

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

Кафедра электроники, колебаний и волн

**О линейной теории взаимодействия электронного потока со средами
с произвольной диэлектрической проницаемостью**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 421 группы
направления 03.03.03 «Радиофизика»
факультета нелинейных процессов
Арефьева Ивана Юрьевича

Научный руководитель
ассистент КЭКиВ

Фунтов А.А.

дата, подпись

Зав. кафедрой электроники,
колебаний и волн,
член-корреспондент РАН,
д.ф.-м.н., профессор

Трубецков Д. И.

дата, подпись

Саратов 2019

1. Введение

СВЧ-приборы широко используются в электронной технике, в различных физических исследованиях. В последнее время выросла потребность в освоении миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов. Одним из приборов, который может работать в данном диапазоне, является резистивный усилитель, обладающий следующими достоинствами

- 1) Широкая полоса частот.
- 2) Высокий коэффициент усиления
- 3) Отсутствие обратной связи.

Недостатком классического резистивного усилителя является технологическая трудность в его производстве – нанесении диэлектрического покрытия на стеклянную трубку пролетного канала, что не дало возможность организовать их промышленное производство.

Интерес к резистивному усилителю вновь пробудился в результате исследований метаматериалов, потенциально позволяющими производить приборы с гораздо более высокими коэффициентами усиления, чем в классической СВЧ-электронике.

В связи с этим вновь возник интерес к резистивному усилителю – было предложено создать подобный прибор, где вместо слоя диэлектрика будут применяться метаматериалы. Такой прибор потенциально способен дать высокие коэффициенты усиления и могут работать на высоких – до сотен ГГц – частотах, что особенно актуально в настоящее время.

Целью данной работы является анализ конкретных моделей метаматериалов в резистивном усилителе.

2. Обзор

2.1. Резистивный усилитель.

Впервые в России о резистивном усилителе было написано в 1954 году в журнале «Успехи физических наук» [1], где написано: «В последние годы проблема дециметровых и сантиметровых радиоволн широко обсуждается в отечественной, а также иностранной печати... Недавно в литературе появились сведения о новом виде усилителя сантиметровых радиоволн – усилителе на поглощении». Согласно данной статье, резистивный усилитель должен обладать следующими достоинствами:

- 1) Коэффициентом усиления равным (на момент разработки прибора) ЛБВ и широкой полосой пропускания.
- 2) Отсутствие обратной связи, что приводит к невозможности самовозбуждения.
- 3) Отсутствие необходимости синхронизма между скоростью электронов и фазовой скоростью волны.

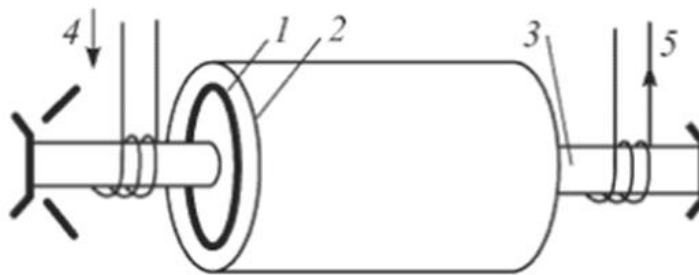


Рис. 1 Схема резистивного усилителя: 1 – резистивный слой, 2 – диэлектрическая трубка, 3 – электронный поток, 4 и 5 – входное и выходное устройства.

Как было сказано в статье [1]: «Усилитель на поглощении использует новый физический принцип, который заключается в использовании сдвига фаз между электронным током и переменными составляющими поля, возникающего благодаря наличию поглощающих стенок (материал стенок характеризуется комплексной проницаемостью)».

Однако, как показано в работе [2], для возникновения резистивной неустойчивости не обязателен поглощающий диэлектрический слой – комплексная проводимость среды также может вызывать неустойчивость в электронных потоках.

2.2. Метаматериалы

Необходимость работы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах привела к многочисленным трудностям в создании классических приборов СВЧ. Первый прибор с индуктивной средой предложен Дж. Пирсом и описан в работе Р. Компфнера [3] под названием «изитрон» (рис. 3).

