

ВЛИЯНИЕ ТОКА ПУЧКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ ГЕНЕРАТОРА О-ТИПА С МАГНИТНЫМ ФОКУСИРУЮЩИМ ПОЛЕМ

Е.Н.Одаренко

*Харьковский государственный университет, радиофизический факультет
310077, Харьков, пл. Свободы, 4*

Поступила в редакцию 26 октября 1998 г.

Рассматривается нелинейная стационарная теория резонансного генератора О-типа миллиметрового диапазона с релятивистским электронным потоком. Основное внимание уделено режиму больших рабочих токов, где достигаются наибольшие уровни выходной мощности. Рассматривается влияние индукции фокусирующего поля и величины релятивистского фактора на эффективность электронно-волнового взаимодействия при различных значениях тока пучка. Установлены основные причины и механизмы изменения электронного КПД при варьировании параметров системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: релятивистский электронный прибор, многомерная модель, эффективность взаимодействия, токооседание, пространство взаимодействия.

В работе исследуется многомерная модель релятивистского резонансного генератора О-типа с длительным взаимодействием (оротрон, генератор дифракционного излучения (ГДИ), ладертрон, ледатрон и др.) в режиме больших рабочих токов. Увеличение тока пучка или отношения рабочего тока к пусковому является одним из методов повышения мощности и эффективности электронно-волнового взаимодействия в приборах рассматриваемого класса [1]. Кроме того, ряд важных практических применений мощных электронных устройств в радиолокационной технике обуславливает необходимость работы приборов в импульсном режиме, для которого характерно использование больших рабочих токов. В связи с этим актуальной является задача исследования физических процессов в электронных приборах с мощными электронными потоками с целью поиска и разработки новых возможностей повышения эффективности таких устройств. Использование для этих целей многомерных моделей электронно-волнового взаимодействия позволяет учесть ряд важных явлений (например, токооседание на замедляющую систему, высокочастотное расслоение пучка и др.), которые могут оказывать существенное влияние на характеристики мощных приборов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Ленточный электронный пучок толщины Δ пропускается через резонатор (открытый или объемный) вблизи поверхности замедляющей системы. Фокусировка заряженных частиц осуществляется магнитостатическим полем. Электрическое высокочастотное поле синхронной с пучком пространственной гармоникой считается двумерным: $\vec{E} = (0, E_y, E_z)$

$$E_y = C_s f(y) \Psi(z) \exp[i(\beta y - \omega t)]; \quad E_z = iE_y \quad (1)$$

где C_s - комплексная амплитуда s -того колебания, $f(y)$ и $\Psi(z)$ - продольная и поперечная амплитудные огибающие соответственно, $\beta = \omega / v_\phi$, ω - частота автоколебаний, v_ϕ - фазовая скорость замедленной волны. Функция $\Psi(z)$ характеризует поперечную неоднородность высокочастотного поля и в данном случае может быть представлена следующим образом: $\Psi(z) = \exp(-\Gamma z)$, где $\Gamma = (\omega / c) \sqrt{c^2 / v_\phi^2 - 1}$ - поперечное волновое число, c - скорость света. Магнитное фокусирующее поле также полагается двухкомпонентным и в общем случае неоднородным: $\vec{B} = (0, B_y, B_z)$, $B_y \equiv B_y(y, z)$, $B_z \equiv B_z(y, z)$.

Исходная самосогласованная система уравнений состоит из векторного уравнения движения релятивистской частицы:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{e}{m\gamma} \operatorname{Re} \left\{ \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} - \frac{\vec{v}}{c^2} (\vec{v} \cdot \vec{E}) \right\} \quad (2)$$

и уравнения возбуждения высокочастотной электродинамической системы электронным пучком [2]:

$$\frac{dC_s}{dt} - i(\omega - \omega_s)C_s = \frac{I}{N\pi\Delta} \int_0^{2\pi} \int_0^L \int_{\Delta} \frac{\vec{v}}{v_y} \vec{E}_s^* \exp(i\omega t) dz dy d(\omega t) \quad (3)$$

где $\vec{v}$ - вектор скорости электрона, t - время, e и m - заряд и масса покоя электрона, γ - релятивистский фактор, $\vec{B}$ - вектор индукции фокусирующего поля, ω_s - собственная частота s -той моды, I - ток пучка, N - норма колебаний, L - длина пространства взаимодействия.

