

УДК 621.378.5: 621.385.6

К ТЕОРИИ МЦР-УСИЛИТЕЛЯ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ И ПОПЕРЕЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПОТОКОМ [1]

Ю. В. Быков, А. В. Гапонов, М. И. Петелин

Исследуются свойства усилительного мазера на циклотронном резонансе, основанного на взаимодействии электромагнитной волны с поперечным (относительно направления ее распространения) потоком электронов, движущихся по винтовым траекториям. В таком устройстве, используя гиротропию электронного потока, можно при соответствующем подборе параметров электродинамической системы обеспечить невзаимность усиления сигнала (благоприятной поляризацией обладают, например, поверхностные волны, в частности волны шепчущей галереи). Коэффициент полезного действия МЦР-усилителя может достигать таких же значений, как и в МЦР-монотроне (гиротроне).

1. Близость механизмов группировки электронов в мазерах на циклотронном резонансе (МЦР) и в СВЧ приборах типа «О» с прямолинейными электронными пучками позволяет поставить в соответствие каждому прибору типа «О» аналогичную ему разновидность МЦР [2]. Основные преимущества МЦР перед их «О» аналогами заключаются:

а) в возможности применения электродинамических систем с незамедленными электромагнитными волнами;

б) в возможности эффективного использования гиротропии потока вращающихся электронов, проявляющейся при резонансном воздействии на них высокочастотного поля.

Одним из приборов, в которых могут быть реализованы отмеченные выше достоинства мазеров на циклотронном резонансе, является МЦР-ЛПТ (лампа с поперечным током) — усилитель, основанный на взаимодействии электронов, движущихся по винтовым траекториям в постоянном магнитном поле, с электромагнитной волной, распространяющейся поперек магнитного поля. Простейшей моделью МЦР-ЛПТ является рассмотренный в [2] усилитель бегущей волны с активной средой, состоящей из возбужденных неизохронных осцилляторов с конечным временем жизни.

МЦР-ЛПТ является аналогом лампы с поперечным током типа «О» [3]. Однако в отличие от ЛПТ «О», где для усиления сигнала необходима близость между скоростью электронов и параллельной ей составляющей фазовой скорости волны, направляемой поверхностной замедляющей структурой, в МЦР-ЛПТ для того, чтобы электроны в среднем отдавали свою энергию полю, следует выполнить резонансное условие

$$\omega - n\omega_H \sim \beta_{\perp}^2 \omega_H^2 \quad (1)$$

(ω — частота усиливаемого сигнала, ω_H — циклотронная частота электрона, β_{\perp} — отношение вращательной скорости электрона к скорости света, $n = 1, 2, \dots$) и обеспечить достаточно длительное время τ пре-

бывания электронов в высокочастотном поле, необходимое для развития в электронном потоке эффективной квадратичной группировки [2],

$$\tau \sim \frac{2\pi}{\omega_H \beta_{\perp}^2}. \quad (2)$$

Фазовая скорость волны в МЦР-ЛПТ может быть произвольна, что позволяет использовать в усилителях этого типа электродинамические системы с гладкими стенками. Особенно привлекателен открытый волновод в виде изогнутого желоба, канализирующий волну шепчущей галереи (рис. 1), кото-

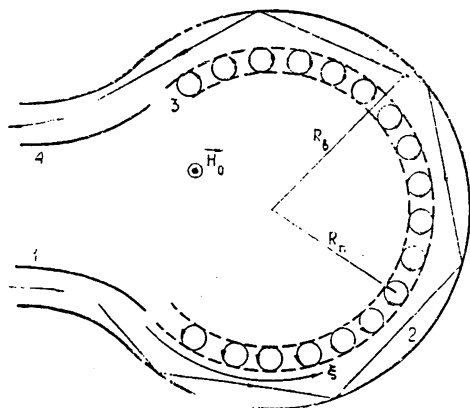


Рис. 1. Сечение МЦР-ЛПТ с волной шепчущей галереи:

1—входной волновод, 2—волновод в виде желоба, канализирующий волну шепчущей галереи, 3—поток электронов, движущихся по винтовым траекториям в статическом магнитном поле H_0 , 4—выходной волновод.

