

УДК

Секционные gyro-ЛОВ и gyro-ЛБВ с зигзагообразными квазиоптическими системами: 2D теория и результаты

Е.М. Новак^{1,2}, А.В. Савилов^{1,2}, С.В. Самсонов¹

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Аннотация: Мы представляем результаты исследования простой двумерной теории двух вариантов циклотронных резонансных мазеров, основанных на использовании микроволновых систем в виде зигзагообразной квазиоптической линии передачи. Пространственно-временная теория зигзагообразной лампы обратной волны описывает ряд эффектов, характерных для этого устройства, включая дискретный кусочный характер зависимости частоты генерации от магнитного поля, переключение со стационарных одночастотных режимов генерации на режимы автомодуляции, а также явление гистерезиса с плавно изменяющимся во времени магнитным полем. Кроме того разработана теория gyroусилителя зигзагообразного типа для случая, когда длина системы ограничена условием самовозбуждения паразитных волн. В этой ситуации усилитель с высоким коэффициентом усиления может быть реализован в системе изолированных, свободных от самовозбуждения “кластеров”, состоящих из нескольких зеркальных секций.

Ключевые слова: гиротроны, приборы субмиллиметрового диапазона волн, лампа обратной волны

1. Введение

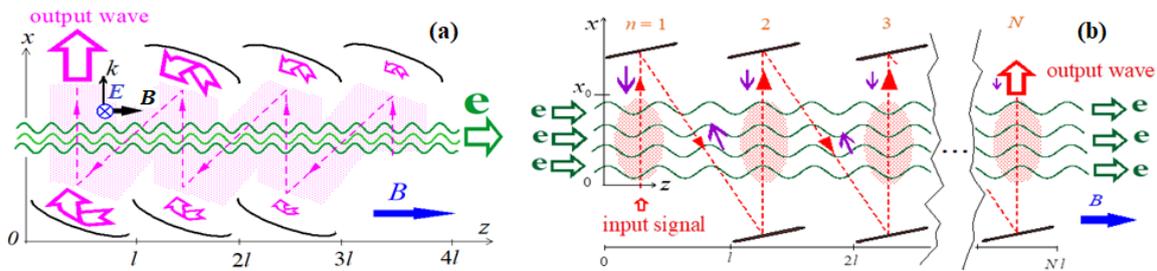


Рисунок 1. (а) Модель четырехсекционной gyro-ЛОВ. (б) Модель N – секционного gyroусилителя зигзагообразного типа ЛБВ. Также показана паразитная волна типа ЛОВ.

В настоящее время рядом научных групп ведется интенсивная работа, направленная на разработку субтерагерцовых электронных циклотронных мазеров для спектроскопических применений, требующих источников с широкополосной непрерывной перестройкой частоты. В частности, недавно была предложена микроволновая система в виде квазиоптической линии передачи в качестве схемы [1] мазера на циклотронном резонансе, включающая гиротронный генератор обратной волны (gyro-ЛОВ) (Рис. 1 а) и gyroусилитель (gyro-ЛБВ) (Рис. 1 б). Схема состоит из нескольких секций, образованных фокусирующими зеркалами, которые периодически разнесены по ходу движения электронов и обеспечивают прохождение пучка гауссовой волны по зигзагообразной траектории. Электронно-волновое взаимодействие происходит в областях, где волна, как в гиротроне, распространяется

строго поперек электронного пучка. Моделирование в формате 3D PIC демонстрирует привлекательность этого “зигзагообразного” мазера с уникальной возможностью настройки частоты [1,2].

2. Лампа обратной волны с зигзагообразной электродинамической системой

В работе [3] была разработана двумерная пространственно-временная теория giro-ЛОВ с зигзагообразной квазиоптической линией передачи (Рис. 1 а). Мы исследуем широкий (по поперечному размеру x) пучок электронов, движущихся поступательно по осевой координате z в статическом однородном магнитном поле. В дополнение к поступательному движению по координате z электроны совершают также циклотронное вращение в плоскости $x-y$.

Теория [3] и моделирование предсказывают кусочную зависимость, состоящую из набора сегментов, нормированной частоты $\Delta \sim \omega - \omega_0$ и нормированного КПД η_w от нормированной расстройки δ (определяемого магнитным полем, как $\delta \sim \omega_0 - \Omega$). На Рисунке 2 показаны эти сегменты на фоне линии $\Delta = -\delta$ (которая соответствует равенству $\omega = \Omega$). В случае более длительного времени задержки $T = 3L$ ветви нормированного КПД $\eta_w(\delta)$ и нормированной частоты $\Delta(\delta)$ становятся более частыми примерно во столько раз, во сколько раз время задержки T превышает нормированную длину L ($L = 0.7$). Подробное физическое объяснение такого поведения этой системы приведено в [3,4].

