

УДК 537.862

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КЛИСТРОНОВ С 3D ГРУППИРОВКОЙ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

Д. А. Михеев, В. Л. Саввин, Р. В. Егоров, К. Т. Ч. Ву

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический
факультет

119991, ГСП-1, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр.2

Статья поступила в редакцию 26 марта 2018 г.

Аннотация. При разработке клистронов приходится учитывать фундаментальные ограничения, связанные с нарастающим действием сил пространственного заряда при образовании более плотных электронных сгустков. Предложен новый 3D принцип группировки электронного потока в неоднородном магнитном поле. Использование 3D группировки электронного потока может помочь снизить влияние сил пространственного заряда. Проведена оценка эффективности клистрона с 3D группировкой электронного потока.

Ключевые слова: электронный пучок, группировка, пространственный заряд, клистрон.

Abstract. A new principle of electron beam grouping is proposed, which can be formulated as follows. Electrons with cyclotron rotation, having equal initial longitudinal velocities and entering inhomogeneous magnetic field, having different initial input coordinates, move as a result along different trajectories, experiencing different effect of the inhomogeneous magnetic field and, therefore, different change of longitudinal velocity. As a result of periodic changes of electron's input conditions, the continuous electron beam turns into a sequence of periodic electron concentrations. The principal difference of the considered 3D grouping of the electron beam from usual electron bunching during one-dimensional motion is that electron concentrations may not be accompanied by an increase of the spatial charge density. Due to the fact that the electron trajectories are three-dimensional and do not

coincide with the axis of the grouping region, electron concentrations will be distributed over the cross-sectional area of the drift tube. As a result, the spatial charge forces may generate significantly weaker influence on the grouping process.

The dynamic behavior of beam current harmonics at the process of 3D grouping is studied. It is shown that the amplitude of the first beam current harmonic can reach values close to the maximum amplitude at the “classical” grouping. The efficiency of the three-resonator klystron with a 3D grouping of electron beam was evaluated with an output power 2.5 kW. The calculated gain reached 40 dB, which is close to the value of the gain of the similar "classic" klystron.

Key words: electron beam, grouping, space charge, klystron.

Введение

В современных клистронах для формирования электронных сгущений используются многолучевые системы и сложные многорезонаторные группирователи, позволяющие реализовать высокие значения коэффициентов усиления и полезного действия [1-3]. Однако при их разработке приходится учитывать фундаментальные ограничения, связанные с нарастающим действием расталкивающих сил пространственного заряда при образовании более плотных электронных сгустков. Возможно, что ослабить эти ограничения, позволит использование нового принципа пространственной (3D) группировки электронного потока в неоднородном магнитном поле с аксиальной или плоской симметрией в отсутствии модуляции продольной скорости электронов [4]. Для наглядной демонстрации принципа 3D группировки электронного потока в неоднородном магнитном поле использованы те же предпосылки, что и в принципе «классической» группировки электронов, предложенного более 80 лет назад [5, 6].

Модель электронного пучка

Проиллюстрируем принцип 3D группировки электронов. Пусть до влета в область группирования (при $z < 0$) электронный поток, представляющий собой последовательность электронов, не связанных между собой полем

пространственного заряда, распространяется в однородном магнитном поле $B_0 = const$. Предположим, что при этом все электроны будут иметь одинаковые продольные скорости v_{z0} и циклотронное вращение с одинаковым циклотронным радиусом R_c и круговой частотой ω_c (Рис. 1).

