

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Некоторые вопросы линейной теории лампы обратной волны
с двумя электронными потоками**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 421 группы
направления 03.03.03 «Радиофизика»
факультета нелинейных процессов
Партыко Софьи Вадимовны

Научный руководитель
ассистент кафедры электроники,
колебаний и волн

подпись, дата

А.В. Титов

Заведующий кафедрой электроники,
колебаний и волн, член-корр. РАН,
д.ф.-м.н., профессор

подпись, дата

Д.И. Трубецков

Саратов, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы обусловлена тем, что в последние годы значительно возрос интерес ученых из разных стран к двухлучевым модификациям уже созданных приборов, то есть к приборам, в которых вместо одного используются два разноскоростных взаимодействующих друг с другом электронных потока. Явление двухпотоковой неустойчивости представляет собой классический пример неустойчивости в распределенных консервативных системах. К тому же эта неустойчивость является хрестоматийным примером конвективной и абсолютной неустойчивостей. Двухпучковая неустойчивость известна достаточно давно. Впервые этот термин был введен при исследовании взаимодействия двух электронных пучков, а позже приобрел широкое распространение в различных областях науки.

В частности, совсем, научными группами из Китая, Японии и Южной Кореи были опубликованы работы, посвященные исследованию двухпотоковых ЛОВ [1,2]. В них авторы утверждают, что использование в подобных системах такого классического явления СВЧ-электроники как двухпотоковая неустойчивость, позволит повысить выходную мощность и увеличить ширину электронной перестройки частоты генерации. Также в некоторых работах анализируются различные типы замедляющих структур ЛОВ, предназначенных для взаимодействия с двумя электронными пучками[3].

Одним из наиболее перспективных приборов для продвижения в терагерцовый диапазон частот является лампа обратной волны. На сегодняшний день существуют образцы, способные генерировать излучение на частотах до 1.4ТГц

1 ОБЗОР АКТУАЛЬНЫХ РАБОТ, ПОСВЯЩЕННЫХ ЛАМПАМ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ С ДВУМЯ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПОТОКАМИ

Наиболее интересной и достаточно полной стала статья, являющаяся совместной работой исследователей из Китая, Японии и Южной Кореи, посвященная исследованию системы, представляющей собой петляющий волновод, пронизываемый двумя электронными пучками. Согласно авторам [3], на сегодняшний день лампа обратной волны является наиболее широко распространенным прибором среди компактных, низковольтных и широкополосных генераторов терагерцового диапазона частот. Одной из часто используемых систем является структура типа петляющий волновод.

Целью авторов являлось улучшение выходных характеристик миниатюрных ЛОВ субмиллиметрового диапазона, в которых в качестве замедляющей системы применяется петляющий волновод. Для повышения эффективности взаимодействия электронов с полями было предложено использовать механизм двухпоточковой неустойчивости. В этом случае волновод пронизывался не одним электронным пучком, а двумя. Принципиальная схема приведена на рис. 1.

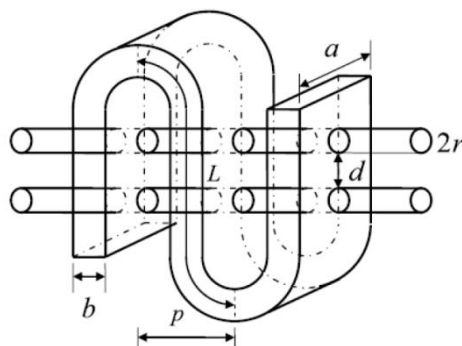


Рис. 1. Схема изогнутого волновода [3].

Ещё одна интересная работа членов данной научной группы [4], посвященную моделированию системы, схема которой приведена на рис. 5.

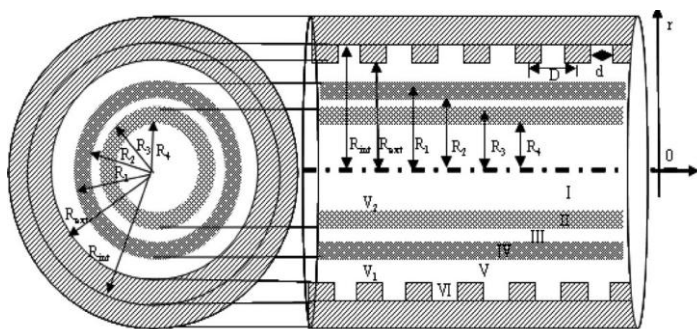


Рис. 5. Две проекции исследуемой системы [4].

