

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра физики открытых систем

Магнитно-управляемые микрополосковые СВЧ генераторы

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 431 группы

направления

03.03.03 «Радиофизика»

факультета нелинейных процессов

Филимоновой Екатерины Владимировны

Научный руководитель

ведущий инженер кафедры теоретической

физики физического факультета СНИГУ _____ М.Б. Мысенко

Зав. кафедрой физики открытых систем

профессор, д. ф. – м. н. _____ А. А. Короновский

Саратов 2016 г.

Введение.

Одной из наиболее важных проблем современной твердотельной электроники является создание генераторов электромагнитных колебаний коротковолновой части СВЧ-диапазона. Особо актуальна эта проблема в миллиметровом диапазоне. Генераторы, созданные на основе диода Ганна, по совокупности параметров являются в настоящее время одним из лучших твердотельных СВЧ генераторов.

Для многих целей необходимы СВЧ генераторы, частота которых в широком диапазоне однозначно управляется изменением какого-либо внешнего фактора. Генераторы, частота которых управляется напряжением обратного смещения на полупроводниковом диоде, что приводит к изменению емкости *p-n* перехода и частоты контура, получили название генераторов, управляемых напряжением (ГУН). Однако такие генераторы обычно имеют узкий диапазон перестройки и нелинейную зависимость частоты от управляющего напряжения. В этом отношении лучшими характеристиками обладают генераторы, управляемые магнитным полем (ГУМ). В таких генераторах в качестве резонатора используется сфера из железо-иттриевого граната (ЖИГ-сфера), резонансная частота которого пропорциональна величине приложенного к ЖИГ-сфере магнитного поля, что обеспечивает линейную зависимость частоты генерации от магнитного поля. Кроме того, такие генераторы могут обеспечить достаточно широкую полосу перестройки (до октавы и более).

Задачами данной дипломной работы являются теоретическое обоснование принципов работы и расчет (проектирование) перестраиваемых с помощью внешних магнитных полей генераторов на микрополосковых линиях с СВЧ-диодами (МПЛ-генераторов).

Основная часть.

1. Теоретические основы МПЛ генератора, управляемого магнитным полем.

Рассмотрим распространение электромагнитной волны (ЭМВ) в несимметричной МПЛ. Если последняя представляет собой систему без потерь с однородным диэлектриком бесконечных размеров, то в ней может распространяться квази-Т-волна. На практике диэлектрик имеет конечные размеры и потери неизбежны. Поэтому в реальных МПЛ структура поля ЭМВ отличается от структуры поля Т-волны. Тем не менее, наблюдается неплохое соответствие между результатами расчёта характеристик МПЛ, полученных в приближении Т-волны, и данными измерений реальных МПЛ.

Характеристиками волноведущей системы являются скорость V распространения ЭМВ и характеристическое сопротивление Z_0 , которые выражаются через погонные ёмкость C_0 и индуктивность L_0 :

$$V = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (1)$$

В длинной линии скорость распространения электромагнитной волны равна скорости света в среде, заполняющей линию, т.е.

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}, \quad Z_0 = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{c \cdot C_0}, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме, ε и μ – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды. Эти зависимости могут быть выражены также через относительные проницаемости ε_r и μ_r . Для МПЛ конечных размеров ε_r и μ_r заменяются их эффективными значениями ε_{eff} и μ_{eff} , учитывающими степень заполнения МПЛ диэлектриком.

Динамика намагниченности \vec{M} ферромагнетика в магнитном поле с учётом потерь описывается уравнением:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma [\vec{M} \times \vec{H}] - \frac{\alpha}{|\vec{M}|} \left[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \right], \quad (3)$$

где \vec{M} - удельный магнитный момент магнетика, α - параметр потерь, γ - магнитомеханическое отношение, \vec{H} - эффективное значение напряженности магнитного поля, действующего на магнитный момент в данной точке феррита. В общем случае \vec{H} - суперпозиция приложенного поля \vec{H}_0 и внутренних полей, обусловленных кристаллографической анизотропией, обменными силами и размагничивающим полем [5, 6, 8].

Для простоты положим $\vec{H} = \vec{H}_0$ и рассмотрим намагниченный до насыщения феррит, в котором приложенное магнитное поле вызывает однородное по объему распределение намагниченности ($|\vec{M}| = const$). В случае, когда поле является суммой постоянного \vec{H}_0 и переменного \vec{h} полей ($\vec{H}_0 \gg \vec{h}$ и $\vec{H}_0 \perp \vec{h}$), решение (3) для намагниченности – также сумма постоянного вектора намагниченности \vec{M}_0 , направленного по \vec{H}_0 , и переменного вектора \vec{m} . Так что суммарный вектор намагниченности прецессирует вокруг \vec{H}_0 с частотой $\omega_H = \gamma H_0$. Вектора \vec{m} и \vec{h} связаны между собой соотношением $\vec{m} = \vec{\chi} \vec{h}$, где $\vec{\chi}$ - тензор ВЧ магнитной восприимчивости:

$$\vec{\chi} = \begin{vmatrix} \chi & j\chi_a & 0 \\ -j\chi_a & \chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Здесь $\chi = \frac{\gamma\mu_0\omega_H}{\omega_H^2 - \omega^2}$, $\chi_a = \frac{\gamma\mu_0\omega}{\omega_H^2 - \omega^2}$, μ_0 - магнитная проницаемость вакуума.