$$\vec{v}_0 = \vec{e}_z \cdot v_{z0} + \vec{e}_\phi \cdot \omega_c \cdot R_c,$$

$$v_{z0} = const, \omega_c = const, R_c = const. \quad (1)$$

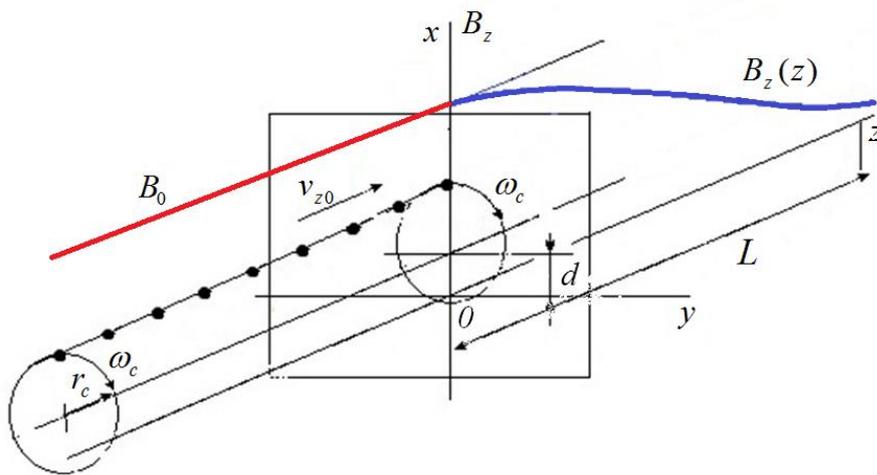


Рис. 1. Последовательность электронов, влетающая в область расширяющегося магнитного поля

Уравнения движения электронов в области группирования $z > 0$ в магнитном поле $B(x,y,z)$ будем рассматривать в нерелятивистском случае, аналогично «классической модели»:

$$\frac{d}{dt} v_x = -\frac{e}{m} (v_y B_z - v_z B_y),$$

$$\frac{d}{dt} v_y = -\frac{e}{m} (v_z B_x - v_x B_z),$$

$$\frac{d}{dt} v_z = -\frac{e}{m} (v_x B_y - v_y B_x). \quad (2)$$

где e – заряд электрона, m – масса электрона.

Магнитное поле $B(x,y,z)$ в области $z > 0$ будем считать неоднородным (аксиально- или плоско-симметричным), а его компоненты B_x , B_y и B_z будем вычислять согласно параксиальному приближению:

$$\begin{aligned} B_x &= -\frac{x}{2} \frac{d}{dz} B_z(z), \\ B_y &= -\frac{y}{2} \frac{d}{dz} B_z(z), \\ B_z &= B_z(z). \end{aligned} \quad (3)$$

Длину области группирования l удобно выражать в циклотронных длинах волн λ_c , а именно

$$l = N_c \lambda_c, \quad (4)$$

где N_c – число периодов вращения пучка.

Продольная скорость на входе в область группирования определяется соотношением

$$v_{z0} = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}, \quad (5)$$

где U_0 – потенциал пучка на входе в область группирования.

Циклотронный радиус вращения электронов вычисляется как:

$$R_c = \frac{1}{\omega_c} \sqrt{\frac{2eU_0 W}{m}}, \quad (6)$$

где W – отношение поперечной мощности вращения электронов к мощности их продольного движения.

Численное моделирование процесса 3D группировки проведено в программной среде MATLAB. Моделирование проводилось численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Взаимное влияние частиц друг на друга не учитывалось. Начальные параметры модели представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Значение
Потенциал пучка, кВ	U_0	2
Начальная продольная скорость пучка, $\times 10^7$ м/с	v_{z0}	2,652
Индукция магнитного поля, Тл	B_0	0,1072
Циклотронная частота, ГГц	f_c	3
Циклотронный радиус, мм	R_c	2,437
Начальная фаза влета, град.	ϕ_0	0
Отношение поперечной энергии к продольной	W	2
Параметр изменения магнитного поля	C_0	0,7
Длина области взаимодействия (в циклотронных длинах волн)	l	5

Пространственная группировка электронного потока в расширяющихся магнитных полях с аксиальной и плоской симметрией

В области группирования $z > 0$ магнитное поле $B(x,y,z)$ будем считать аксиально- или плоско-симметричным (АСП или ПСП) и расширяющимся вдоль оси z с длиной изменения l [4].