рая — при соответствующем подборе параметров волновода [4] — является единственной модой с малыми дифракционными потерями. Хотя эффективный поперечный размер такого волновода существенно превышает $\lambda = 2\pi c/\omega$, поперечная структура волны при не слишком большой плотности электронного потока является фиксированной, как в гирослотроне с высокочастотным резонатором [5], а зависимость мощности волны P от продольной координаты ξ меняется от режима к режиму и в каждом отдельном случае может быть определена из энергетического соотношения

$$P(\xi) = P_{\text{вх}} + \int_0^{\xi} \eta I U d\xi, \quad (3)$$

где $P_{\text{вх}}$ — входная мощность, $\eta = \eta(\Delta\omega_n, \tau, P)$ — локальный электронный КПД, представляющий собой долю энергии, отбираемую высокочастотным полем у элементарного электронного пучка, $\Delta\omega_n = \omega - n\omega_H$, I — электронный ток на единицу длины вдоль координаты ξ (рис. 1), U — напряжение пучка.

Максимальный коэффициент усиления МЦР-ЛПТ (как и любых других ламп с поперечным током — ЛПТ «О» [3], ЛПТ «М» [6], ЭУЛ [7]) ограничен, в первую очередь, условием отсутствия самовозбуждения из-за отражений волн от выходного и входного устройств усилителя,

$$K_+ K_- r_{\text{вх}} r_{\text{вых}} < 1.$$

Здесь K_+ , K_- — коэффициенты усиления прямой и обратной волн, $r_{\text{вх}}$, $r_{\text{вых}}$ — коэффициенты отражения волн от входного и выходного устройств. Гиротропия потока вращающихся электронов в МЦР-ЛПТ позволяет добиться — при надлежащем выборе электродинамической системы — существенной невязимости усиления, $K_+ \gg K_-$, и, соответственно, большого усиления сигнала при заданных значениях $r_{\text{вх}}$ и $r_{\text{вых}}$. Например, относительная эффективность взаимодействия винтового электронного пучка с прямой и встречной волнами шепчущей галереи в волноводе, образованном соосным потоком желобом

с азимутальным радиусом кривизны R_B (рис. 1), как и в гиросмотре [2, 5], работающем на модах шепчущей галереи, определяется соотношением ($n = 1$)

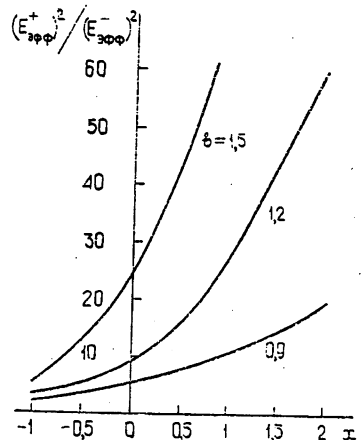
$$\frac{(E_{эфф}^+)^2}{(E_{эфф}^-)^2} = \frac{v^2(x)}{v^2(x+b)},$$

где $v(x)$ — функция Эйри*, $x = \frac{k(R_k - R_n) - 1}{(kR_k/2)^{1/3}}$, $b^3 = \frac{16}{kR_k}$, $k = 2\pi/\lambda$,

R_k — азимутальный радиус каустики волны, R_n — расстояние от оси желоба до осей вращения электронов; предполагается, что $kR_k \gg 1$. С удалением ведущих центров электронных орбит от металлической поверхности волновода отношение $(E_{эфф}^+)^2/(E_{эфф}^-)^2$ увеличивается — поляризация полей обеих волн, действующих на электрон, стремится к круговой (линейная фазовая скорость волн падает и их поля по структуре становятся подобны полям обычных замедленных поверхностных волн), причем направления вращения полей противоположны друг другу; усиливается преимущественно волна, поле которой вращается в том же направлении, что и электроны (рис. 2)**.