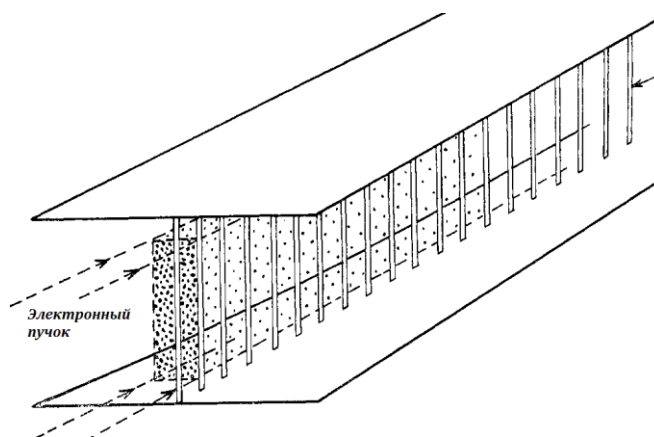


Рис. 2. Принципиальная схема изитрона.

Электродинамическая структура, с которой взаимодействует электронный пучок, состояла из набора близко расположенных тонких проволок длиной в половину длины волны, соединяющих проводящие поверхности. У изитрона должны были быть черты резистивного усилителя:

- 1) Отсутствие обратной связи.
- 2) Слабая зависимость от скорости потока.

Но так как изитрон имел узкую полосу пропускания, практического применения он не нашел.

Другим видом созданию сред с индуктивной проводимостью можно назвать метаматериалы, в которых пучок «видит» среду однородной, что существенно облегчает описание взаимодействия пучка и среды. Более того, такие приборы перспективны высокими расчетными коэффициентами усиления.

В работе [4] показано, что метаматериал — композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой из макроскопических элементов, обладающих произвольными размерами и формой. Условно метаматериалы можно разделить на электромагнитные и акустические по реакции на вид воздействия. Причем, на оптических частотах электромагнитные метаматериалы реагируют не только на электрическое, но и на магнитное поле.

2.3. Типы дисперсий для ENG метаматериалов.

Согласно указанной статье, метаматериал должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) Период метаматериалов с отрицательным ϵ должен быть значительно меньше длины волны чтобы поддерживать эффективные свойства среды.
- 2) Волна должна проявлять свойства отрицательного ϵ - при этом эффективная плазменная частота должна быть ниже частоты отсечки волновода (т.е. эффективная ϵ должна быть отрицательной, но близкой к нулю).

Первое требование к структуре состоит в том, чтобы период ENG-материала оставался менее $1/10$ длины волны. Если длина волны в

направлении распространения становится сопоставимой с периодом метаматериала, то нельзя будет пренебрегать пространственными гармониками в спектре сигнала. Граница, определяющая, когда период достаточно мал чтобы обозначит среду как ENG-метаматериал, а не традиционную периодическую структуру, не является точной и зависит от степени ошибки, которую можно принять между предсказанием теории эффективной метасреды и фактической средой. Часто применяемое «безопасное» эмпирическое правило заключается в том, что $p < 0.1$ длины волны.

Для распространения медленных волн вторым требованием к метаматериалам является то, что плазменная частота метаматериала должна быть ниже частоты отсечки волновода.

Чтобы удовлетворить этим противоречивым требованиям в [5] предложено добавить индуктивности к проводам решетки – это должно снизить ее эффективную плазменную частоту при сохранении небольшого периода, т.е. добавляет индуктивность сосредоточенных элементов.

Для описания характеристик ENG-метаматериалов часто используется формула, основанная на модели электронного газа (Друде).

$$\varepsilon_{\text{eff}}(\omega) = 1 - \frac{\omega_{\text{pM}}^2}{\omega(\omega + j\gamma)},$$

где ω_{pM} – плазменная частота метаматериала, γ – частота столкновений.

Пожалуй, одним из самых простых способов получения ENG-метаматериала является использование пространственной решетки из тонких проводников, как показано в работах Дж. Пендри с соавторами [6]. Они исследовали управление эффективными проницаемостями при следующем требовании к структурным элементам: их величина и расстояние между ними должны быть меньше длины волны

В этих работах было предложено заменять сплошной металл на решетку для снижения средней плотности и концентрации свободных электронов, что в свою очередь снижает плазменную частоту и частоту плазменного резонанса. Следовательно, можно регулировать диапазон частот с $\varepsilon < 0$ путем изменения геометрических параметров. В такой структуре дисперсионные характеристики волн аналогичны волнам в нейтральной плазме

Как было написано в требованиях к метаматериалам, требуется увеличение индуктивности, однако большая индуктивность может быть трудной для реализации и может создавать резонанс. Это было учтено в усовершенствованной модели Друде-Лоренца [5].