Для компонент магнитного поля в области $z > 0$ для случая АСП будем использовать следующие приближения:

$$\begin{aligned}
 B_x(x,z) &= x \frac{\pi}{4l} B_0 (1 - C_0) \sin \frac{\pi z}{2l}, \\
 B_y(y,z) &= y \frac{\pi}{4l} B_0 (1 - C_0) \sin \frac{\pi z}{2l}, \\
 B_z(z) &= 0.5 B_0 (1 + C_0 + (1 - C_0) \cos \frac{\pi z}{l}).
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Для ПСП в области $z > 0$ компоненты магнитного поля имеют вид:

$$\begin{aligned}
 B_x(x,z) &= x \frac{\pi}{2l} B_0 (1 - C_0) \sin \frac{\pi z}{2l}, \\
 B_y(y,z) &= 0, \\
 B_z(z) &= 0.5 B_0 (1 + C_0 + (1 - C_0) \cos \frac{\pi z}{l}).
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Введем параметр несоосности d (вдоль оси x на Рис. 1.) между осью симметрии магнитного поля и осью циклотронного вращения электронов.

Наглядное представление о группировке в свободном пространстве дает пространственно-временная диаграмма движения электронов (рис. 2), по которым можно проследить изменение траекторий электронов в пространстве дрейфа $z = const$ в зависимости от времени и фазы влета электронов в область взаимодействия.

