

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ  
ВОЛНЫ С ДВУМЯ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПОТОКАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 225 группы  
направления 03.04.03 «Радиофизика»  
факультета нелинейных процессов  
Аркатова Павла Николаевича

Научный руководитель  
Ассистент кафедры  
электроники,  
колебаний и волн

\_\_\_\_\_

дата, подпись

А.В. Титов

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

\_\_\_\_\_

дата, подпись

Д.И. Трубецков

Саратов 2019 год

## ВВЕДЕНИЕ

Целью данной магистерской работы является исследование лампы бегущей волны с двумя электронными потоками, построение теории, расчёт выходных характеристик, анализ лампы на основе построенной теории. В мою задачу входило:

- Ознакомление с современными работами, связанными с двухлучевыми лампами бегущей волны (ЛБВ) и двухлучевыми лампами обратной волны (ЛОВ);
- Подробный анализ дисперсионного уравнения для двухлучевой ЛБВ;
- Вывод уравнений для двухлучевой ЛБВ на основе самосогласованной задачи и анализ характеристик на их основе;
- Ознакомление с нелинейной теорией двухлучевой ЛБВ;
- Расчёт выходных характеристик на основе построенной линейной и приближённой нелинейной теорий с последующим сравнением с однолучевым вариантом.

Работа состоит из нескольких глав:

- Современное состояние проблемы;
- Элементы линейной теории: анализ дисперсионного уравнения, анализ на основе самосогласованной задачи;
- Вывод дисперсионного уравнения;
- Построение линейной теории на основе самосогласованной задачи;
- Элементы нелинейной теории;
- Сравнение результатов, полученных на основе линейной и приближённой нелинейной теорий;
- Выводы по работе.

Источники терагерцового излучения являются ключом к созданию систем связи и сканирования нового поколения. В связи с этим вопрос создания мощных приборов, работающих в данном диапазоне частот, является актуальным на сегодняшний день.

Одним из таких приборов может послужить лампа бегущей волны, зарекомендовавшая себя, как мощная лампа-усилитель СВЧ излучения. Для создания ЛБВ, работающей в терагерцовом диапазоне частот, предполагаются следующие решения:

- добавление второго электронного пучка
- создание новой структуры замедляющей системы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В последнее время многие исследователи стали проявлять интерес к такому классическому явлению в СВЧ электронике как двухпотоковая неустойчивость, а также к двухлучевым модификациям различных приборов данного диапазона. Данный вывод обусловлен рядом работ, опубликованных в последнее время исследователями со всего мира.

### Линейная теория лампы бегущей волны с двумя электронными потоками.

Для получения дисперсионного уравнения для лампы бегущей волны с двумя электронными потоками воспользуемся системой из двух уравнений для токов в дифференциальной форме с учётом пространственного заряда и уравнения возбуждения волноведущей системы заданными токами в дифференциальной форме:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \tilde{i}_1}{dx^2} + 2j\beta_{e1} \frac{d\tilde{i}_1}{dx} - (\beta_{e1}^2 - \beta_{p1}^2) \tilde{i}_1 + \beta_{p1}^2 \tilde{i}_2 = j \frac{\beta_{e1} I_{01}}{2U_{01}} E \\ \frac{d^2 \tilde{i}_2}{dx^2} + 2j\beta_{e2} \frac{d\tilde{i}_2}{dx} - (\beta_{e2}^2 - \beta_{p2}^2) \tilde{i}_2 + \beta_{p2}^2 \tilde{i}_1 = j \frac{\beta_{e2} I_{02}}{2U_{02}} E \\ \frac{dE}{dx} + j\beta_0 E = -\frac{\beta_0^2 K_0}{2} (\tilde{i}_1 + \tilde{i}_2) \end{cases} \quad (1.1)$$

Проведя некоторые математические операции, получаем дисперсионное уравнение для двухлучевой ЛБВ:

$$\begin{aligned} & \left[ \beta^2 - 2\beta\beta_{e1} + (\beta_{e1}^2 - \beta_{p1}^2) \right] \left\{ \left[ \beta^2 - 2\beta\beta_{e2} + (\beta_{e2}^2 - \beta_{p2}^2) \right] j(\beta_0 - \beta) - \frac{\beta_0^2 K_0}{2} j \frac{\beta_{e2} I_{02}}{2U_{02}} \right\} - \\ & - \beta_{p1}^2 \left\{ \beta_{p2}^2 j(\beta_0 - \beta) - \frac{\beta_0^2 K_0}{2} j \frac{\beta_{e2} I_{02}}{2U_{02}} \right\} + \\ & + j \frac{\beta_{e1} I_{01}}{2U_{01}} \left\{ \beta_{p2}^2 \frac{\beta_0^2 K_0}{2} - \frac{\beta_0^2 K_0}{2} \left[ \beta^2 - 2\beta\beta_{e2} + (\beta_{e2}^2 - \beta_{p2}^2) \right] \right\} = 0 \quad (1.2) \end{aligned}$$

