

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 НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ ЭФФЕКТА
ПОДАВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТА**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 2231 группы
направления 03.04.03 «Радиофизика»
института физики
Коваль Анны Дмитриевны

Научный руководитель

доцент КЭКиВ, к.ф.-м.н.

 06.06.22 А. В. Титов

Зав. кафедрой электроники, колебаний и волн

доцент КЭКиВ, к.ф.-м.н.

 С. В. Гришин

Саратов 2022 г.

Введение

С момента изобретения СВЧ-усилительного прибора лампы бегущей волны (ЛБВ) прошло много лет, (см., например, [1-3]), и за эти годы она стала одним из самых распространенных СВЧ-приборов.

Актуальность. ЛБВ составляют значительную долю мирового рынка среди СВЧ приборов. На них приходится более 50% объема продаж всех СВЧ-ламп [4]. Лампы служат усилителем почти во всех спутниках связи. Наиболее широко ЛБВ используются в системах радиоэлектронной борьбы.

Лампы бегущей волны представляет собой усилитель СВЧ с выдающимися характеристиками: низкий уровень собственных шумов, высокий технический КПД, полоса усиливаемых частот достигает значения в несколько октав, коэффициент усиления – десятки децибел [5]. На настоящий момент четко сформировалась тенденция продвижения в терагерцовый диапазон частот. В Европе и США выдвигаются программы по вакуумной СВЧ электронике, направленные на применение новых технологий при освоении субмиллиметрового диапазона [6,7]. Непрерывно предпринимаются попытки разработать и создать компактные устройства с достаточным уровнем выходных характеристик [8,9]. Все сказанное подтверждает актуальность заявленной темы выпускной квалификационной работы.

Цель работы. Цель данной работы состоит в исследовании работы ЛБВ в режиме подавления на основе нелинейной полуаналитической модели эффекта Компфнера (на базе волнового метода Солнцева).

Задачи. На основе линейной теории решить одномерную самосогласованную задачу и провести анализ выходных характеристик ЛБВ, а также получить дисперсионное соотношение для свободного электронного потока в одномерной теории. Рассмотреть нелинейную теорию взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем. Получить распределение амплитуды поля, сгруппированного тока и коэффициента усиления. Подробное исследовать условия ослабления и полного подавления входного сигнала – эффект, известный как срыв Компфнера (Kompfner dip).

Для достижения поставленной цели и решаемых в связи с ней задач, работа разделена на следующие главы и подглавы:

- Срыв Компфнера в лампе бегущей волны
- Взаимодействие электронного потока с электромагнитной волной в ЛБВ
 - Исследуемая модель. Самосогласованная задача
 - Дисперсионное уравнение
- Нелинейная теория взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем
 - Анализ нелинейной теории группировки электронного потока в поле бегущей волны
 - Анализ режима усиления при взаимодействии электронного потока с полем бегущей волны на основе полуаналитической нелинейной теории (метод Солнцева)
 - Анализ режима подавления при взаимодействии электронного потока с полем бегущей волны на основе полуаналитической нелинейной теории (метод Солнцева)

Основное содержание работы

В первой главе кратко рассматривается принцип действия ЛБВ и физические процессы в спиральной ЛБВ с длительным взаимодействием электронного потока с бегущей электромагнитной волной. Спираль, в качестве замедляющей системы, объединяет свойства малой дисперсии с большим сопротивлением связи, что позволяет добиться большого усиления в широкой полосе частот. Для измерения сопротивления связи и дисперсии замедляющей системы является режим максимального затухания волны, обусловленный взаимодействием ее с пучком – режим полного подавления входного сигнала в ЛБВ. Помимо этого, кратко излагается история открытия явления полного подавления сигнала в ЛБВ Рудольфом Компфнером. Срыв Компфнера и условия его возникновения исследуются во многих работах (см., например, [10-14]).

Вторая глава начинается с описания самосогласованной задачи. Рассматривается исследуемая модель и исходные соотношения. Приведены зависимости коэффициента усиления от длины системы для различных наборов параметров.