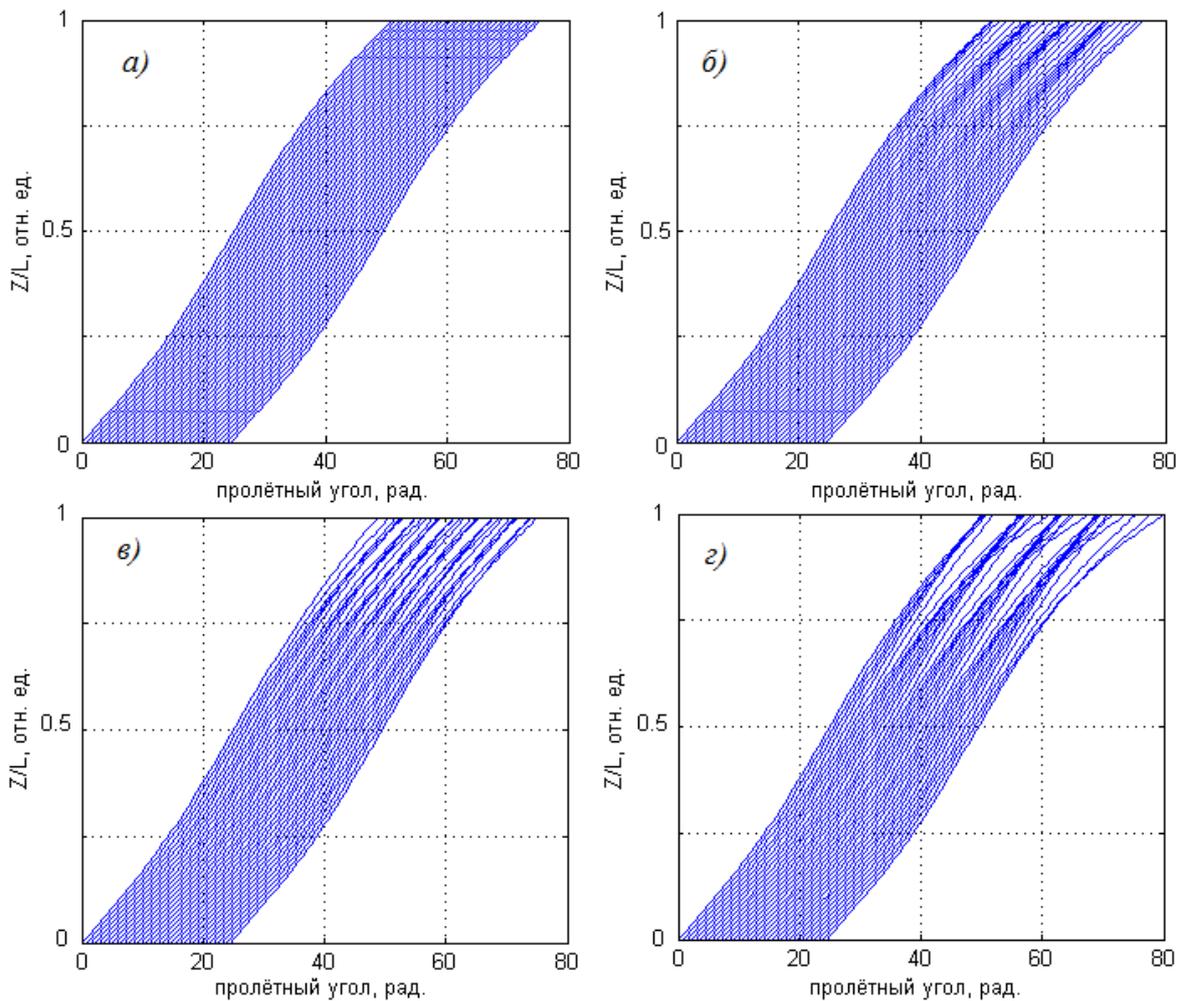


Рис. 2. Траектории $z(\omega t)$ для последовательности электронов в расходящемся магнитном поле: а) $d = 0$ (АСП), б) $d = R_c/8$ (АСП), в) $d = 0$ (ПСП), г) $d = R_c/8$ (ПСП). Число периодов влета $n = 4$.

Для случая АСП при соосном влете потока ($d = 0$) в область группирования сгустков тока не образуется (Рис. 2а). Однако в случае $d \neq 0$

электроны ускоряются по-разному под воздействием неоднородной радиальной компоненты магнитного поля и движутся по различным траекториям. В итоге в потоке образуются периодические сгущения тока электронов, пересекающих сечения $z=const$ (Рис. 2б). На один период влета электронного пучка приходится один сгусток тока.

В отличие от АСП, в случае ПСП эффект группирования электронов наблюдается и при соосном влете электронов в область группирования (Рис. 2в). Отметим, что при этом на один период влета потока приходится два электронных сгущения. При $d \neq 0$ ситуация схожа со случаем АСП: два сгустка сливаются в один, и на один период влета пучка вновь приходится один сгусток тока (Рис. 2г).

Спектральный анализ электронного пучка

Представляется полезным рассмотреть процесс модуляции тока $I(t)$ электронного пучка, проходящего через различные сечения $z = const$ области 3D группирования, в зависимости от времени. Для анализа спектрального состава тока пучка использованы результаты расчета 3D группировки для промежутка времени влета электронов, соответствующего 1000 периодам ΔT (эквивалент бесконечного числа периодов). Для наглядности на рис. 3 далее будет изображено $\Delta T = 20$ периодов тока пучка.

Проведен Фурье-анализ полученных зависимостей тока пучка от времени с целью определения максимальных амплитуд гармоник тока. Соответствующая характеристика $I(f)$ вычисляется сразу после определения $I(t)$ согласно дискретному преобразованию Фурье

$$I(f_k) = \sum_{n=0}^{N-1} I(t_n) e^{-i2\pi f_k t_n}, \quad (9)$$

где $t_n = Tn/N$, $f_k = k/T$, $k = 0, \dots, N - 1$, $n = 0, \dots, N - 1$ N – количество компонент разложения, T – время, в течение которого брались входные данные.

Для расчета $I(f)$ используется алгоритм быстрого преобразования Фурье, встроенный в программную среду MATLAB, значительно уменьшающий время численных расчетов. Характеристики тока нормируются на величину тока I_0 на входе в область неоднородного магнитного поля. Анализируемый спектральный диапазон составил $\Delta f = 0-30$ ГГц.

В начале области 3D группирования $z = 0$ электронный поток однороден, ток пучка не модулирован и остается постоянным. В частотном спектре тока пучка присутствует только «нулевая» гармоника – постоянная составляющая тока. Однако с увеличением z начинает наблюдаться модуляция тока пучка, проходящего через сечение электронного потока $z=const$.

