys. Rev. Lett. – 1984. – 53, N 4. – P. 395–398.
7. Patent Number: 4,617,493 Collective-Interaction Klystron / Y. Y. Lau; United States (U.S.); Date of Patent: Oct. 14, 1986. – 12 p.
8. Усилительные клистроны с распределенным взаимодействием / В. С. Андрушкевич, В. А. Вырский, Ю. Г. Гамаюнов, В. Н. Шевчик. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1977. – 153 с.
9. Шевчик В. Н. Основы электроники сверхвысоких частот / В. Н. Шевчик. – М.: Сов. радио, 1950. – 307 с.

G. A. Alexeev, L. V. Stulova

ON RELAY-RACE INTERACTION OF STRIP ELECTRON BEAM WITH TRAVELLING WAVE IN THE PRESENCE OF TRANSVERSE MAGNETIC FIELD

Distributed (relay-race) interaction between the wide strip electron beam and the travelling space field harmonic in the

presence of the transverse static magnetic field in the drift space is studied theoretically. Designing of microwave devices of travelling wave klystron type is analyzed. These devices use spatial (distributed) modulation of the electron velocity followed by the electron dynamic focusing in the drift space.

Key words: relay-race interaction, travelling wave klystron, strip electron beam, transverse magnetic field, drift space, dynamic focusing.

Г. О. Алексеев, Л. В. Стулова

ПРО ЕСТАФЕТНУ ВЗАЄМОДІЮ СТРИЧКОВОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПОТОКУ З БІЖУЧОЮ ХВИЛЕЮ ЗА НАЯВНОСТІ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Проведено теоретичне дослідження колективної (естафетної) взаємодії широкого стрічкового електронного потоку з біжучою просторовою гармонією поля за наявності у просторі дрейфу поперечного статичного магнітного поля. Проаналізовано можливість створення високочастотних приладів типу клістрона біжучої хвилі, які використовують просторово-розподілену модуляцію швидкості електронів з наступним динамічним фокусуванням у просторі дрейфу.

Ключові слова: естафетна взаємодія, клістрон біжучої хвилі, стрічковий електронний потік, поперечне магнітне поле, простір дрейфу, динамічне фокусування.

Рукопись поступила 26.03.10 г.