

02;10;09

## Мазер на циклотронном резонансе в режиме „нерезонансной“ группировки электронов

© И.В. Бандуркин, А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
E-mail: savilov@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 5 июля 2005 г.

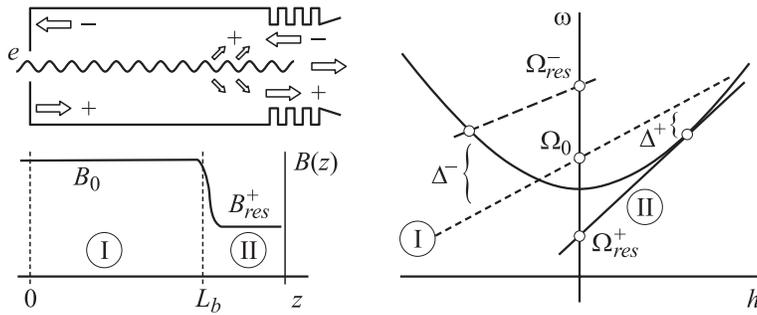
Для мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) предложена новая схема, основанная на эффекте группировки электронов в поле нерезонансной волны. В таком приборе за счет профилирования магнитного поля пространство электронно-волнового взаимодействия делится на две секции, причем во входной секции величина магнитного поля такова, что рабочая волна относительно далека от циклотронного резонанса с электронами. Показано, что при определенных условиях движение частиц в поле нерезонансной волны сопровождается эффективной группировкой электронов без заметного изменения их энергии. Во второй секции, где величина магнитного поля близка к резонансному значению, происходит эффективное излучение рабочей волны сгруппированным электронным пучком. Таким образом, в регулярной электродинамической системе реализуется электронно-волновое взаимодействие клистронного типа, с разделением процессов группировки частиц и излучения. Предложенная схема может быть использована для повышения эффективности МЦР различных конфигураций. Она особенно привлекательна с точки зрения реализации МЦР-генераторов с умножением частоты, когда группировка частиц в поле нерезонансной низкочастотной волны сопровождается излучением волны на умноженной частоте.

PACS: 76.20.+q, 84.40.Ik

В традиционных режимах работы мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) [1,2] электронный пучок во всем пространстве взаимодействия находится вблизи резонанса с электромагнитной волной, что выражается соотношением

$$\omega \approx h\nu_{\parallel} + \Omega, \quad (1)$$

где  $\omega$  и  $h$  — частота и продольное волновое число волны,  $\nu_{\parallel}$  и  $\Omega$  — продольная скорость и гирочастота электронов. В данной работе пред-



**Рис. 1.** Схема одночастотного МЦР-генератора с пространством взаимодействия клистронного типа и соответствующая дисперсионная диаграмма. В первой секции ( $z < L_b$ ) электроны группируются в результате нерезонансного взаимодействия как с рабочей попутной волной (+), так и со встречной волной обратной связи (-). Во второй секции ( $z > L_b$ ), где магнитное поле близко к циклотронному резонансу с попутной волной, происходит генерация этой волны группированным электронным пучком.

лагается новая схема МЦР, основной отличительной чертой которой является длительное взаимодействие электронного пучка с волной, относительно далекой от резонанса (1). Далее такое взаимодействие будем условно называть „нерезонансным“, а критерий нерезонансности дадим ниже. На рис. 1 схематически изображен МЦР, в котором реализуется данный режим. В нем пространство взаимодействия электронного пучка с волноводной модой разделено на две секции. В первой секции магнитное поле таково, что равенство (1) нарушено. Как будет показано далее, при правильно подобранных величине и знаке отстройки резонанса внутри этой секции происходит эффективная группировка электронов. Во второй секции, где величина магнитного поля близка к резонансной, энергия сгруппированного пучка преобразуется в энергию излучения.