Важной характеристикой, анализ которой позволяет установить ряд закономерностей физических процессов при электронно-волновом взаимодействии, является комплексная амплитуда первой гармоники конвекционного тока пучка I_ω . Поскольку в данной работе рассматриваются электронные приборы О-типа, то основную роль играет продольная составляющая тока. В этом случае усредненную по толщине пучка комплексную амплитуду тока можно представить в виде:

$$I_\omega = \frac{1}{\pi\Delta} \int_{\Delta} \int_0^{2\pi} \exp[i(\theta + \varphi)] d\varphi dz; \quad (4)$$

где $\theta = \omega t - \beta_0 y - \varphi_0$, β_0 - электронное волновое число, φ_0 - начальная фаза.

Модуль величины I_ω в первом приближении может служить мерой плотности электронов в сгустках, а аргумент характеризует относительное фазовое расположение сгустков и синхронной с пучком замедленной волны [3].

Уравнения (2) и (3) решались численно в режиме установившихся колебаний ($d/dt = 0$) с начальными условиями, соответствующими автогенератору.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Численные расчеты проводились для гауссовской формы продольной амплитудной огибающей высокочастотного поля (ГДИ, оротрон) и для однородного фокусирующего магнитного поля с различными значениями индукции. Используемая модель позволяет исследовать электронно-волновые системы с произвольным пространственным распределением фокусирующего поля и различными амплитудными огибающими высокочастотного поля в электродинамической системе прибора.

На рис.1 представлены зависимости максимального по зоне генерации значения электронного КПД η от параметра эффективности взаимодействия G , который пропорционален рабочему току пучка. Штриховые кривые построены для достаточно сильного фокусирующего поля, когда траектории электронов можно считать прямолинейными

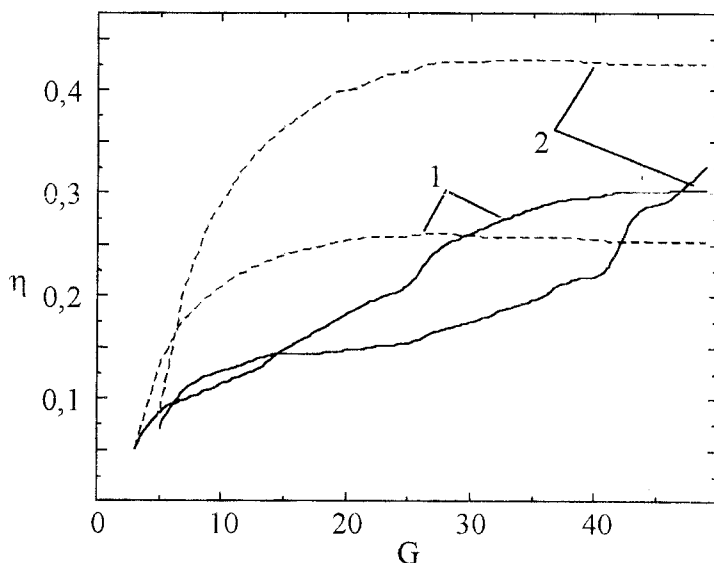


Рис.1. Зависимости КПД от нормированного рабочего тока
(1 - $\gamma = 1.01$; 2 - $\gamma = 1.3$).