Для решения самосогласованной задачи для двухлучевой ЛБВ воспользуемся системой (1.1). Проведя некоторые математические уравнения получаем выражение для суммарного тока:

$$\begin{aligned}
 i(x) = & \frac{j}{2} \left[ \beta_{e1} \frac{I_{01}}{U_{01}} + \beta_{e2} \frac{I_{02}}{U_{02}} \right] E_0 \left[ \gamma_1^2 A_1 + \gamma_2^2 A_2 + \gamma_3^2 A_3 + \gamma_4^2 A_4 + \gamma_5^2 A_5 \right] - \\
 & - \beta_{e1} \beta_{e2} \left[ \frac{I_{01}}{U_{01}} + \frac{I_{02}}{U_{02}} \right] E_0 \left[ \gamma_1 A_1 + \gamma_2 A_2 + \gamma_3 A_3 + \gamma_4 A_4 + \gamma_5 A_5 \right] - \\
 & - \frac{j}{2} \beta_{e1} \beta_{e2} \left[ \beta_{e2} \frac{I_{01}}{U_{01}} + \beta_{e1} \frac{I_{02}}{U_{02}} \right] E_0 \left[ A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 \right] \quad (1.3)
 \end{aligned}$$

и выражение для поля:

$$\begin{aligned}
 E(x) = & E_0 \left[ \gamma_1^4 A_1 + \gamma_2^4 A_2 + \gamma_3^4 A_3 + \gamma_4^4 A_4 + \gamma_5^4 A_5 \right] + \\
 & + 2j(\beta_{e1} + \beta_{e2}) E_0 \left[ \gamma_1^3 A_1 + \gamma_2^3 A_2 + \gamma_3^3 A_3 + \gamma_4^3 A_4 + \gamma_5^3 A_5 \right] - \\
 & - \left[ \beta_{e1}^2 - \beta_{p1}^2 + \beta_{e2}^2 - \beta_{p2}^2 + 4\beta_{e2} \beta_{e1} \right] E_0 \left[ \gamma_1^2 A_1 + \gamma_2^2 A_2 + \gamma_3^2 A_3 + \gamma_4^2 A_4 + \gamma_5^2 A_5 \right] - \\
 & - 2j \left[ (\beta_{e1}^2 - \beta_{p1}^2) \beta_{e2} + (\beta_{e2}^2 - \beta_{p2}^2) \beta_{e1} \right] E_0 \left[ \gamma_1 A_1 + \gamma_2 A_2 + \gamma_3 A_3 + \gamma_4 A_4 + \gamma_5 A_5 \right] + \\
 & + ((\beta_{e2}^2 - \beta_{p2}^2)(\beta_{e1}^2 - \beta_{p1}^2) - \beta_{p1}^2 \beta_{p2}^2) E_0 \left[ A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 \right], \quad (1.4)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{e^{\gamma_1 x}}{(\gamma_1 - \gamma_2)(\gamma_1 - \gamma_3)(\gamma_1 - \gamma_4)(\gamma_1 - \gamma_5)}; & A_2 &= \frac{e^{\gamma_2 x}}{(\gamma_2 - \gamma_1)(\gamma_2 - \gamma_3)(\gamma_2 - \gamma_4)(\gamma_2 - \gamma_5)}; \\
 A_3 &= \frac{e^{\gamma_3 x}}{(\gamma_3 - \gamma_1)(\gamma_3 - \gamma_2)(\gamma_3 - \gamma_4)(\gamma_3 - \gamma_5)}; & A_4 &= \frac{e^{\gamma_4 x}}{(\gamma_4 - \gamma_1)(\gamma_4 - \gamma_2)(\gamma_4 - \gamma_3)(\gamma_4 - \gamma_5)}; \\
 A_5 &= \frac{e^{\gamma_5 x}}{(\gamma_5 - \gamma_1)(\gamma_5 - \gamma_2)(\gamma_5 - \gamma_3)(\gamma_5 - \gamma_4)};
 \end{aligned}$$

Из результатов, полученных на основе дисперсионного уравнения следует, что при небольшой разности скоростей пучков область неустойчивости двухлучевой лампы бегущей волны соответствует области неустойчивости обыкновенной лампы бегущей волны. Т.е. разброс по скоростям настолько мал, что два электронных пучка можно принять за один. При небольшой разнице скоростей между электронными пучками и волной существует только область двухпотоковой неустойчивости. С повышением скорости волны начинает появляться область неустойчивости, соответствующая неустойчивости ЛБВ (медленный пучок), а затем появляется и вторая область неустойчивости ЛБВ (быстрый пучок). Таким образом, при соблюдении определённых условий, система может продемонстрировать сразу три режима неустойчивости.