Покажем, что в предлагаемом режиме возможна эффективная группировка пучка. Воспользуемся универсальными асимптотическими уравнениями [3], описывающими изменения энергии электрона  $u$  и его фазы относительно волны  $\theta$

$$\frac{du}{dz} = \text{Im } a e^{i\theta}, \quad \frac{d\theta}{dz} = u - \Delta(z), \quad (2)$$

а также уравнением для нормированной комплексной амплитуды волны  $a$

$$\frac{da}{dz} = \pm i\rho, \quad \rho = \langle e^{-i\theta} \rangle_{\varphi, u_0}. \quad (3)$$

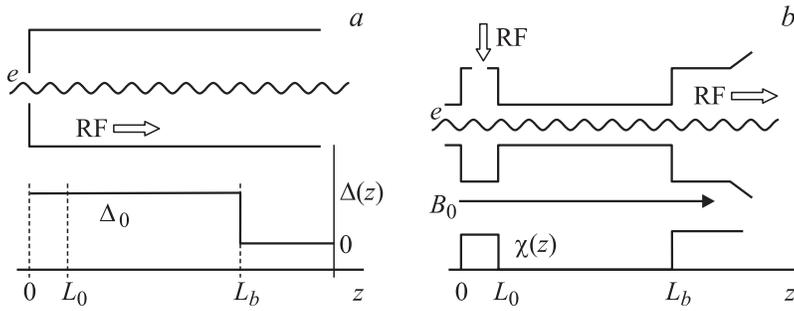
Здесь  $z$  — продольная координата,  $a$  — амплитуда волны,  $\Delta(z)$  — отстройка волны от резонанса с электронами,  $\rho$  — высокочастотная (ВЧ) гармоника тока. В правой части уравнения (3) случаю попутной рабочей волны соответствует положительный знак, а случаю встречной волны — отрицательный. Уравнения (2), (3) справедливы для широкого класса электронных приборов, основанных на инерционной (типа 0) группировке частиц, при условии относительно небольшого изменения их энергий в процессе электронно-волнового взаимодействия. Это условие всегда выполняется в случае „нерезонансного“ взаимодействия.

Начальными условиями являются условие на амплитуду волны на входе  $a(z=0) = a_0$  и равномерные распределения частиц по энергиям и фазам

$$\theta(z=0) = \varphi \in [0, 2\pi), \quad u(z=0) = u_0 \in [-U/2, U/2].$$

При этом электронный пучок на входе в пространство взаимодействия является негруппированным  $\{\rho(z=0) = 0\}$ , а параметр  $U$  играет роль ширины начального разброса электронов по скоростям.

Отсутствию электронно-волнового резонанса (1) соответствует большая отстройка  $\Delta$ . В приближении неизменной амплитуды волны ( $a = a_0$ ) уравнения (2) совпадают с уравнениями нелинейного маятника. На соответствующей фазовой плоскости  $(u, \theta)$  финитные и инфинитные траектории разделены сепаратриссой („глазком“)  $u(\theta) = \Delta \pm 2\sqrt{a}\sqrt{(1 - \cos\theta)/2}$ . Если при входе в пространство взаимодействия электрон оказывается внутри „глазка“, то и в процессе взаимодействия эта частица не покидает „глазок“, совершая финитное движение вокруг его центра с характерным периодом  $L_{syn} \sim 2\pi/\sqrt{a}$ . Такой электрон называют „резонансным“, или захваченным полем волны. Если же начальные параметры частицы соответствуют ее положению на фазовой плоскости вне „глазка“, то тогда ее фазовая траектория представляет собой инфинитную кривую, при движении вдоль которой фаза электрона  $\theta$  монотонно изменяется со скоростью  $d\theta/dz \approx u_0 - \Delta$ , а энергия  $u$  меняется периодически с периодом  $L \sim 2\pi/|u_0 - \Delta|$ . Такой электрон назовем „нерезонансным“, а „нерезонансным“ взаимодействием вообще будем называть тот случай, когда весь пучок на фазовой



**Рис. 2.** Схема прибора с профилированным резонансным параметром (отстройкой), основанного на группировке частиц в поле нерезонансной волны (*a*), и ее сравнение с клистроном (*b*), в котором нерегулярность микроволновой системы приводит к профилированию фактора связи электронов с волной  $\chi(z)$ .

плоскости находится вне „глазка“:

$$|\Delta| - U/2 = p\sqrt{a} > \sqrt{a}. \quad (4)$$

Данное неравенство представляет собой критерий „нерезонансности“, в котором  $p > 1$  — минимальная по пучку отстройка волны от резонанса с электронами, измеренная в полуширинах „глазка“.