($\omega_c / \omega = 0.4$, где ω_c - циклотронная частота, ω - частота автоколебаний). Сплошные кривые построены для $\omega_c / \omega = 0.1$. В случае сильного магнитного поля увеличение нормированного рабочего тока сопровождается повышением КПД с последующим насыщением. Эти результаты соответствуют полученным в рамках одномерной модели, что вполне закономерно, поскольку здесь основную роль играет продольное электронно-волновое взаимодействие. Снижение индукции фокусирующего магнитостатического поля приводит к существенному изменению зависимостей $\eta(G)$. Во всем рассматриваемом диапазоне значений параметра G происходит повышение электронного КПД с увеличением рабочего тока. Однако в целом уменьшение индукции фокусирующего поля сопровождается снижением эффективности взаимодействия в приборе. Основной причиной этого снижения КПД является токооседание электронов на поверхность замедляющей системы.

В постановке задачи начальные скорости электронов задавались одномерными. Следовательно, наличие поперечных смещений траекторий электронов обусловлено их взаимодействием с поперечной компонентой высокочастотного электрического поля. Следует отметить, что с увеличением параметра G разность между значениями КПД для сильного и слабого магнитного поля уменьшается. Более того, при $G > 28$ КПД нерелятивистского генератора с $\omega_c / \omega = 0.1$ превышает КПД прибора с замагниченным пучком. Данный эффект обусловлен фазовой сортировкой электронов за счет токооседания. Т.е., при больших значениях рабочего тока реализуются условия, когда оседают преимущественно

ускоряющиеся частицы [4]. На

рис.2 представлены зависимости фазы первой гармоники высокочастотного тока пучка от продольной координаты. Тормозящей фазе высокочастотного поля соответствуют значения

$-\frac{\pi}{2} < \phi < \frac{\pi}{2}$. Штриховая кривая построена для случая

$\omega_c / \omega = 0.4$; $G = 15$. Очевидно, что токооседание приводит к изменению фазового местоположения электронного сгустка в пространстве взаимодействия. Фазовая сортировка сопровождается смещением области формирования второго сгустка из ускоряющей фазы в тормозящую (кривая 2). В релятивистском генераторе этот механизм повышения

эффективности взаимодействия практически не реализуется (рис.3). Это связано, прежде всего, с более длительным процессом группирования электронов из-за увеличения их релятивистской массы. Поскольку токооседание слабо зависит от величины релятивистского фактора γ , то оказывается, что

существенное уменьшение количества электронов начинается в области пространства взаимодействия, где пучок еще не достаточно сгруппирован.

Чтобы реализовать механизм фазовой сортировки в релятивистском генераторе, т.е. обеспечить возможность работы прибора со слабыми фокусирующими полями, следует изменить условия группирования релятивистского электронного потока. С одной стороны, этого можно добиться дальнейшим наращиванием рабочего тока ($G > 50$), что может оказаться затруднительным для практической реализации. С другой стороны, можно использовать неоднородные фокусирующие поля, чтобы изменить токораспределение в пространстве взаимодействия и "действующую" на электроны амплитудную огибающую высокочастотного поля.

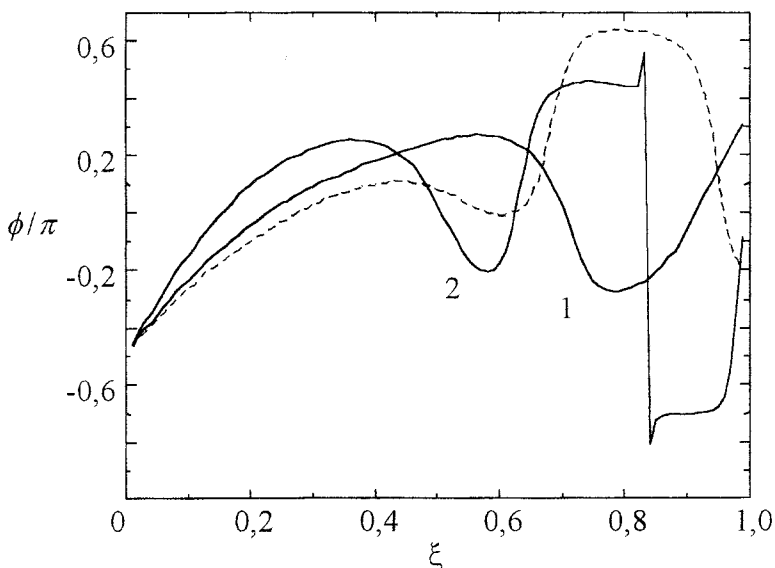


Рис.2. Фаза высокочастотного тока.
(1 - $G=15$; 2 - $G=40$).