Полоса частот $\Delta\omega_{yc}$, в которой происходит усиление в МЦР-ЛПТ, имеет ширину порядка полосы циклотронного резонанса; в оптимальных по КПД режимах $\Delta\omega_{yc}/\omega \sim \beta_{\perp}^2$. При достаточно широких входном и выходном устройствах усилителя в нем, кроме того, возможно смещение полосы усиления путем изменения величины статического магнитного поля.

Рис. 2. Отношение функций, характеризующих эффективность взаимодействия прямой и встречной волн шепчущей галереи с электронным потоком; $n = 1$.



2. Если в усилителе выполнено резонансное условие (1) и обеспечено необходимое время пребывания электронов в поле волны (2), то эффективность взаимодействия волны с электронами зависит лишь от амплитуды высокочастотного поля, действующего на электроны. Коэффициент полезного действия усилителя будет, очевидно, иметь наибольшее значение, если каждый элементарный электронный пучок будет находиться в эффективном высокочастотном поле определенной, оптимальной, амплитуды, при которой локальный КПД взаимодействия электронов с волной максимален. Один из методов обеспечения постоянства амплитуды действующего на электроны поля волны, усиливающейся по мере прохождения через волновод***, заключается в использовании взаимодействия электронного потока с волнами, поля которых неоднородны в поперечном направлении. В частности,

* В области каустики моды шепчущей галереи функция Эйри близко аппроксимирует функцию Бесселя, описывающую радиальную зависимость магнитного вектора Герца [8].

** Аналогичный эффект использовался для обеспечения невзаимности усиления в МЦР-ЛБВ с трохоидальными электронными пучками [9].

*** Нарушение этого условия, как показано в [10], приводит к снижению КПД МЦР-ЛПТ.

в МЦР-ЛПТ с волной шепчущей галереи, увеличивая в направлении распространения волны расстояние между электронным потоком и поверхностью волновода, можно обеспечить оптимальную величину высокочастотного поля, действующего на электроны, на всей длине усилителя*. В таком режиме поток электромагнитной энергии увеличивается вдоль волновода по линейному закону: $P(\xi) = P_{\text{вх}} + (\eta_{\text{max}} I U) \xi$.

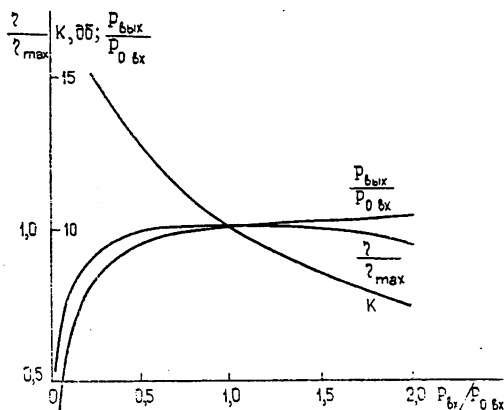


Рис. 3. Зависимости коэффициента усиления K , относительной выходной мощности $P_{\text{вых}}/P_{0\text{вх}}$ и относительного КПД η/η_{max} от величины относительной входной мощности $P_{\text{вх}}/P_{0\text{вх}}$ в МЦР-ЛПТ при $n=1$ (длина волновода соответствует коэффициенту усиления 10 дБ в оптимальном режиме).