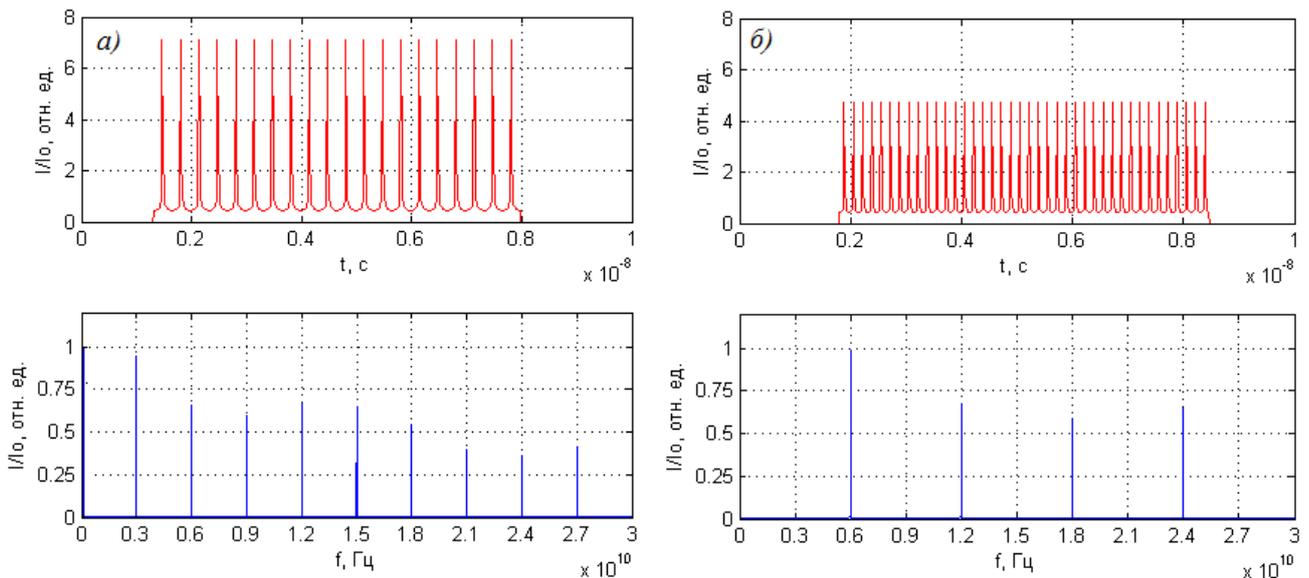


Рис. 3. Зависимость тока пучка от времени (верхний ряд) и соответствующий спектральный состав тока пучка (нижний ряд) *a)* $d = R_c$, $z/l = 0,6$ (АСП), *б)* $d = 0$, $z/l = 0,7$ (ПСП).

По мере распространения электронов вдоль области неоднородного магнитного поля из-за искажения формы сгущения электронов в частотном спектре тока начинают наблюдаться высшие гармоники, соответствующие частотам $m f$, где m – номер соответствующей гармоники тока (рис. 3).

Отметим, что для ПСП при $d = 0$ наблюдаются только четные гармоники тока (рис. 3б), что объясняется симметрией задачи.

Анализ спектрального состава тока электронного пучка показал, что интенсивность группировки в неоднородных расширяющихся магнитных полях может быть близка к классическому случаю одномерной группировки электронов в клистронах. Например, для случая АСП максимальное значение отношения тока первой гармоники к начальному току пучка может достигать $I/I_0 = 1,07$ (Рис. 4а). Для случая ПСП максимальное значение отношения тока второй гармоники к начальному току пучка может достигать $I/I_0 = 1,02$ (Рис. 4б). При «классической» группировке электронов в пролетном клистроне максимальное отношение составляет $I/I_0 = 1,16$.