Из результатов, полученных на основе самосогласованной задачи следует, что добавление второго электронного пучка не даёт выигрыша в выходных характеристиках.

### Приближённая нелинейная теория.

Уравнения нелинейной теории:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 B_1}{\partial \xi^2} = & - \left\{ F(\xi) J_0(|B_1|) - F^*(\xi) e^{2j\text{Arg}(B_1)} J_2(|B_1|) + \right. \\ & \left. + 2q_1 e^{j\text{Arg}(B_1)} J_1(|B_1|) [J_0(|B_1|) - J_2(|B_1|)] + 2q_2 \left( \frac{C_2^2}{C_1^2} \right) S e^{j\text{Arg}(B_2)} J_1(|B_2|) [J_0(|B_2|) - J_2(|B_2|)] \right\} \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 B_2}{\partial \xi^2} = & - \left\{ \frac{1}{S^3} F(\xi) e^{j\frac{S-1}{C_1 S} \xi} J_0(|B_2|) - \frac{1}{S^3} F^*(\xi) e^{-j\frac{S-1}{C_1 S} \xi} e^{2j\text{Arg}(B_2)} J_2(|B_2|) + \right. \\ & \left. + 2 \frac{q_1}{S^3} e^{j\text{Arg}(B_1)} J_1(|B_1|) [J_0(|B_1|) - J_2(|B_1|)] + 2 \frac{q_2}{S^2} \left( \frac{C_2^2}{C_1^2} \right) e^{j\text{Arg}(B_2)} J_1(|B_2|) [J_0(|B_2|) - J_2(|B_2|)] \right\} \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\frac{dF}{d\xi} + jb_1 F(\xi) = -(1 + b_1 C_1)^2 \left[ I'_{11}(\xi) + S^2 \left( \frac{C_2}{C_1} \right)^3 I'_{21}(\xi) e^{j \frac{S-1}{C_1 S} \xi} \right] \quad (1.7)$$

$$I'_{11} = 2J_1(|B_1|) e^{j \left( \text{Arg}(B_1) - \frac{\pi}{2} \right)} \quad (1.8)$$

$$I'_{21} = 2J_1(|B_2|) e^{j \left( \text{Arg}(B_2) - \frac{\pi}{2} \right)} \quad (1.9)$$

(1.5) и (1.6) уравнения для возбуждения фазы электронов первого и второго потока, (1.7) – уравнение возбуждения волноведущей системы и (1.8), (1.9) – уравнения для токов.

(1.5) - (1.9) – самосогласованная система уравнений приближенной нелинейной теории двухпоточковой лампы бегущей волны с учетом влияния пространственного заряда.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что добавление второго электронного пучка не даёт выигрыша в выходных характеристиках по сравнению с однолучевым вариантом. При работе такой лампы второй электронный поток начинает забирать энергию из первого электронного пучка и волны, что приводит к снижению выходных характеристик. Также будут негативно влиять затраты энергии на создание и поддержание второго электронного пучка, что приведёт к снижению выходных характеристик такой лампы.

## ВЫВОД

В ходе работы произведено теоретическое исследование лампы бегущей волны с двумя электронными потоками. Исследована дисперсионная характеристика лампы бегущей волны с двумя электронными потоками и произведено сравнение с дисперсионными характеристиками обыкновенной лампы бегущей волны и двухпотоковой неустойчивости. Прделано построение линейной теории двухлучевой ЛБВ на основе решения самосогласованной задачи и сравнение с однолучевым вариантом, а также произведены расчёты выходных характеристик на основе приближённой нелинейной теории.

Из полученных диаграмм Бриллюэна можно сделать вывод, что для двухлучевой ЛБВ существует три области неустойчивости. Одна соответствует усилению за счёт взаимодействия двух электронных потоков, а другие две – за счёт взаимодействия каждого электронного потока по отдельности с волной.

При изменении разности скоростей электронных потоков, можно пронаблюдать следующую картину. При незначительной величине разности скоростей два электронных потока можно принять за один, т.к. разность скоростей становится соизмерима с тепловым разбросом по скоростям, и в системе будет наблюдаться только неустойчивость ЛБВ. При небольшой разности скоростей между электронными потоками и волной в системе наблюдается двухпотоковая неустойчивость. С повышением разности скоростей, начинают выделяться области неустойчивости ЛБВ для медленного пучка, а затем, снова с повышением скорости волны, появляется вторая область неустойчивости ЛБВ – быстрый пучок.

Основываясь на результатах, полученных при решении самосогласованной задачи и приближённой нелинейной теории, можно сделать следующий вывод: добавление второго электронного потока негативно влияет на выходные характеристики. Второй электронный пучок начинает выкачивать энергию из первого электронного потока и из волны. Также необходимо учесть затраты на создание и поддержание второго электронного потока, что также будет снижать КПД.