Следует отметить, что сортировка тормозящихся и ускоряющихся частиц осуществляется не только при их оседании на замедляющую систему, но и при удалении траектории от нее за счет поперечной неоднородности высокочастотного поля. В этом случае наиболее удаленные от замедляющей системы электроны дают наименьший вклад в процесс энергообмена с высокочастотным полем.

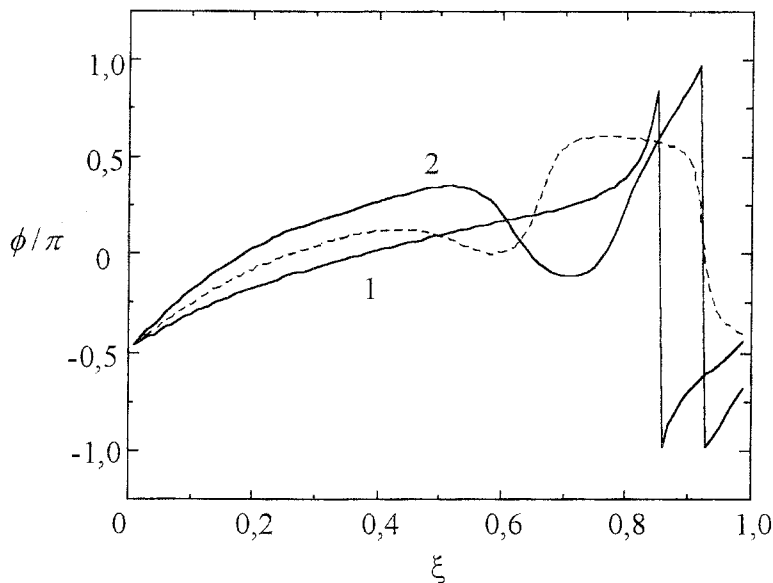


Рис.3. Фаза высокочастотного тока (штриховая кривая – $G=30$; $\omega_c / \omega = 0.4$, сплошные кривые – $\omega_c / \omega = 0.1$ 1 – $G=15$; 2 – $G=45$).

ВЫВОДЫ

Проведен теоретический анализ особенностей электронно-волнового взаимодействия в релятивистском приборе для различных значений рабочего тока пучка и индукции фокусирующего поля. Изменения в характеристиках прибора при варьировании величины тока пучка или отношения рабочего тока к пусковому вызваны прежде всего различиями в условиях группирования заряженных частиц. Существенное влияние на эти процессы оказывает величина индукции фокусирующего поля. Ослабление фокусировки сопровождается увеличением роли двумерных эффектов (оседание электронов на замедляющую систему, поперечное взаимодействие электронов и медленной волны и др.) в процессе энергообмена. Токооседание, с одной стороны, снижает эффективность взаимодействия из-за сокращения количества электронов, а с другой – при определенных условиях реализует фазовый отбор частиц пучка и, тем самым, повышает КПД прибора. Полученные результаты позволяют предположить возможность фазовой сортировки электронов в релятивистском приборе за счет изменения пространственного распределения фокусирующего поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дж.Е.Роу. Теория нелинейных явлений в приборах сверхвысоких частот. М., Сов. Радио, 1969, 616 с.
2. Одаренко Е.Н., Чурсин В.С., Шматько А.А. // Вестник Харьковского университета, 1998 , №405, С.124-128.
3. Филимонов Г.Ф., Бадлевский Ю.Н. Нелинейное взаимодействие электронных потоков и радиоволн в ЛБВ. М., Сов. Радио, 1971, 184 с.
4. Одаренко Е.Н., Шматько А.А. // Радиотехника и электроника, 1994, вып. 4, С. 653-661.