Рассмотрим случай, когда отстройка  $\Delta(z)$  имеет профиль, изображенный на рис. 2, *a*. Если на входе в пространство электронно-волнового взаимодействия отстройка  $\Delta_0$  достаточно велика, так что  $p \sim 4 \div 5$  и для всех электронов пучка  $L_{\sim} \ll L_{syn}$  и  $|u(z) - u_0| \ll \sqrt{a}$ , то в нулевом приближении к решению уравнений (2) можно пренебречь изменением энергии  $u$  при интегрировании уравнения для фазы

$$\begin{aligned} \theta^{(0)} &= \varphi - (\Delta_0 - u_0)z, \\ u^{(0)} &= \text{Im} \frac{a_0}{i(\Delta_0 - u_0)} [e^{i\varphi} - e^{i\varphi - i(\Delta_0 - u_0)z}]. \end{aligned} \quad (5)$$

Появление первого слагаемого в скобках в выражении (5) навязано начальными условиями и соответствует модуляции энергии электронов на входе в пространство взаимодействия. Важным допущением при этом является наличие резкого нарастания амплитуды  $a$ .

Используя (5), несложно получить следующее приближение к решению для фазы и выражение для плотности тока

$$\theta^{(1)} = \varphi - (\Delta_0 - u_0)z + \text{Im} \frac{a_0}{i(\Delta_0 - u_0)} \left[ z e^{i\varphi} - \int_0^z e^{i\varphi - i(\Delta_0 - u_0)\xi} d\xi \right], \quad (6)$$

$$\rho^{(1)}(z) \approx i e^{i\Delta_0 z} \cdot F_{spr} \cdot J_1 \left( \frac{a_0}{\Delta_0} z \right), \quad F_{spr} = \frac{\sin(Uz/2)}{(Uz/2)}. \quad (7)$$

При выводе (7) использована малость последнего (интегрального) слагаемого в (6) по сравнению с линейно растущим первым.

Заметим, что в предлагаемой схеме группировка электронов возникает вследствие начальной модуляции их энергий, т.е. имеет тот же механизм, что и в обычном клистроне с продольной группировкой частиц (рис. 2, *b*). При этом аналогом входного резонатора клистрона, т.е. зоны, где происходит эффективная модуляция, играет короткий отрезок  $0 < z < L_0$  ( $L_0 = 1/\Delta$ ), на котором набег фазы волны относительно электронов невелик и соответственно взаимодействие носит резонансный характер. Отсюда следует и ограничение на резкость „включения“ амплитуды волны: очевидно, характерный масштаб этого „включения“ не должен превышать  $L_0$ .

Существенным отличием рассматриваемой системы от клистрона является то, что, несмотря на „нерезонантность“ волна может заметно влиять на группировку частиц в пространстве дрейфа. Это связано с появлением „горячего“ возмущения продольной структуры волны, индуцированного током (7) в соответствии с уравнением (3):

$$a^{(2)}(z) \approx a_0 \pm e^{i\Delta_0 z} \frac{i}{\Delta_0} J_1 \left( \frac{a_0}{\Delta_0} z \right) = a_0 \pm e^{i\Delta_0 z} a_1.$$

Здесь  $+/-$  соответствует попутной/встречной рабочей волне. Эта добавка является резонансной с электронами и приводит к появлению следующей поправки к плотности тока:

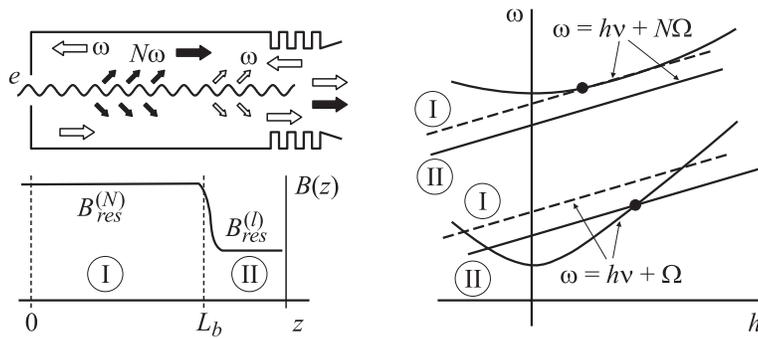
$$\rho^{(2)}(z) \approx i e^{i\Delta_0 z} \cdot F_{spr} \cdot J_1 \left( \frac{a_0}{\Delta_0} z [1 \mp z^2/12\Delta_0] \right). \quad (8)$$

Из сравнения (7) и (8) видно, что нефиксированность структуры волны более существенна при малой амплитуде входного сигнала (например, в усилителе), когда в первом приближении (7) плотность тока достигает своего максимума на большой длине  $z \approx \frac{|\Delta_0|}{a_0} \geq \sqrt{12|\Delta_0|}$ . Из выражения (8) также следует, что в МЦР с попутной волной необходимо работать в области отрицательных отстроек, а в МЦР со встречной волной — в области положительных отстроек.