Предложенная система состоит из цилиндра с нанесенной на внутреннюю поверхность замедляющей системой типа гребенка. Внутри цилиндра с различными скоростями распространяются два цилиндрических электронных пучка конечной толщины. В обычном случае данная структура обладает аномальной дисперсией, что позволяет использовать ее в качестве замедляющей системы для ЛОВ.

Анализ характеристик позволил авторам говорить о значительном преимуществе, возникающем при использовании двух пучков.

Приведенные выше работы указывают на перспективность двухлучевых приборов подобного типа, использующих явление двухпотоковой неустойчивости.

Коротко остановимся на явлении двухпотоковой неустойчивости.

2 ДВУХПОТОКОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

Рассмотрим два ионно-скомпенсированных потока без столкновений и диффузии, которые будут описываться линеаризованными гидродинамическими уравнениями, уравнениями для плотности конвекционного тока и уравнением Пуассона. На входе потоки возмущены:

$$\vartheta_i = \vartheta_{0i} + \tilde{\vartheta}_i$$

$$\rho_i = \rho_{0i} + \tilde{\rho}_i, \text{ где } i = 1, 2$$

$$E = \tilde{E}.$$

Можем написать систему уравнений в этих приближениях:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \tilde{j}_{1,2}}{\partial t^2} + 2g_{01,02} \frac{\partial^2 \tilde{j}_{1,2}}{\partial x \partial t} + g_{01,02}^2 \frac{\partial^2 \tilde{j}_{1,2}}{\partial x^2} = \eta \rho_0 \frac{\partial \tilde{E}}{\partial t} \\ \tilde{j}_{1,2} = g_{01,02} \tilde{\rho}_{1,2} + \rho_{01,02} g_{1,2} \\ \frac{\partial \tilde{E}}{\partial x} = 4\pi (\tilde{\rho}_1 + \tilde{\rho}_2) \end{cases} \quad (2.1)$$

Произведя некоторые математические вычисления, можем получить дисперсионное уравнение:

$$\frac{\omega_{p1}^2}{(\omega - k\mathcal{G}_{01})^2} + \frac{\omega_{p2}^2}{(\omega - k\mathcal{G}_{02})^2} = 1 \quad (2.2)$$

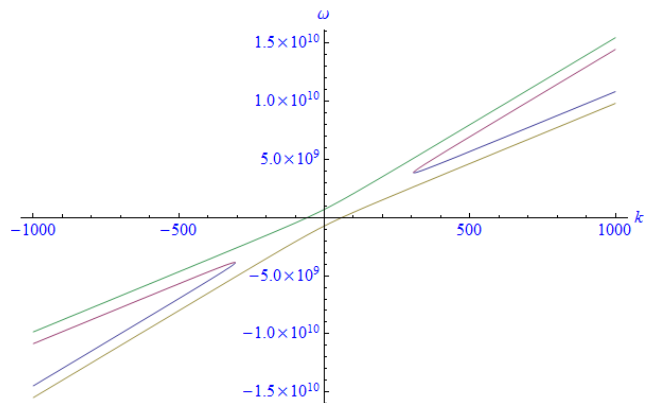


Рис. 6. Дисперсионная характеристика двух взаимодействующих потоков, движущихся в одном направлении.

3 ЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ ДВУХЛУЧЕВОЙ ЛОВ

Для иллюстрации метода рассмотрим линейную теорию ЛОВ обычной конструкции.

Дифференциальное уравнение для тока имеет вид

$$\frac{d^2 i(x)}{dx^2} + 2j\beta_e \frac{di(x)}{dx} - (\beta_e^2 - \beta_p^2) i(x) = j \frac{\beta_e I_0}{2U_0} E(x), \quad (3.1)$$

здесь $i(x)$ – переменная составляющая тока пучка, $\beta_e = \frac{\omega}{v_0}$, $\beta_p = \frac{\omega_p}{v_0}$, ω – частота сигнала, ω_p – плазменная частота пучка, v_0 – скорость пучка, I_0 – полный ток пучка, U_0 – ускоряющее напряжение, $E(x)$ – поле волны.