Другая предложенная модель ENG-материал – на основе распределенных индуктивных элементов (например, меандра), которые имеют преимущество по сравнению с сосредоточенной структурой. Для них эффективная диэлектрическая проницаемость линии может быть аппроксимирована моделью Друде-Лоренца по следующим причинам:

- 1) Меандр был бесконечно длинным и непрерывным.

2) Структура ENG-метаматериала имела друде-подобную характеристику.

Но так как бесконечный меандр имеет ребра, эффективная диэлектрическая проницаемость становится похожей на модель Друде-Лоренца.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{pM}^2 - \omega_r^2}{\omega^2 - \omega_r^2 + j\omega\gamma}$$

где ω_{pM} - плазменная частота метаматериала, ω_r – резонансная частота, γ – частота столкновений.

3. Учет конкретных моделей метаматериалов в резистивном усилителе.

В ходе данной работы рассмотрим теоретические расчеты для трех вариантов резистивных усилителей – классического с диэлектрическим покрытием с постоянным ε и резистивного усилителя с метаматериалами моделей Друде и Друде-Лоренца и сравним полученные характеристики.

Как рассматривалось ранее, классический резистивный усилитель состоит из диэлектрического волновода, вдоль оси которого пропускают предварительно модулированный при помощи спирали или объемного резонатора электронный пучок. При прохождении через него быстрая волна пространственного заряда (БВПЗ) затухает, а медленная волна пространственного заряда (МВПЗ) нарастает.

Рассчитаем основные характеристики по методике, предложенной в [7]. Используем предположение о малости сигнала. Получим дисперсионные уравнения для резистивного усилителя в общем виде:

$$\frac{\omega_0^2}{\varepsilon_{эфф}(\omega - v_0\beta)^2} = 1$$

Его решение можно найти в виде:

$$\beta = \beta_e \pm \frac{\beta_p}{\sqrt{\varepsilon_{эфф}}}$$

где $\beta_e = \frac{\omega}{v_0}$, $\beta_p = \frac{\omega_p}{v_0}$, где ω – частота сигнала, ω_p – плазменная частота

бесконечно широкого электронного потока

Для классического резистивного усилителя величину диэлектрической проницаемости можно представить как:

$$\varepsilon_{эфф} = \varepsilon \left(1 + \frac{\sigma}{i\omega\varepsilon} \right)$$

При этом дисперсионное уравнение приобретает вид:

$$1 = \frac{\omega_p^2}{\varepsilon' \left(1 - i \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right) (\omega - \beta v_0)^2},$$

где $\omega_p^2 = \frac{e\rho_0}{m\varepsilon_0}$, $\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Его

корни имеют вид:

$$\beta = \beta_e \pm \beta_p \frac{p + iq}{\sqrt{\varepsilon'}},$$

где $\beta_e = \frac{\omega}{v_0}$, $\beta_p = \frac{\omega_p}{v_0}$, $\left[1 - i \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right]^{-1/2} = p + iq$.

Найдем усиление в виде:

$$G = 20Lg \left| \frac{e^{-i\beta_1 x} - \frac{\beta_1}{\beta_2} e^{-i\beta_2 x}}{1 - \frac{\beta_1}{\beta_2}} \right|$$

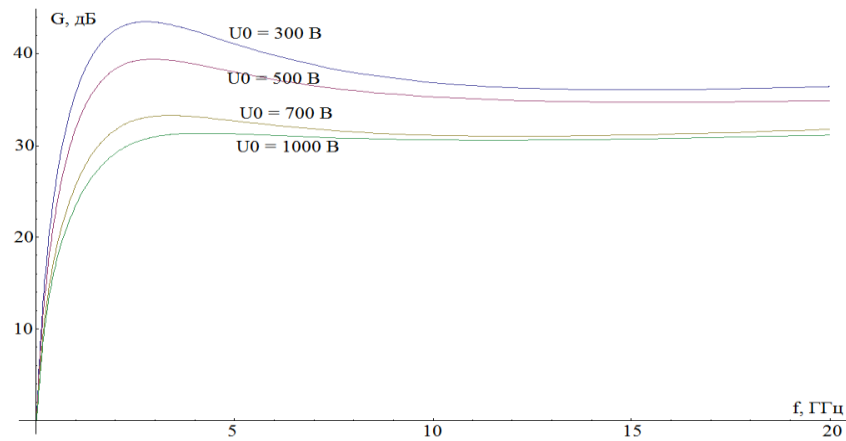


Рис.3. Коэффициент усиления классического резистивного усилителя для разных значений ускоряющего напряжения при $\epsilon=2.9$.