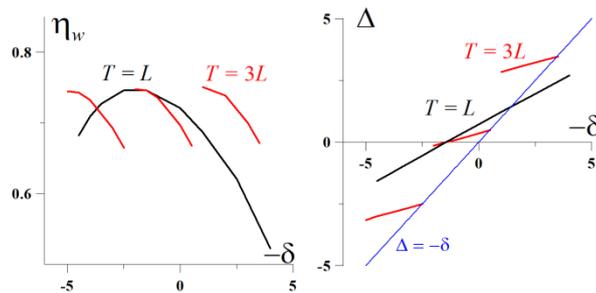


Рисунок 2. Зависимости нормированной выходной мощности волны η_w и нормированной частоты Δ генерируемой волны в стационарном режиме от нормированной расстройки $(-\delta) \propto \Omega - \omega$. Сравнение случаев $T = L$ и $T = 3L$ ($L = 0.7$).

На Рисунке 3а показана динамика возбуждения giro-ЛОВ в случаях различной нормированной разницы между электронной циклотронной частотой и опорной частотой волны $(-\delta) \approx \Omega - \omega_0$. Мы рассматриваем возбуждение различных волн, соответствующих трем значениям расстроек δ , выбранным из одной ветви нормированной частоты $\Delta(\delta)$. Более сложный и длительный процесс установления колебаний характерен для расстроек δ на обоих краях сегмента $\Delta(\delta)$. Причиной этого является конкуренция двух волн с краев соседних сегментов.

Стабильные стационарные режимы с относительно высокими нормированными выходными мощностями реализуются в случае, когда нормированная длина секции составляет $L = 0.7$ ($L_{st} = 0.5$). При более длинных нормированных длинах ($L = 1$) мы видим режимы автомодуляций (Рис. 3 б). Когда нормированная длина секции примерно в два раза превышает стартовый порог системы, появляются периодические автомодуляции, которые затем сменяются хаотическими автомодуляциями [5], а затем реализуются режимы сверхизлучения [6]. То есть мы видим отражение базового поведения классической системы ЛОВ в наших расчетах с использованием зигзагообразной системы [5].

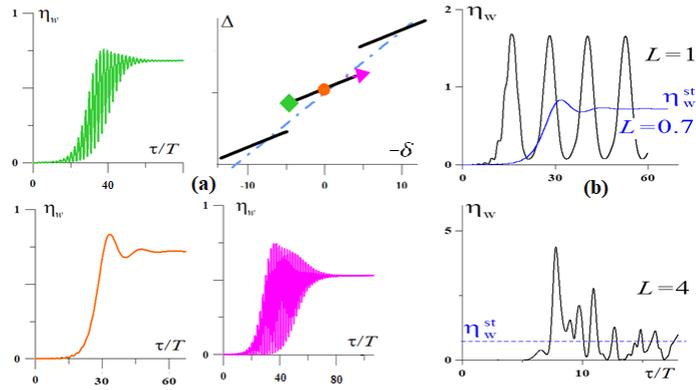


Рисунок 3. (а) Динамика возбуждения gyro-ЛОВ в случаях различных нормированных расстройек δ ($L = 0.7$). (б) Нормированная выходная мощность η_w в зависимости от нормированного времени τ , деленного на нормированное время задержки $T = L$ ($\delta = 0$). Периодические автомодуляции при $L = 1$ (на фоне стационарной генерации при $L = 0.7$), а также режим хаотических автомодуляций и формирование импульса сверхизлучающей волны при $L = 4$.

Как показали расчеты, выполненные в рамках трехмерного РС-моделирования [1,2], при плавном изменении во времени рабочего магнитного поля в течение одного длительного импульса генерации (или в режиме непрерывной генерации) наблюдается эффект гистерезиса. Более конкретно, зависимость частоты возбуждаемой волны от текущего значения рабочего магнитного поля оказывается несколько иной в случае увеличения и уменьшения магнитного поля. В рамках нашего формализма такой процесс соответствует изменению нормированной частоты возбуждаемой волны Δ при плавным и медленным (по шкале характерных переходных периодов в данной системе) изменением времени расстройки синхронизма δ . На Рисунке 4 показаны сценарии изменения нормированной частоты $\Delta(\delta)$ и нормализованной мощности волны $\eta_w(\delta)$ в случаях различной нормированной длины секций L с плавным линейным увеличением и уменьшением расстройки δ во времени. Бледно-зеленый цвет показан на Рис. 2 зависимость $\Delta(\delta)$ в том случае, когда рассогласование δ не изменяется во времени.