По теореме о свертке функция тока может быть представлена как:

$$i(x) = j \frac{\beta_e I_0 E_0}{2U_0} e^{-j\beta_0(x-L)} \left[\frac{e^{(\gamma_1 + j\beta_0)x} - 1}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 + j\beta_0)} + \frac{e^{(\gamma_2 + j\beta_0)x} - 1}{(\gamma_2 - \gamma_1)(\gamma_2 + j\beta_0)} \right] \quad (3.2)$$

Найдем распределение поля

$$E(x) = E_0 e^{-j\beta_0(x-L)} \left\{ 1 - j \frac{\beta_e \beta_0^2 I_0 K_0}{4U_0} \left[\frac{e^{(\gamma_1 + j\beta_0)L} (1 - e^{(\gamma_1 + j\beta_0)(x-L)})}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 + j\beta_0)^2} + \frac{e^{(\gamma_2 + j\beta_0)L} (1 - e^{(\gamma_2 + j\beta_0)(x-L)})}{(\gamma_2 - \gamma_1)(\gamma_2 + j\beta_0)^2} - \left(\frac{L-x}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 + j\beta_0)} \right) - \left(\frac{L-x}{(\gamma_2 - \gamma_1)(\gamma_2 + j\beta_0)} \right) \right] \right\}$$

По аналогии с линейной теорией однолучевой ЛОВ, проведем все те же вычисления для двухлучевой ЛОВ.

Найдем распределение поля

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{E}_0 e^{-j\beta_0(x-L)} - \frac{j\beta_0^2 \mathbf{K}_0 \mathbf{E}_0}{4} e^{j\beta_0(L-x)} \left[\frac{\frac{k_{e1} I_{01}}{U_{01}} (\gamma_1 + jk_{e2})^2 + \frac{k_{e2} I_{02}}{U_{02}} (\gamma_1 + jk_{e1})^2}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_1 - \gamma_4)} \right]^* \\
 & * \left(\frac{e^{(\gamma_1 + j\beta_0)L} (1 - e^{(\gamma_1 + j\beta_0)(x-L)})}{(\gamma_1 + j\beta_0)^2} - \left(\frac{L-x}{(\gamma_1 + j\beta_0)} \right) \right) + \left[\frac{\frac{k_{e1} I_{01}}{U_{01}} (\gamma_2 + jk_{e2})^2 + \frac{k_{e2} I_{02}}{U_{02}} (\gamma_2 + jk_{e1})^2}{(\gamma_2 - \gamma_1)(\gamma_2 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_4)} \right]^* \\
 & * \left(\frac{e^{(\gamma_2 + j\beta_0)L} (1 - e^{(\gamma_2 + j\beta_0)(x-L)})}{(\gamma_2 + j\beta_0)^2} - \left(\frac{L-x}{(\gamma_2 + j\beta_0)} \right) \right) + \left[\frac{\frac{k_{e1} I_{01}}{U_{01}} (\gamma_3 + jk_{e2})^2 + \frac{k_{e2} I_{02}}{U_{02}} (\gamma_3 + jk_{e1})^2}{(\gamma_3 - \gamma_1)(\gamma_3 - \gamma_2)(\gamma_3 - \gamma_4)} \right]^* \\
 & * \left(\frac{e^{(\gamma_3 + j\beta_0)L} (1 - e^{(\gamma_3 + j\beta_0)(x-L)})}{(\gamma_3 + j\beta_0)^2} - \left(\frac{L-x}{(\gamma_3 + j\beta_0)} \right) \right) + \left[\frac{\frac{k_{e1} I_{01}}{U_{01}} (\gamma_4 + jk_{e2})^2 + \frac{k_{e2} I_{02}}{U_{02}} (\gamma_4 + jk_{e1})^2}{(\gamma_4 - \gamma_1)(\gamma_4 - \gamma_2)(\gamma_4 - \gamma_3)} \right]^* \\
 & * \left(\frac{e^{(\gamma_4 + j\beta_0)L} (1 - e^{(\gamma_4 + j\beta_0)(x-L)})}{(\gamma_4 + j\beta_0)^2} - \left(\frac{L-x}{(\gamma_4 + j\beta_0)} \right) \right)
 \end{aligned}$$