Как видно из рис. 3, максимальный коэффициент усиления связан с величиной ускоряющего напряжения: при его изменении изменяется и максимальное усиление прибора: с ростом напряжения максимальное усиление падает.

Воспользовавшись той же методикой, следом рассмотрим модель подобного усилителя, в котором вместо диэлектрического волновода используются метаматериалы моделей Друде и Друде-Лоренца.

Для модели Друде (электронного газа) эффективная диэлектрическая проницаемость имеет вид:

$$\epsilon_{\text{эфф}} = 1 - \frac{\omega_{\text{рМ}}^2}{\omega^2 + j\omega\omega_c}$$

где $\omega_{\text{рМ}}$ - плазменная частота метаматериала, ω_c – частота столкновений.

Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты сигнала показана на рис. 4.

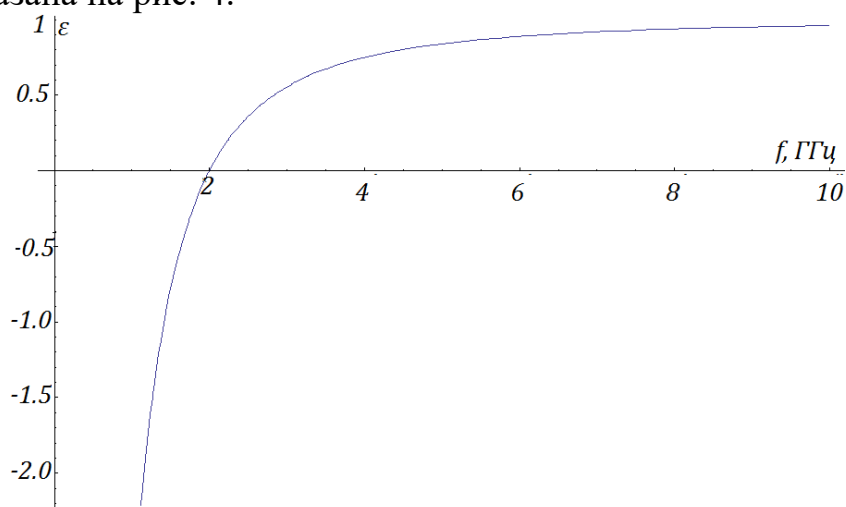


Рис. 4. Зависимость ϵ от частоты сигнала в модели Друде.

Дисперсионное уравнение резистивного усилителя в этом случае примет вид:

$$\frac{\omega_{\text{р}}^2}{\left(1 - \frac{\omega_{\text{рМ}}^2}{\omega^2 + j\omega\omega_c}\right)(\omega - v_0\beta)^2} = 1$$

$$\beta = \beta_e \pm \frac{\beta_p}{\sqrt{1 - \frac{\omega_{pM}^2}{\omega^2 + j\omega\omega_c}}}$$

где $\beta_e = \frac{\omega}{\vartheta_0}$, $\beta_p = \frac{\omega_p}{\vartheta_0}$, $v_0 = \sqrt{2 \frac{e}{m} V_0}$

На основе данных из статьи [5], возьмем плазменную частоту метаматериала $f_{pM} = 2$ ГГц, а частоту соударений $f_c = 0.2$ ГГц.

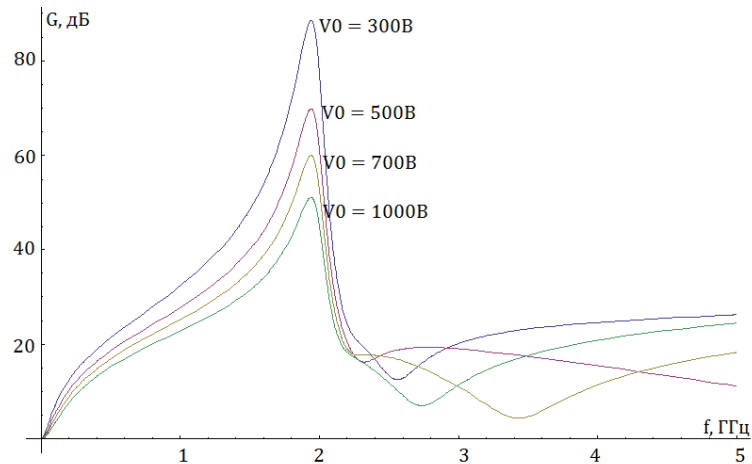


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления от частоты сигнала при различной величине ускоряющего напряжения.