Далее идёт рассмотрение дисперсионного уравнения для свободного электронного потока, из которого следует возможность построения дисперсионной характеристики. Наличие в решении дисперсионного уравнения комплексных корней соответствует условию конвективной неустойчивости.

В третьей главе приведена нелинейная теория взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем и получены уравнения, которые учитывают такие нелинейные эффекты как:

- 1) изменение средней скорости электронов при взаимодействии с полем бегущей волны;
- 2) обгон одних электронов другими, группировку электронного потока (образование сгустков, их деформацию и разрушение).

В основе данной нелинейной теории взаимодействия электронного потока с бегущей волной лежит волновой метод В.А. Солнцева [15]. Автор использовал нелинейную модель электронного пучка, которая позволяет учитывать группировку электронного пучка в поле собственного пространственного заряда. В.А. Солнцев аналитически показал, что полученное уравнение относительно параметра группировки электронов в электронном потоке в данной задаче может быть сведено к уравнению нелинейного осциллятора.

В результате математических преобразований имеем систему:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 B}{\partial \xi^2} + F(\xi)J_0(B) - F^*(\xi)J_2(B) + 2qJ_1(B)[J_0(B) - J_2(B)] = 0 \\ I(\xi) = 2J_1(B)e^{-j\frac{\pi}{2}} \\ \frac{dF}{d\xi} + jbF(\xi) = -2(1 + bC_0)^2 I(\xi) \end{cases} \quad (1)$$

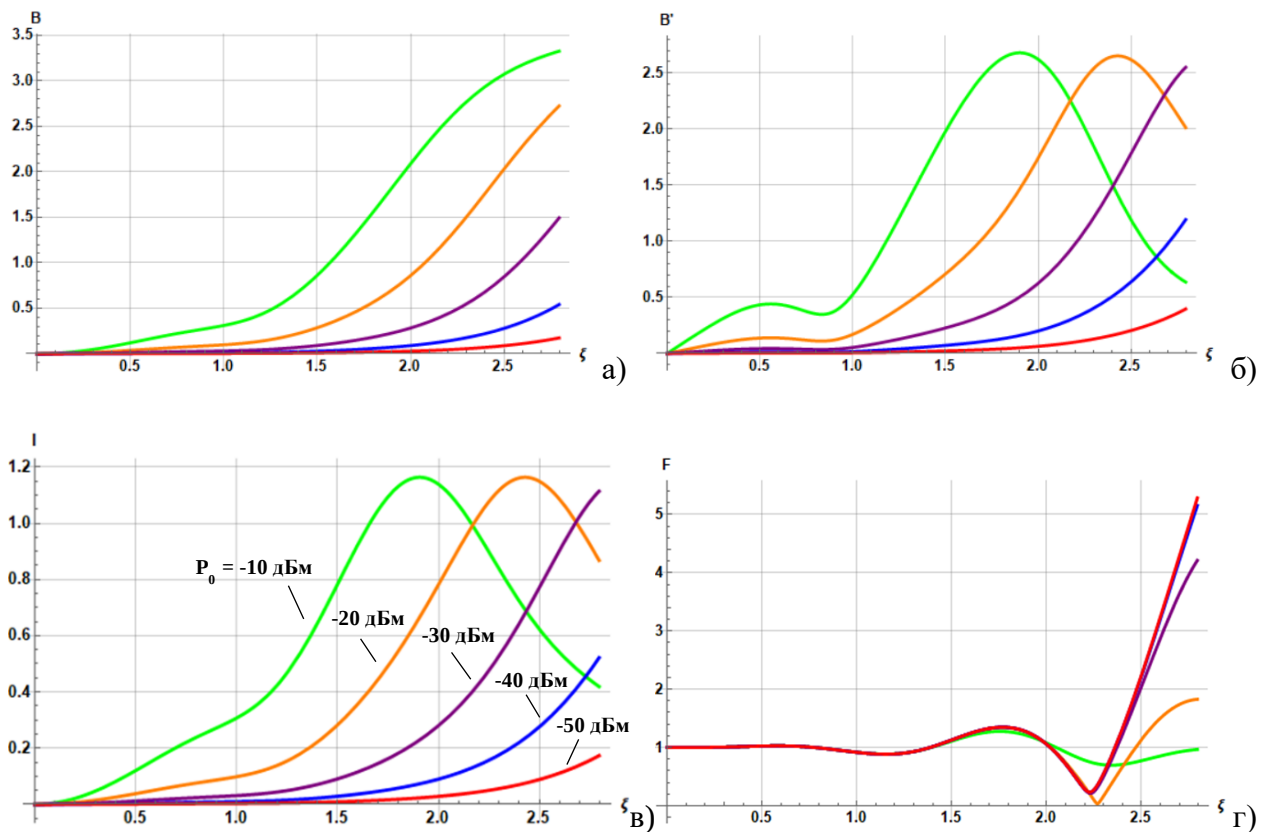
где $J_1(B)$ – функция Бесселя первого порядка, $\xi = C_0\beta_e x$ – безразмерная координата, $C_0 = \left(\frac{I_0 K_0}{4U_0}\right)^{1/3}$ – параметр усиления Пирса, $F(\xi) = \frac{E(x)e^{j\beta_e x}}{2\beta_e U_0 C_0^2}$ – безразмерная амплитуда синхронной волны, $b = -\frac{(\beta_e - \beta_0)}{\beta_e C_0}$ – параметр рассинхронизма, который характеризует фазовую скорость «холодной» волны в подвижной системе координат, $q = 4QC_0 = \left(\frac{\beta_p}{\beta_e C_0}\right)^2$ – параметр пространственного заряда.