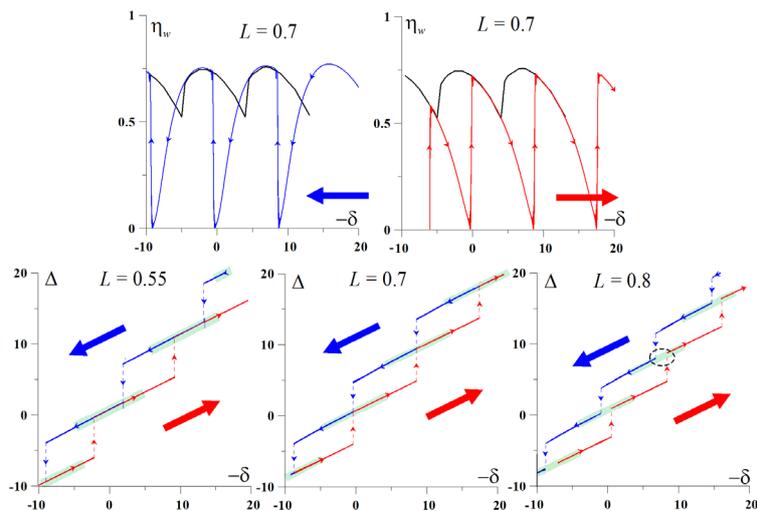


Рисунок 4. Динамика изменения нормированной частоты Δ с плавным изменением расстройки δ во времени в случаях различной длины нормированной секции L . Динамика изменения нормализованной выходной мощности излучения η_w также показана для случая $L = 0.7$. Синие линии соответствуют уменьшению δ с течением времени, красные - увеличению δ с течением времени.

3. Гиросилитель с зигзагообразной электродинамической системой

В этом разделе мы обсудим упрощенную теорию гиросилителя типа ЛБВ, основанного на том же подходе [7], с той же схемой зигзагообразной линии передачи, в которой при использовании квазиоптических зеркал волновой путь имеет зигзагообразную форму (Рис. 2). В системе, показанной на Рис. 2, существует проблема самовозбуждения паразитной волны типа ЛОВ (Рис. 1), которая имеет ту же зигзагообразную траекторию, но распространяется в противоположном направлении. Это накладывает свои ограничения на нормированную длину секции электронно-волнового взаимодействия и, соответственно, на коэффициент усиления волны. Теория зигзагообразной giro-ЛОВ [3,4] предсказывает следующую оценку зависимости нормированной стартовой длины “зигзагообразной” giro-ЛОВ от количества секций (Рис. 5 а): $N^{3/2} \times L_{st} \approx 3.8$.

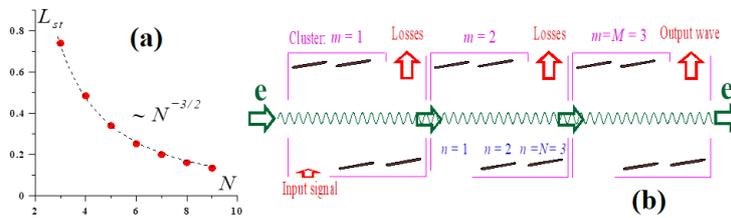


Рисунок 5. (а) Нормированная стартовая длина секции зигзагообразной giro-ЛОВ в зависимости от количества секций. (б) Схема кластерной системы, состоящей из $M = 3$ кластеров с $N = 3$ секциями внутри каждого кластера.

В результате, было бы очевидным шагом ограничить нормированную длину секции в нашей схеме гиросилителя начальной длиной возбуждения $L_{st}(N)$ паразитной волны типа giro-ЛОВ. В этой ситуации моделирование, выполненное для различного числа секций, лежащих в диапазоне $N \approx [3, 10]$, предсказывает почти одинаковое максимальное усиление амплитуды независимо от числа N , $G = \frac{a_N(\xi=1)}{a_0} \approx 2.1$.

В результате секционный гиросилитель типа ЛБВ, схема которого показана на Рис. 2, обеспечивает низкое усиление, что связано с опасностью возбуждения паразитной волны типа ЛОВ. Мы предлагаем стандартное решение этой проблемы, а именно использовать вместо секционной системы (Рис. 2) набор идентичных разделенных кластеров (Рис.6 б), каждый из которых представляет собой секционную систему, длина которой меньше начального порога паразитной волны типа ЛОВ. Каждый кластер образован N секциями. Соединение между кластерами осуществляется только общим рабочим электронным пучком, так как выходное волновое излучение, выходящее из последней секции $n = N$ каждого кластера $m < M$, за исключением последней $m = M$, рассматривается как потери.