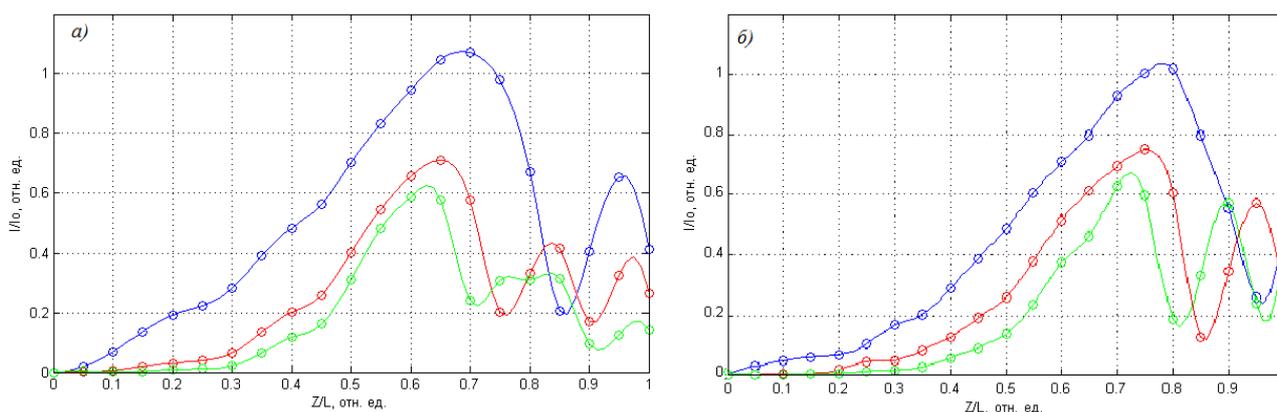


Рис.4.Изменение значений гармоник тока вдоль области взаимодействия электронного пучка с магнитным полем:

а) АСП, $d = R_c$, первая гармоника тока $f = 3$ ГГц (синяя кривая), вторая $2f = 6$ ГГц (красная кривая), третья $3f = 9$ ГГц (зеленая кривая),

б) ПСП, $d = 0$, вторая гармоника тока $2f = 6$ ГГц (синяя кривая), четвертая $4f = 12$ ГГц (красная кривая), шестая $6f = 18$ ГГц (зеленая кривая).

Особенности пространственной 3D группировки электронного потока в неоднородных магнитных полях

Отметим принципиальные отличия рассмотренной 3D группировки электронного потока от группировки при одномерном движении электронов.

Во-первых, 3D группировка возможна в отсутствии модуляции продольной скорости электронов. В случае АСП задача является многофакторной, но определяющим фактором является наличие сдвига между осью симметрии магнитного поля и осью циклотронного вращения электронов. При совпадении осей группировка электронов не наблюдается. В случае ПСП группировка электронов присутствует как при совпадении осей, так и при их сдвиге относительно друг друга. При этом в случае совпадения оси симметрии магнитного поля с осью циклотронного вращения на один период влета электронного потока приходится два электронных сгущения.

Во-вторых, сгущения электронов при 3D группировке могут не сопровождаться увеличением плотности пространственного заряда в отличие от группировки при одномерном движении электронов. Сгущение электронов при 3D группировке представляет собой увеличение числа электронов, пересекающих сечения $z=const$ в единицу времени. Однако из-за того, что траектории электронов трехмерны и не совпадают с осью группирователя, точки их пересечения с плоскостью $z=const$ распределены по площади этого сечения, а не сосредоточены вблизи оси, как при «классической» одномерной группировке. В результате силы пространственного заряда могут существенно слабее влиять на процесс пространственной группировки электронов и выходные характеристики микроволновых устройств.

Таким образом, принцип пространственной 3D группировки электронного потока в неоднородных магнитных полях можно сформулировать следующим образом:

Электроны с циклотронным вращением, имеющие одинаковые начальные скорости и поступающие в пространство группировки с неоднородным магнитным полем в различные моменты времени, обладая разными начальными координатами влета, движутся в результате по различным траекториям, испытывая разное воздействие сил неоднородного магнитного поля. В силу этого электронный поток превращается из однородного в состоящий из последовательности периодических сгущений электронов.