Ниже на Рис. 1 представлены результаты моделирования системы при следующих параметрах: частота сигнала 800 МГц, ускоряющее напряжение $U_0 = 117$ В, ток пучка $I_0 = 60$ мА, $R_{св} = 55$ Ом. [14].

На Рис. 1 (а) представлены зависимости параметра группировки электронов в потоке от безразмерной координаты для различных значений входной мощности. На Рис. 1 (б) представлены аналогичные зависимости для производной от параметра группировки. Известно, что величина параметра группировки характеризует величину модуляции электронов в пучке по току,

а величина производной параметра группировки характеризует модуляцию электронов по скорости. Таким образом, данные диаграммы позволяют следить за процессами в электронном потоке на всей длине пространства взаимодействия.

На Рис. 1 (в) представлены зависимости амплитуды переменной составляющей сгруппированного тока пучка от безразмерной координаты для различных значений входной мощности. На Рис. 1 (г) представлено распределение амплитуды продольной компоненты электрического поля бегущей волны вдоль пространства взаимодействия для различных значений входной мощности. На Рис. 1 (д) представлена зависимость коэффициента усиления от длины пространства взаимодействия для различных значений входной мощности.



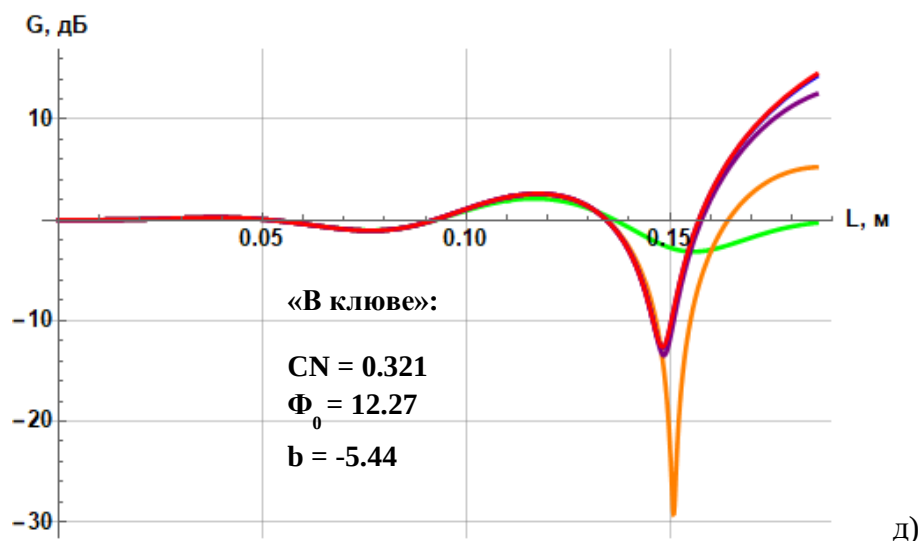


Рис.1. а) модуляция электронов по току; б) модуляция электронов по скорости; в) и г) распределение тока пучка I и поля F в пространстве взаимодействия; д) коэффициент усиления G от длины пространства взаимодействия L . Параметры системы: $F = 800$ МГц, $U_0 = 117$ В, $I_0 = 60$ μ А, $R_{св} = 55$ Ом. [14]

Как видно из зависимостей, представленных на Рис. 1 (д), существует оптимальное значение величины мощности входного сигнала, соответствующее максимальному подавлению. Подобный эффект также был описан в работе Гришина С.В. с соавторами [14].

Рассмотрим более подробно Рис.1. На Рис. 1 (д) виден ярко выраженный «провал», соответствующий подавлению. Оранжевая кривая, соответствующая входной мощности -20дБм, на данном графике демонстрирует наибольшее подавление. Зеленая кривая, соответствующая большей входной мощности -10дБм, на данном графике демонстрирует практически отсутствие подавления. На первый