На рис. 5 представлены зависимости коэффициента усиления от частоты сигнала при различной величине ускоряющего напряжения. Видно, что максимальный коэффициент усиления достигается при совпадении частоты сигнала с плазменной частотой метаматериала и растет с понижением ускоряющего напряжения. При высоких напряжениях (как в ЛБВ) происходит ухудшение группировки пучка.

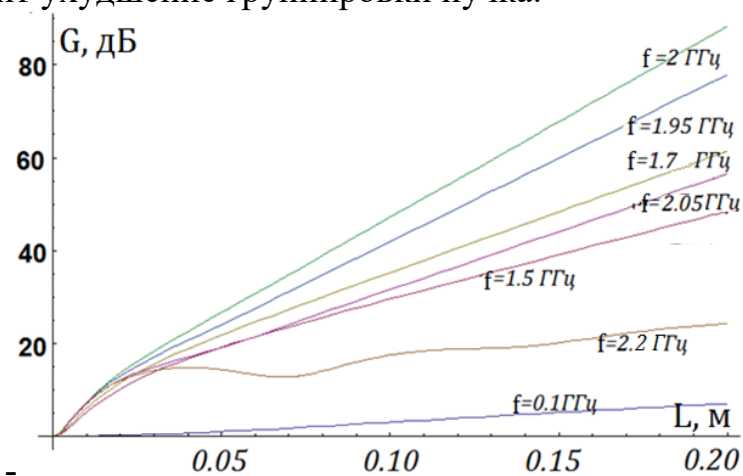


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления от длины прибора при различных рабочих частотах.

На рис. 6, подтверждая предыдущие выводы, показано, что максимально усиление достигается на частоте 2 ГГц, что соответствует

плазменной частоте метаматериала. При этом возникает периодическая зависимость коэффициента усиления по длине прибора.

На рис. 7 построены векторные диаграммы для различной длины прибора при частоте 2.3 ГГц. По данным векторным диаграммам в различных точках, соответствующих минимуму или максимуму усиления, видно, что коэффициент усиления связан с амплитудой двух волн пространственного заряда и углом между их векторами.

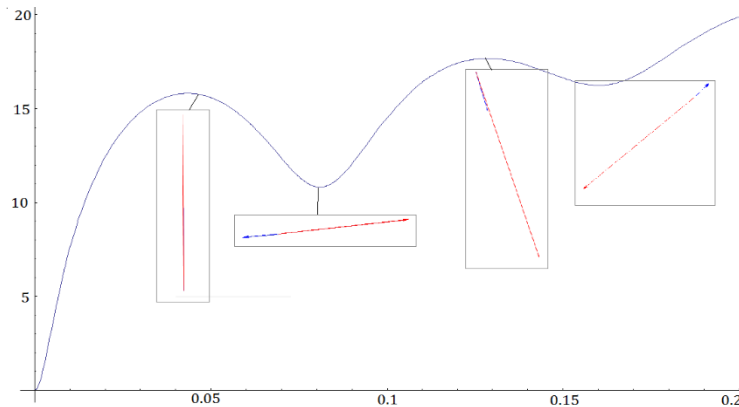


Рис. 7. Векторная диаграмма для различных длин прибора.

Рассмотрим аналогичным образом характеристики подобного усилителя с метематериалом типа Друде-Лоренца. В отличие от метаматериалов типа Друде, в которых применяются сосредоточенные индуктивные элементы, здесь применяются распределенные индуктивные элементы (например, в виде меандровой линии), обладающие своей резонансной частотой.

Как и в предыдущем случае, эффективная диэлектрическая проницаемость в модели Друде-Лоренца зависит от частоты сигнала (рис. 15).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{pM}^2 - \omega_r^2}{\omega^2 - \omega_r^2 + j\omega\omega_c}$$

где ω_{pM} - плазменная частота метаматериала, ω_r - резонансная частота, ω_c - частота столкновений.