Оценки возможного применения эффекта пространственной группировки в клистронах

Эффект пространственной группировки может быть применен при конструировании нового типа клистронов. Предлагается следующая схема клистронного усилителя (Рис. 5а). Входной сигнал поступает во входной резонатор с поперечным высокочастотным электрическим полем (резонатор Каччия). На выходе из резонатора продольная скорость остается неизменной, однако электронам пучка передается энергия внешнего сигнала в виде циклотронного вращения. Этот процесс характерен для многих известных циклотронных усилителей и преобразователей [7-10].

В случае АСП для возникновения процесса 3D группировки электронная пушка и цилиндрический резонатор должны быть смещены относительно оси симметрии сопровождающего магнитного поля (Рис. 5б), создаваемого внешней магнитной системой клистрона. В случае ПСП смещение узлов клистрона производить необязательно.

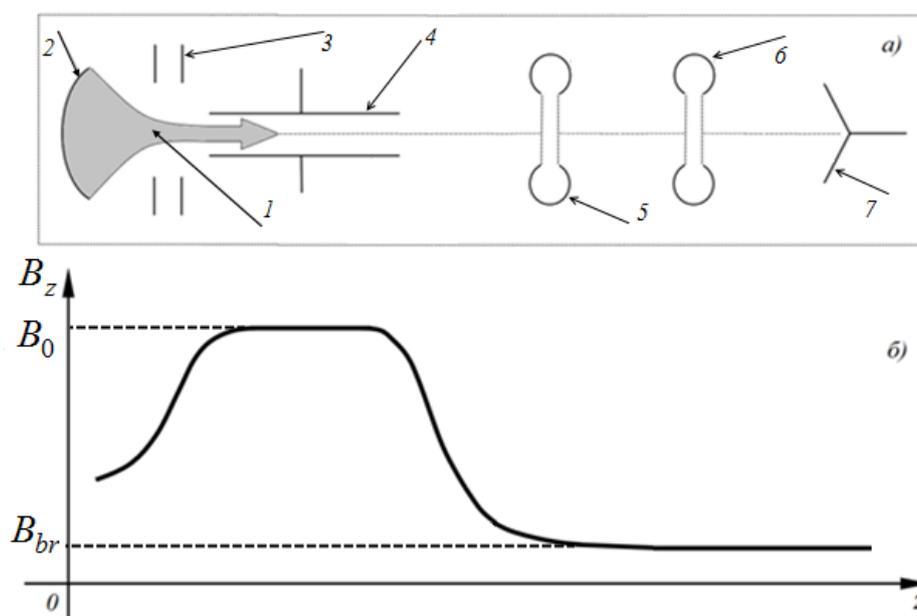


Рис. 5. Схема клистрона с поперечной модуляцией электронного потока (а) и профиль расширяющегося магнитного поля (б): 1 – сфокусированный электронный пучок, 2 – катод, 3 – анод, 4 – входной резонатор типа Каччия, 5 – дополнительный группирователь, 6 – выходной резонатор, 7 – коллектор.

Для повышения коэффициента и КПД клистрона целесообразно использовать дополнительную группировку потока в многорезонаторном группирователе, аналогично «классической» схеме. Особенностью этого процесса является отклонение траекторий группируемых электронов от оси резонаторов и незначительный рост плотности пространственного заряда несмотря на значительную модуляцию тока пучка. В сечении устройства, где первая (для случая АСП) или вторая (для случая ПСП) гармоника тока принимает максимальное значение, необходимо установить выходной резонатор, применяемый в классических клистронных усилителях. Тем самым из пучка будет отобран усиленный сигнал, введенный во входном резонаторе с поперечным электрическим полем. Отработанный пучок оседает на коллектор клистрона.