взгляд, в этом нет ничего странного, поскольку при рассмотрении эффекта Компфнера обычно, увеличение мощности приводит к ухудшению подавления, а уменьшение мощности, наоборот, улучшает подавление. Однако при уменьшении мощности до -30дБм, до -40дБм, до -50дБм, что соответствует фиолетовой, синей и красной кривым, можно наблюдать ухудшение подавления, причем во всех трех случаях подавление имеет примерно одинаковый уровень.

Обратимся теперь к Рис. 1 (а) и (б). Зеленая кривая (-10дБм) на Рис. 1 (а) зависимости параметра группировки имеет нарастающий характер. Это означает, что в точке с координатой по оси абсцисс 2.4 (примерная координата подавления, см. Рис. 1 (г)) имеет место значительная модуляция электронов в пучке по плотности тока. То есть имеют место плотные электронные сгустки. При этом на Рис. 1 (б) зеленая кривая (производная параметра группировки) имеет сперва нарастающий, а потом ниспадающий характер. Это означает, что к моменту достижения точки 1.8 по оси абсцисс имеет место значительная модуляция электронов в пучке по скорости, но к моменту достижения точки 2.4 по оси абсцисс модуляция по скорости значительно снижается. Таким образом в точке с координатой 2.4 имеют место электронные сгустки слабomodulированных по скорости электронов.

Теперь обратим внимание на поведение на Рис. 1 (а) и (б) оранжевых кривых, соответствующих входной мощности -20дБм. Оранжевая кривая на Рис. 1 (а) зависимости параметра группировки также имеет нарастающий характер, однако лежит ниже зеленой кривой. Видно, что в точке с координатой 2.4 модуляция по плотности тока ниже, чем в предыдущем случае. То есть в случае, соответствующем оранжевой кривой, электронные сгустки имеют меньшую плотность. Однако на Рис. 1 (б) видно, что в данном случае в точке 2.4 значительно выше модуляция по скорости. То есть при худшей по сравнению с предыдущим случаем модуляции по плотности наблюдается более высокая модуляция по скорости.

Еще раз, в первом случае (зеленая кривая, -10дБм) в координате 2.4 имеют место плотные электронные сгустки с низкой модуляцией электронов по скорости, а во втором случае (оранжевая кривая, -20дБм) сгустки имеют более низкую плотность, но значительно более высокую модуляцию по скорости.