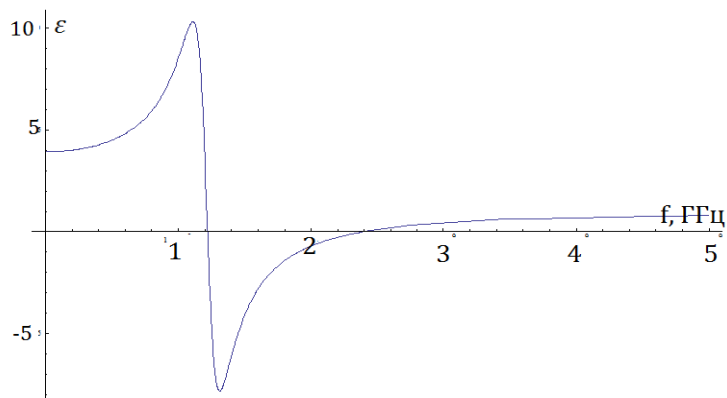


Рис. 8. Зависимость ε от частоты сигнала.

Дисперсионные уравнения для усилителя с метаматериалом типа Друде-Лоренца приобретает вид:

$$\frac{\omega_0^2}{\left(1 - \frac{\omega_{pM}^2 - \omega_r^2}{\omega^2 - \omega_r^2 + j\omega\omega_c}\right)(\omega - \vartheta_0\beta)^2} = 1 \quad \beta = \beta_e \pm \frac{\beta_p}{\sqrt{1 - \frac{\omega_{pM}^2 - \omega_r^2}{\omega^2 - \omega_r^2 + j\omega\omega_c}}}$$

На основе данных из статьи [5] выберем типичные для метаматериалов типа Друде-Лоренца параметры плазменной частоты $f_{pM} = 2.42$ ГГц, резонансной частоты $f_r = 1.22$ ГГц и частоты соударений $f_c = 0.2$ ГГц.

Зависимости коэффициента усиления от параметров системы показаны на рис. 9.

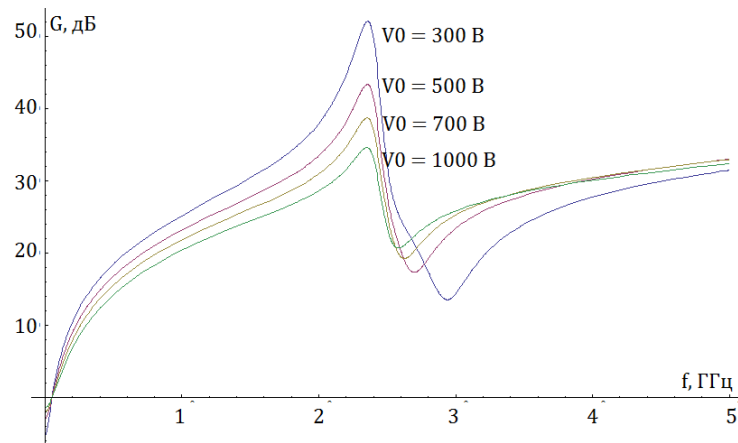


Рис. 9. Зависимость коэффициента усиления от частоты сигнала при различной величине ускоряющего напряжения.

Как видно на рис. 9 коэффициент усиления при применении метаматериалов типа Друде-Лоренца несколько снижается, а рабочая полоса при тех же напряжениях расширяется. Максимум усиления также соответствует частоте, равной плазменной частоте метаматериала.

Зависимость коэффициента усиления от длины прибора на разных частотах показана на рис. 7.

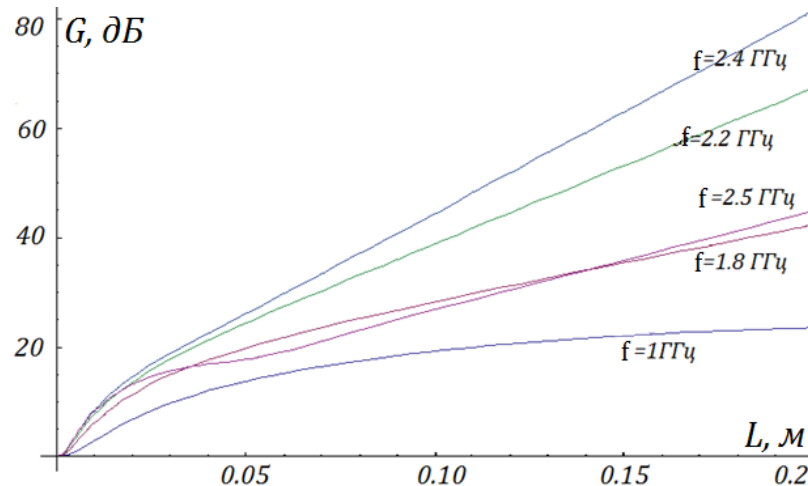


Рис. 10. Зависимость коэффициента усиления от длины прибора на разных частотах.