Перейдем к безразмерным параметрам, получим:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{E}_0 e^{-j\beta_0(x-L)} \left[1 + \left[\frac{(2\pi N_1 C_{01})^3 (\Gamma_1 + j\phi_{e2})^2 + (2\pi N_2 C_{02})^3 (\Gamma_1 + j\phi_{e1})^2}{(\Gamma_1 - \Gamma_2)(\Gamma_1 - \Gamma_3)(\Gamma_1 - \Gamma_4)} \right]^* \right. \\
 & * \left(-j \frac{e^{\Gamma_1 + j\Phi_0} (1 - e^{(\gamma_1 + j\beta_0)(x-L)})}{(\Gamma_1 + j\Phi_0)^2} + \frac{j}{(\Gamma_1 + j\Phi_0)} - \frac{j\beta_0 x}{\Phi_0 (\Gamma_1 + j\Phi_0)} \right) - \\
 & \left. + \left[\frac{(2\pi N_1 C_{01})^3 (\Gamma_2 + j\phi_{e2})^2 + (2\pi N_2 C_{02})^3 (\Gamma_2 + j\phi_{e1})^2}{(\Gamma_2 - \Gamma_1)(\Gamma_2 - \Gamma_3)(\Gamma_2 - \Gamma_4)} \right]^* \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& * \left(-j \frac{e^{\Gamma_2 + j\Phi_0} (1 - e^{(\gamma_2 + j\beta_0)(x-L)})}{(\Gamma_2 + j\Phi_0)^2} + \frac{j}{(\Gamma_2 + j\Phi_0)} - \frac{j\beta_0 x}{\Phi_0(\Gamma_2 + j\Phi_0)} \right) - \\
& \quad + \left[\frac{(2\pi N_1 C_{01})^3 (\Gamma_3 + j\phi_{e2})^2 + (2\pi N_2 C_{02})^3 (\Gamma_3 + j\phi_{e1})^2}{(\Gamma_3 - \Gamma_1)(\Gamma_3 - \Gamma_2)(\Gamma_3 - \Gamma_4)} \right] * \\
& * \left(-j \frac{e^{\Gamma_3 + j\Phi_0} (1 - e^{(\gamma_3 + j\beta_0)(x-L)})}{(\Gamma_3 + j\Phi_0)^2} + \frac{j}{(\Gamma_3 + j\Phi_0)} - \frac{j\beta_0 x}{\Phi_0(\Gamma_3 + j\Phi_0)} \right) - \\
& \quad + \left[\frac{(2\pi N_1 C_{01})^3 (\Gamma_4 + j\phi_{e2})^2 + (2\pi N_2 C_{02})^3 (\Gamma_4 + j\phi_{e1})^2}{(\Gamma_4 - \Gamma_1)(\Gamma_4 - \Gamma_2)(\Gamma_4 - \Gamma_3)} \right] * \\
& * \left(-j \frac{e^{\Gamma_4 + j\Phi_0} (1 - e^{(\gamma_4 + j\beta_0)(x-L)})}{(\Gamma_4 + j\Phi_0)^2} + \frac{j}{(\Gamma_4 + j\Phi_0)} - \frac{j\beta_0 x}{\Phi_0(\Gamma_4 + j\Phi_0)} \right)
\end{aligned}$$

Для сравнения с однолучевой теорией требуется перейти к безразмерным параметрам (относительным углам пролета). Однако, в случае двухлучевой системы выделить их в явном виде затруднительно. Поэтому придётся использовать абсолютные углы пролета для каждого пучка.

Анализ показал, что расчёт пусковых характеристик является достаточно трудоёмкой задачей, поэтому сейчас мы рассматриваем зависимость коэффициента усиления от частоты ЛОВ в режиме усиления.