Использование рассмотренного режима может обеспечить низкую чувствительность к скоростному разбросу частиц. Как следует из (7) и (8), влияние разброса существенно снижает эффективность группировки на длине  $z \geq 1/U$ , поэтому выполнение условия  $a_0/\Delta_0 U \geq 1$  является достаточным для достижения высокой плотности ВЧ-тока даже при значительном разбросе. Как можно видеть, это требование не противоречит условию „нерезонансности“ волны (4).

Предложенный режим может быть использован для повышения эффективности МЦР различных конфигураций. Так, на рис. 1 изображена схема генератора попутной волны. В нем электронно-волновое взаимодействие происходит в рабочем волноводе, который ограничен двумя рефлекторами; выходной рефлектор преобразует часть мощности попутной рабочей волны (+) во встречную волну обратной связи (-), а входной рефлектор замыкает цепь обратной связи. В МЦР естественным способом управления отстройки от синхронизма волны с пучком является профилирование продольного магнитного поля. При этом, как было показано выше, в случае попутной рабочей волны входная отстройка резонанса должна быть отрицательна ( $\Delta_0 > 0$ ), чему соответствует ситуация, когда входное значение гирочастоты превышает ее резонансное значение:  $\Omega_0 > \Omega_{res}^+$  ( $\Omega_{res} = \omega - hv_{||}$ ). Напротив, для волны, распространяющейся навстречу пучку, оптимальные условия для группировки частиц имеют место, когда  $\Omega_0 < \Omega_{res}^-$ . Как видно из дисперсионной диаграммы (рис. 1), это приводит к тому, что в секции группировки попутная рабочая волна и встречная волна обратной связи имеют „нужные“ отстройки ( $\Delta^+ < 0$ ,  $\Delta^- > 0$ ) и вследствие этого воздействуют на пучок со сравнимой интенсивностью.

Предложенная схема особенно перспективна для реализации МЦР с умножением частоты [4,5]. В таких приборах электронный пучок группируется относительно низкочастотной волной, которая поступает



**Рис. 3.** Схема двухчастотного МЦР-генератора с пространством взаимодействия клистронного типа и соответствующая дисперсионная диаграмма. В первой секции ( $z < L_b$ ) электроны группируются в результате нерезонансного взаимодействия с попутной и встречной компонентами запертой в резонаторе низкочастотной ( $\omega$ ) волны. Поскольку магнитное поле с этой секции соответствует циклотронному резонансу с высокочастотной ( $N\omega$ ) волной, процесс группировки частиц сопровождается излучением высокочастотной волны на высокой ( $N$ ) циклотронной гармонике. Во второй секции ( $z > L_b$ ), где магнитное поле близко к циклотронному резонансу с попутной компонентой низкочастотной волны, происходит генерация этой волны группированным электронным пучком.

на вход системы либо извне (умножитель с внешним сигналом), либо из цепи обратной связи (генераторный вариант). При этом, наряду с основной гармоникой тока на частоте этой волны, в пучке появляются также высшие гармоники, которые могут возбуждать высококачественные волны на частотах, кратных основной. В схеме с нерезонансной группировкой (рис. 3) отстройка для низкочастотной волны выбирается таким образом, чтобы в секции группировки пучок находился в резонансе с высокочастотной волной; при этом на низкой частоте схема функционирует аналогично одночастотной схеме генератора (рис. 1), а высокочастотный сигнал возбуждается высокой гармоникой тока в режиме лампы встречной или бегущей волны.

Авторы признательны В.Л. Братману и А.Э. Федотову за плодотворные дискуссии.

Работа поддержана РФФИ (проекты 04–02–17118 и 05–02–16852) и Фондом содействия отечественной науке.

## Список литературы

- [1] *Петелин М.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17. № 6. С. 902–908.
- [2] *Bratman V.L., Ginzburg N.S., Nusinovich G.S. et al.* // Int J. Electronics. 1981. V. 51. N 4. P. 541–567.
- [3] *Bratman V.L., Ginzburg N.S., Petelin M.I.* // Opt. Commun. 1979. V. 30. N 3. P. 409–412.
- [4] *Chu K.R., Guo H., Granastein V.L.* // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. N 24. P. 4661–4664.
- [5] *Hirshfield J.L.* // Phys. Rev. A. 1991. V. 44. N 10. P. 6845–6853.