На графике (рис. 10) видно, что усиление прибора при фиксированной длине растет до достижения частоты сигнала, равной плазменной частоте метаматериала. При этом также наблюдается периодическая зависимость

коэффициента усиления по длине прибора, которую объясним, проведя анализ векторных диаграмм для различных длин прибора

Как и в модели Друде, видно, что коэффициент усиления зависит как от соотношения амплитуд быстрой и медленной волн пространственного заряда, так и от угла между их векторами. Максимальное усиление наблюдается когда вектора обеих волн сонаправлены, минимальное – при противоположной направленности.

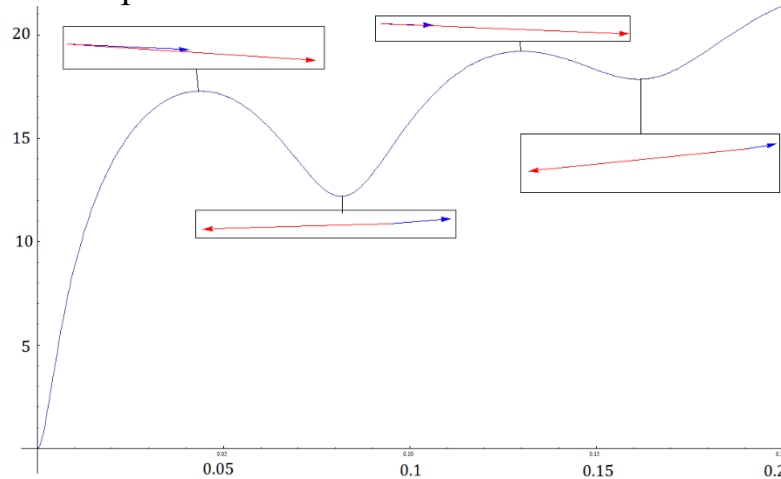


Рис. 11. Векторная диаграмма для различных длин прибора.

Для усилителя с метаматериалами модели Друде-Лоренца также следует проанализировать зависимость усиления от резонансной частоты метаматериала.

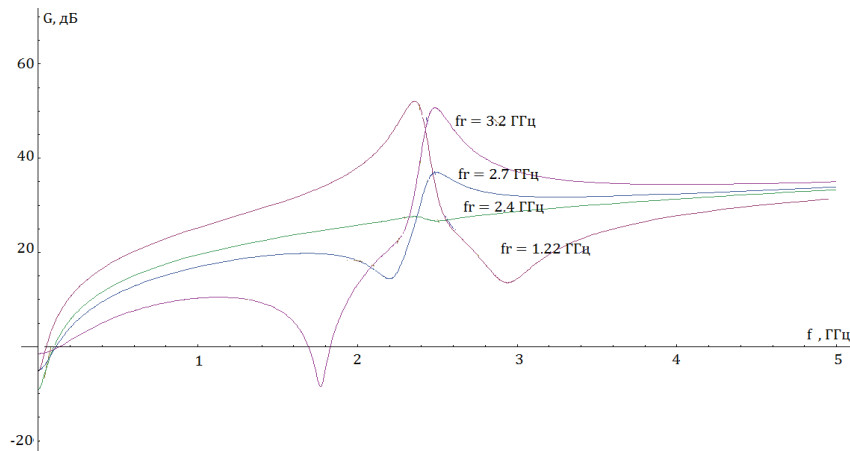


Рис.13. Зависимость усиления от частоты при разных резонансных частотах.

Как видно по графикам на рис. 13, при разных резонансных частотах метаматериала происходит как изменение коэффициента усиления и ширины рабочей полосы, так и качественное изменение формы кривых – вплоть до возможного появления полос поглощения на определенных частотах – и увеличение частоты, соответствующей максимальному усилению. Проанализируем векторные диаграммы для частоты сигнала 1.8 ГГц и резонансной частоты 3.2 ГГц.