На Рисунке 6 а, показаны зависимости амплитудного усиления $G(M)$ (максимального для рабочих магнитных полей) от количества кластеров M при различном количестве N секций внутри каждого кластера ($N = 3, 5$ и 7). Результаты практически не зависят от N .

Важно, что коэффициент усиления $G(M)$ зависит от фазового сдвига $\Psi = (\omega - \omega_0)t_w$ прохождения волны от секции к следующему секции (здесь $t_w = \frac{l_w}{c}$. l_w – длина прохождения волны между секциями, а $\omega_0 t_w = 2ni$ принимается за опорную частоту, где i – целое число). В моделировании, представленном на Рис. 6 а, частота волны соответствует нулевому фазовому сдвигу между секциями, $\Psi = 0$, это соответствует максимальному усилению.

Рисунок 6 б, иллюстрирует зависимость “инкремента” амплитудного усиления $\alpha(\Psi) = \frac{\ln G(\Psi)}{M}$ от фазового сдвига Ψ . Во-первых, “инкремент” α не меняется с увеличением числа кластеров M . Во-вторых, зависимость “инкремента” $\alpha(\Psi)$ или, другими словами, усиления от фазового сдвига (или частоты по-другому) является периодической зависимостью, а именно, мы видим максимумы $\alpha = \alpha_0 \approx 1,2$ при $\Psi = 0 + 2n\pi$ и минимумах $\alpha = \alpha_\pi \approx 0,8$ при $\Psi = \pi + 2n\pi$. Это приводит к следующему соотношению между коэффициентами усиления волн на “хороших” ($\Psi = (\omega - \omega_0)l_w/c = 2\pi$) и “плохих” ($\Psi = (\omega - \omega_0)l_w/c = \pi + 2\pi$) частотах:

$$G_\pi/G_0 \approx \exp -(\alpha_0 - \alpha_\pi)M \approx \exp(-0,4M). \quad (1)$$

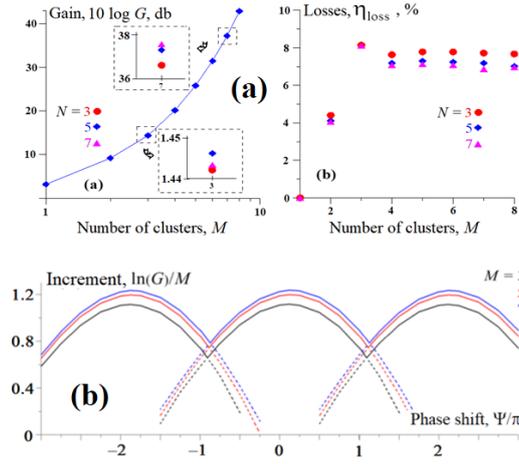


Рисунок 6. (а) Амплитудный коэффициент усиления G и потери в зависимости от количества кластеров M в случае $\Psi = 0$ и $N = 3, 5$ и 7 секций внутри каждого кластера. (б) “Инкремент” усиления в зависимости от фазового сдвига Ψ в случае, когда система имеет $M = 3$ (черная линия), 5 (красная линия) и 7 (синяя линия) кластеров (каждый кластер состоит из $N = 5$ секций).

Данная работа выполнена при поддержке Государственного задания Института прикладной физики РАН (проект № FFUF-2022-0007).

Список литературы

1. Samsonov S.V. et al. Cyclotron Resonance Maser with Zigzag Quasi-Optical Transmission Line: Concept and Modeling// IEEE Trans. Electron Devices.–2021.–Т. 68.–№.11.–С. 5846-5850.
2. Samsonov S.V et al. Gyro-TWT and Gyro-BWO with a Microwave Circuit in the Form of Zigzag Quasi-optical Transmission Line//Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2021).–2021.–С. 2790-2799.
3. Novak E.M. et al. Spatio-temporal theory of the sectioned gyro-BWO with the zigzag quasi-optical system// Phys. Plasmas.–2023.– Т. 30.–С. 043101.
4. Novak E.M. et al. Small-Signal Theory of the Gyro-BWO With the Zigzag Quasi-Optical System// IEEE Trans. Electron Devices.–2022.–Т. 69.–С. 5199.
5. Antonsen T. M., Jr. and Levush B. Mode competition and suppression in free electron laser oscillators// Phys. Fluids B.–1989.– Т. 1.–С. 1097.
6. Ginzburg N. S., Sergeev A. S. Dynamics of free electron lasers with resonators of arbitrary Q// Sov. Phys. Tech. Phys.–1991.– Т. 36.–С. 665.
7. Bratman V. L., Savilov A. V. Competition of longitudinal modes and the scenario of single-mode regime build-up for the FOM-Fusion-FEM project// Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.–1995.–Т. 358.–С. 182.