Мощность волны в режимах, отличных от оптимального, может быть определена из соотношения (3) с использованием найденной в [5] зависимости локального КПД от параметров $\Delta\omega_n$, τ , P . Как следует из расчетов (рис. 3), в широком интервале изменения входных мощностей усилитель имеет достаточно большой КПД (близкий к максимальному КПД взаимодействия винтового пучка с электромагнитным полем в резонаторе), причем мощность на его выходе остается почти неизменной (рис. 3), иначе говоря, усилитель является стабилизатором мощности. Дело в том, что при амплитуде входного сигнала, меньшей оптимальной величины, $P_{\text{вх}} < P_{0\text{вх}}$, электронный пучок находится в режиме, далеком от насыщения, поэтому амплитуда волны нарастает вдоль волновода быстрее, чем в оптимальном режиме (рис. 4). При $P_{\text{вх}} > P_{0\text{вх}}$ локальный КПД взаимодействия элементарного электронного пучка с волной меньше максимального, и поэтому погонное приращение мощности меньше, чем в оптимальном режиме; в результате амплитуда волны при больших расстояниях от входа также стремится к оптимальному значению, но уже со стороны значений, больших, чем E_0 (рис. 4).

Из результатов интегрирования уравнения (3) при различных значениях параметра $\Delta\omega_n$ следует, что, как и ожидалось, полоса усиления сигнала в МЦР-ЛПТ близка к полосе циклотронного резонанса (а точнее, к полосе отрицательной реабсорбции циклотронного излучения).

Авторы благодарны В. К. Юлпатову за полезные дискуссии.

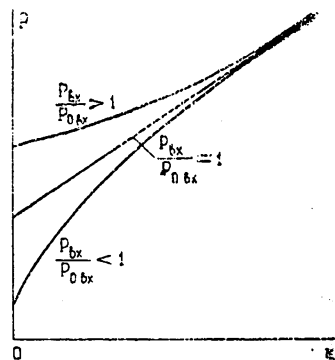


Рис. 4. Качественный вид зависимости мощности усиленной волны от продольной координаты ξ .

* Постоянства амплитуды действующего поля можно также добиться в усилителе с постоянным по длине волновода расстоянием между пучком и поверхностью волновода при использовании электродинамической системы с распределенным дифракционным выводом мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. В. Быков, А. В. Гапонов, М. И. Петелин, Аннотации и тезисы докладов XXIV Всесоюзной научной сессии НТОРЭиС им. А. С. Попова, М., 1968.
2. А. В. Гапонов, М. И. Петелин, В. К. Юлпатов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 10, № 9—10, 1414 (1967).
3. D. A. Dunn, W. A. Hartman, L. M. Field, G. S. Kino, Proc. IRE, 44, № 7, 879 (1956).
4. С. Н. Власов, Л. И. Загрядская, М. И. Петелин, Аннотации и тезисы докладов XXIV Всесоюзной научной сессии НТОРЭиС им. А. С. Попова, М., 1968.
5. М. А. Моисеев, Г. Г. Рогачева, В. К. Юлпатов, Аннотации и тезисы докладов XXIV Всесоюзной научной сессии НТОРЭиС им. А. С. Попова, М., 1968.
6. Р. А. Дудник, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 7, № 1, 135 (1964).
7. W. C. Brown, G. E. Dombrowski, IRE Trans. on Electron. Devices, ED-9, № 2, 221 (1962).
8. Л. А. Вайнштейн, Открытые резонаторы и открытые волноводы, изд. Сов. радио, М., 1966.
9. И. И. Антаков, В. М. Боков, Р. П. Васильев, А. В. Гапонов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 3, № 6, 1033 (1960).
10. В. А. Жураховский, Радиотехника и электроника, 14, № 1, 128 (1969).

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
5 сентября 1973 г.

TO THE THEORY OF MCR-AMPLIFIER WITH A TRAVELLING WAVE AND
TRANSVERSE ELECTRON STREAM [1]

Yu. V. Bykov, A. V. Gaponov, M. I. Petelin

The properties of the amplifier based on the cyclotron resonance interaction between electromagnetic wave and transverse (with respect to its propagation direction) stream of electrons moving along screw trajectories are investigated. The gyrotropy of the electron stream may yield the irreciprocity of amplification provided the parameters of the electrodynamic system are chosen properly; for example, surface waves (in particular, whispering gallery modes) possess the favorable polarization. The efficiency of the MCR-amplifier may reach the same values as in the MCR-monotron (gyrotatron).