В случае же с мощностями -30дБм, -40дБм, -50дБм видно, что в точке 2.4 низкие значения имеют и уровень модуляции по плотности и уровень модуляции по скорости.

Заключение

В данной работе в рамках линейной одномерной модели взаимодействия электронного потока с бегущей электромагнитной волной получены графики зависимостей коэффициента усиления от длины пространства взаимодействия для различных наборов параметров. Очевидно, что, согласно линейной теории, достижимый коэффициент усиления монотонно возрастает при увеличении длины пространства взаимодействия.

В рамках приближенной нелинейной теории взаимодействия электронного потока с бегущей электромагнитной волной получены графики зависимостей амплитуды переменной составляющей сгруппированного тока пучка от безразмерной координаты и распределение амплитуды продольной компоненты электрического поля бегущей волны вдоль пространства взаимодействия для различных значений входной мощности. На основе полуаналитической нелинейной теории проведен анализ режимов работы ЛБВ и построены зависимости коэффициента усиления от длины пространства взаимодействия для различных значений входной мощности в режиме усиления и в режиме подавления.

Нелинейная модель демонстрирует свою корректность применительно к типовой задаче усиления в системе «электронный поток – бегущая электромагнитная волна».

В режиме нелинейного подавления существует оптимальное значение величины мощности входного сигнала, соответствующее максимальному подавлению.

Список использованных источников

1. Лопухин В. М. Лампа с бегущей волной //УФН, декабрь 1948, Т.XXXVI, вып.4, стр.456-477.
2. R. Kompfner, "The traveling wave valve", Wireless World, 1946, vol.52, pp.369-372.
3. R. Pierce, "Theory of the beam-type traveling-wave tube" Proc. IRE, 1947, vol.35, pp.111-123.

4. Gilmour Jr. A.S. Principles of Traveling Wave Tubes. Boston - London: Artech House, 1994; Гилмор-мл. А. С. Лампы с бегущей волной. М.: Техносфера, 2013.
5. Золотых Д.Н., Роговин В.И. Проектирование замедляющих систем электровакуумных приборов СВЧ с длительным взаимодействием и анализ электродинамических характеристик: учебно-методическое пособие// Саратов, изд-во: «Наука», 2016.
6. Palmer W. D., in Proc. of the 13th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2012, Monterey, CA USA, 24±26 April 2012 (Piscataway, NJ: IEEE, 2012) p. 17.
7. Di Carlo A et al., in Proc. of the 10th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2009, Rome, Italy, 28±30 April 2009 (Piscataway, NJ: IEEE, 2009) p. 100.
8. Field M. et al. IEEE Trans. Electron Devices, 2018, 65, 2122.
9. Haystead J. J., Electron. Defense, 2018, 41, (3), 24.
10. K. T. Nguyen, J. P. Calame, D. E. Pershing, B. G. Danly, M. Garven, B. Levush, et al., "Design of a Ka-band gyro-TWT for radar applications", IEEE Trans. Electron Devices, Jan. 2001, vol. 48, pp. 108-115.
11. G. S. Nusinovich and M. T. Walter, "Use of the Kompfner dip effect in multistage gyro-TWTs of high average power," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 30, no. 3, pp. 922-926, June 2002, doi: 10.1109/TPS.2002.801565.
12. Гинзбург Н.С. и др. // ПЖТФ. 2017. Т. 43, № 18, с. 47; Ginzburg N.S. et al. // Phys. Plasmas. 2017. Vol. 24, 023103.
13. Grishin S.V. et al. // Phys.Rev. E 2018. Vol. 98, 022209.
14. Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Разуваев Ф.П., Скороходов В.Н., Титов В.Н., Трубецков Д.И.// Нелинейное подавление сигналов в лампе бегущей волны. Журнал технической физики, т. 91, вып. 11 (2021).
15. Солнцев В.А. Нелинейные волны в электронных потоках // Известия вузов. Радиофизика. 1974, Т. 17, №4. С. 616–626.