Результаты оценки коэффициента полезного действия клистронного усилителя (без дополнительного группирователя) с вращающимся электронным потоком представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Параметр	Обозначение	Значение
Ток пучка, мА	I_0	200
Ускоряющий потенциал, кВ	U_0	25
Радиус пучка, мм	R_b	0,5
Напряженность магнитного поля, Тл	B_0	0,1072
Напряженность бриуллиновского магнитного поля, Тл	B_{br}	0,0742
Циклотронная частота, ГГц	f_c	3
Циклотронный радиус, мм	R_c	0,5
Расчетное КПД клистрона	η	0,5 (50%)

По результатам расчетов входная мощность СВЧ оказалась равной $P_{in} = 25$ Вт при выходной мощности $P_{out} = 2500$ Вт. В итоге рассчитанный коэффициент усиления составил $K = 40$ дБ, что близко к значению

коэффициент усиления «классического» трехрезонаторного клистрона (34-35 дБ).

Заключение

Принципиальное отличие рассмотренной 3D группировки электронного потока от группировки при одномерном движении электронов, заключается в том, что сгущения электронов при 3D группировке могут не сопровождаться увеличением плотности пространственного заряда. Из-за того, что траектории электронов трехмерны и не совпадают с осью группирователя, сгущения электронов будут распределены по площади поперечного сечения группирователя, а не сосредоточены вблизи оси, как при «классической» одномерной группировке. В результате силы пространственного заряда могут существенно слабее влиять на процесс группировки.

В АСП пространственная 3D группировка электронного потока возникает в условиях несоосности между магнитным полем и осью циклотронного вращения электронов. В ПСП в случае, когда ось вращения потока лежит в плоскости симметрии магнитного поля, в потоке возбуждаются только четные гармоники плотности тока.

Эффект пространственной группировки электронов можно применить при конструировании клистронных усилителей с пучками с циклотронным вращением. Несомненным плюсом данного типа клистронов является ослабление действия сил пространственного заряда на процесс группировки. Кроме того, группировка электронов будет происходить без предварительной модуляции электронов по скорости. К отрицательным моментам следует отнести необходимость высоких значений ускоряющего потенциала (десятки кВ) и импеданса (сотни кОм) потока для достижения приемлемых значений коэффициента усиления (30-50 дБ).

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках выполнения работ по научному проекту № 16-32-00826 мол_а.

Литература

1. Акимов П. И. и др. Импульсный многолучевой клистрон для питания малогабаритного линейного ускорителя электронов // Сборник статей V Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2016. Т1. С. 205-208.
2. Егоров Р. В., Гузилов И. А., Масленников О. Ю. Высокоэффективный многолучевой клистрон S-диапазона // Труды XV Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах». 2016. секция 6. С. 30-32.
3. Frejdovich I. A. et. al. Application of the Multi-Beam Klystrons with Reverse Permanent Magnet Focusing System in RF Systems of the Compact Electron Accelerators // Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2006. PP.307-308.
4. Михеев Д. А., Саввин В. Л. О группировке электронного пучка в неоднородных магнитных полях // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016. №5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may16/4/text.pdf>
5. Spangenberg K. R., Vacuum Tubes, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1948. 860 p.
6. Slater J. C., Microwave Electronics, D. Van Nostrand Co., Inc., Princeton, N. Y., 1950. 406 p.
7. Пеклевский А. В., Саввин В. Л., Сухоруков А. П. Нелинейные поперечно-волновые взаимодействия в расходящихся аксиально-симметричных магнитных полях // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. Т. 72. №12. С. 1785-1788.
8. Ванке В. А., Лопухин В. М., Саввин В. Л.. Сверхмалозумящие усилители циклотронных волн // Успехи Физических Наук. 1969. Т. 99. №4. С. 545-572.
9. Ванке В. А.. Поперечные волны электронного потока в микроволновой электронике // Успехи Физических Наук. 2005. Т.175. № 9. С.957-978.

10. Vanke V. A., Savvin V. L. Cyclotron-Wave Converter for SPS Energy Transmission System // Proc. Of Sec. Intern. Symp. Power from Space. Paris. 1991. PP. 515-520.

Для цитирования:

Д.А. Михеев, В.Л. Саввин, Р.В. Егоров, К.Т.Ч. Ву. О возможности создания клистронов с 3D группировкой электронного потока. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr18/1/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.4.1