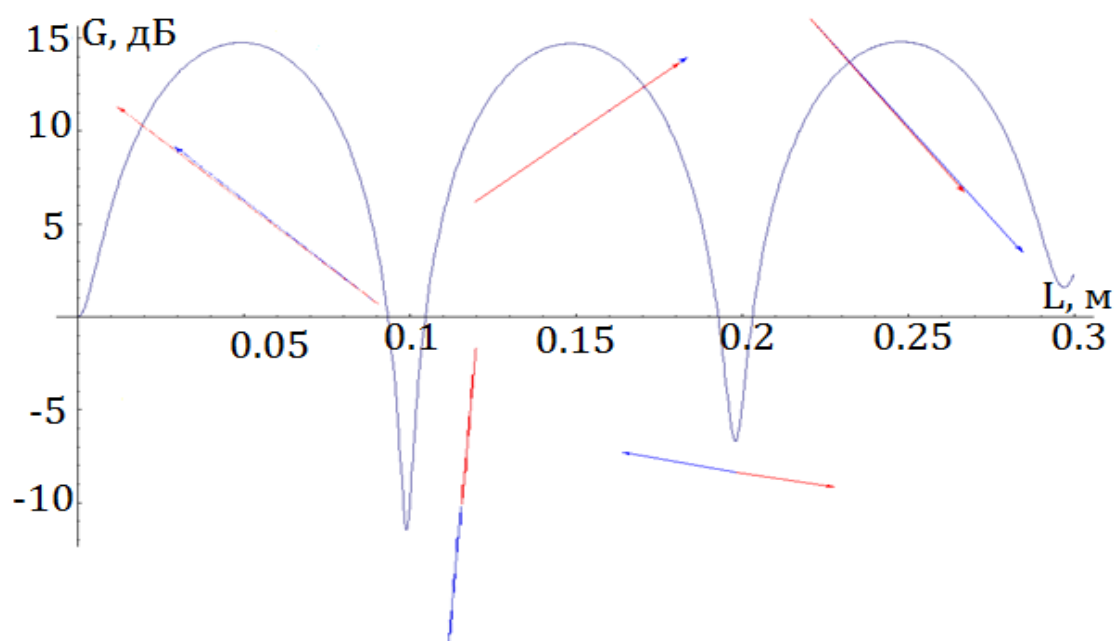


Рис. 14. Векторные диаграммы при различных длинах прибора.

Как видно по рис. 14, здесь усиление также зависит от амплитуды двух волн пространственного заряда и угла между их векторами. Причем, в данном случае на больших длинах прибора амплитуда быстрой волны оказывается больше, чем у медленной.

4. Заключение

В ходе данной работы были рассчитаны зависимости усиления модификации резистивного усилителя, на основе метаматериалов, от параметров прибора – рабочей частоты и длины – для двух основных моделей метаматериалов – Друде и Друде-Лоренца.

Как показали расчеты, резистивный усилитель с метаматериалами позволяет получить высокие коэффициенты усиления. Максимальный коэффициент, как показали аналитические расчеты, при этом соответствует такой частоте сигнала, которая равна плазменной частоте метаматериала.

Обнаружено, что при частоте сигнала выше плазменной частоте метаматериалов амплитуды быстрой и медленной волн пространственного заряда становятся сравнимыми по амплитуде, что приводит к нелинейной зависимости коэффициента усиления от длины прибора.

Проанализировав две модели метаматериалов, можно сделать вывод, что в обеих возможны высокие коэффициенты усиления. Однако, несмотря на больший максимальный коэффициент усиления и отсутствие резонансных явлений на низких частотах, метаматериалы модели Друде с сосредоточенными индуктивными элементами сложнее в производстве, из-за чего целесообразно применение метаматериалов модели Друде-Лоренца.

Литература:

1. Лопухин В.М., Веденов А.А.. Усилитель на поглощении // УФН, 1954 г., т. LIII, вып. 1, стр. 69-86.
2. Rowe T., Behdad N., Booske J.. Metamaterial-Enhanced Resistive Wall Amplifiers: Theory and Particle-in-Cell Simulation // IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43, №7, стр. 2123-2131.
3. Kompfner R. Travelling-wave tubes // Rep. of Prog. in Phys. 1952, 15, pp. 275-327.
4. 13. Вендик И.Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) // ЖТФ, 2013, т. 83, вып. 1
5. Rowe, T., P. Forbes, J. H. Booske, et al., "Inductive Meandered Metal Line Metamaterial for Rectangular Waveguide Linings," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 4, pp. 654-664, 2017
6. Pendry J. B., Holden A. J., Stewart W. J., Youngs I.. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures // Phys. Rev. Lett., vol. 76, Jun. 1996, pp. 4773-4776.
7. Трубецков Д.И., Храмов А.Е., «Лекции по СВЧ электронике для физиков» в 2 т., т.1, лекция 3.// Физматлит, 2004.