Коэффициент усиления на обратной волне вычисляется по формуле:

$$G = 20 \ln \frac{E(0)}{E(L)}$$

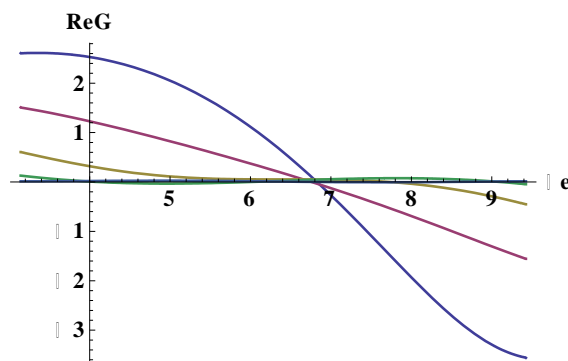


Рис.3. Зависимость коэффициента усиления от угла пролёта в однолучевой ЛОВ, $\phi[\pi, 3\pi]$

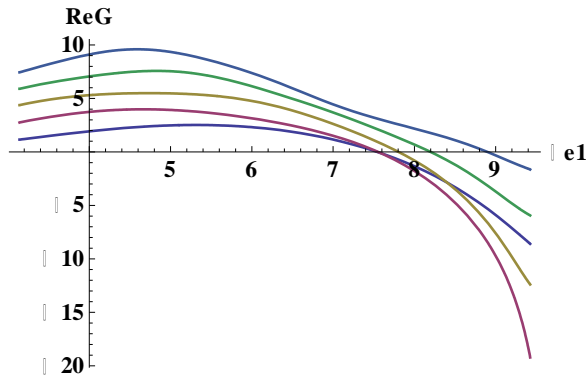


Рис.4. Зависимость коэффициента усиления от угла пролёта в двухлучевой ЛОВ, $\phi[\pi, 3\pi]$

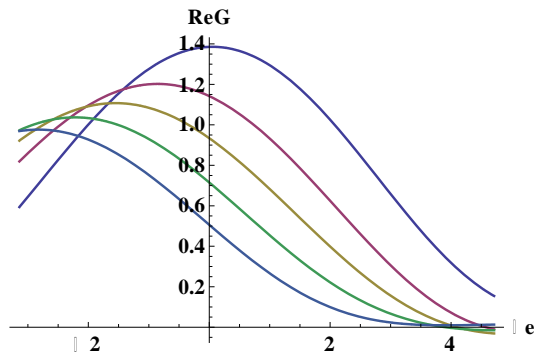


Рис.5. Зависимость коэффициента усиления от угла пролёта в однолучевой ЛОВ, $\phi[2\pi, 3\pi]$

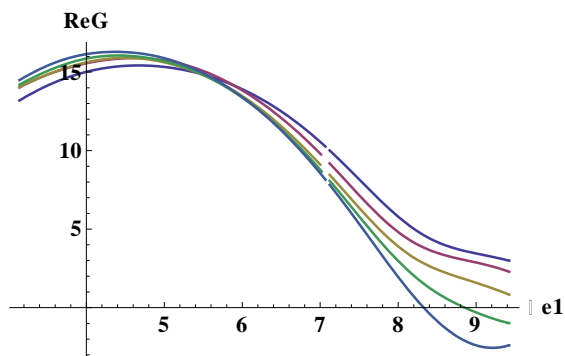


Рис.6. Зависимость коэффициента усиления от угла пролёта в двухлучевой ЛОВ, $\phi[2\pi, 3\pi]$

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе был произведен краткий обзор актуальных работ, посвященных лампам обратной волны с двумя электронными потоками. А также построена последовательная линейная теория двухпотоковой ЛОВ методом последовательных приближений. Для иллюстрации сначала рассматривалась линейная теория ЛОВ обычной конструкции. Было проведено сравнение полученных результатов, из которых видны преимущества двухлучевой ЛОВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Umeda T. Study on Nonlinear Processes of Electron Beam Instabilities via Computer Simulations, 2004.
2. Umeda T., Omura Y., Miyake T., Matsumoto H. Nonlinear evolution of electron twostream instability: Two-dimensional particle simulation. Proceedings of ISSS-7, 26-31 March, 2005.
3. Li K., Liu W., Wang Y., Cao M. Dispersion Characteristics of Two-Beam Folded Waveguide for Terahertz Radiation. IEEE Transactions on electron Devices, vol. 60, 12, Dec. 2013
4. Liu W., Liu P., Yong W., Yang Z. Enhancements of Cherenkov Radiation by Two Electron Beams. IEEE Trans. on Plasma Science, vol. 40, 3, 2012.