Тензор ВЧ магнитной проницаемости $\vec{\mu}$, связывающий переменные вектора магнитной индукции и напряженности магнитного поля, выражается через $\vec{\chi}$:

$$\vec{\mu} = 1 + 4\pi\vec{\chi} = \begin{vmatrix} \mu & j\mu_a & 0 \\ -j\mu_a & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Компоненты тензора имеют вид:

$$\mu = \frac{\omega_H(\omega_H + \omega_M) - \omega^2}{\omega_H^2 - \omega^2}, \quad \mu_a = \frac{\omega_M \omega}{\omega_H^2 - \omega^2},$$

где $\omega_M = \gamma 4\pi M_0$, $\omega_H = \gamma H_0$ - частоты переменного поля.

Таким образом, имеем зависимость магнитной проницаемости феррита от приложенного магнитного поля и от частоты ЭМВ, распространяющейся в ферритовой среде [9].

Постоянная распространения ЭМВ с частотой ω для феррита, подмагниченного в направлении, перпендикулярном направлению распространения, определяется в виде:

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu_0 \mu_r}, \quad (6)$$

где относительная магнитная проницаемость феррита μ_r на СВЧ выражается через компоненты тензора $\vec{\mu}$:

$$\mu_r = \frac{\mu^2 - \mu_a^2}{\mu}. \quad (7)$$

Итак, распространение ЭМВ в МПЛ на подложке из феррита будет зависеть от приложенных магнитных полей, способных изменять магнитную проницаемость ферритового материала. Влияние магнитных полей приведет к изменению длины ЭМВ и волнового сопротивления МПЛ. Изменяются также характеристики поглощения ЭМВ в линии. Если на ряде участков МПЛ приложено локальное магнитное поле, то характеристики ЭМВ на различных участках МПЛ изменятся неодинаково. Если приложенное магнитное поле сосредоточено в области, размеры которой меньше размеров МПЛ, будет иметь место аналог скачка волнового сопротивления МПЛ. Соответственно, волновые сопротивления в соседних областях МПЛ будут различными.

Таким образом, в основе метода перестройки частоты МПЛ-генератора с помощью магнитного поля лежит зависимость магнитной проницаемости ферритовых материалов от приложенного внешнего магнитного поля.

Длина электромагнитной волны λ , распространяющейся в среде с относительными проницаемостями ε_r , μ_r , связана с длиной волны λ_0 в свободном пространстве соотношением:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}. \quad (8)$$

Длина электромагнитной волны, распространяющейся в МПЛ, заполненной этой средой, связана с λ_0 таким же соотношением с учетом замены ε_r , μ_r на их эффективные значения ε_{eff} , μ_{eff} , зависящие от геометрической длины L микрополосковой линии. Таким образом, частота f ЭМВ выражается в виде:

$$f = \frac{c}{2L\sqrt{\varepsilon_{eff}\mu_{eff}}}, \quad (9)$$

то есть, для ферритовой подложки при постоянных L и ε_{eff} $f \sim [\mu_{eff}(H)]^{-\frac{1}{2}}$. Эта зависимость качественно объясняет влияние магнитного поля, приложенного к ферритовой подложке МПЛ-генератора, на частоту генерации. Таким образом, при постоянных размерах системы под действием внешнего магнитного поля изменяются частоты, на которых выполняются резонансные условия. Другими словами, происходит изменение эффективных размеров резонансной системы.

Проведенные расчеты и измерения в реальной системе позволили получить зависимости частоты и выходной мощности генератора на диоде Ганна от величины однородного магнитного поля, показанные на рис. 1. Значения напряженности магнитного поля даны в Гс, поскольку измерения поля проводились в воздушной среде с помощью измерителя магнитной индукции. Видна возможность перестройки МПЛ-генератора при различных направлениях магнитного поля: нормальном к плоскости подложки и касательном к ней в плоскости, перпендикулярной направлению распространения ЭМВ. Как видно из рис. 1(а), увеличение нормального магнитного поля от 0 до 1000 Гс не влияет на частоту генерации и выходную мощность МПЛ-генератора. При дальнейшем увеличении магнитного поля

происходит перестройка частоты (с крутизной 10 мГц/Гс) и падение уровня СВЧ-мощности. Причём изменение мощности на $3dB$ от максимального значения достигается при величине магнитного поля 1650 Гс. В случае касательного подмагничивания частота генерации монотонно возрастает (8 мГц/Гс) и при $H=1000$ Гс достигает максимума (рис. 1(б)).

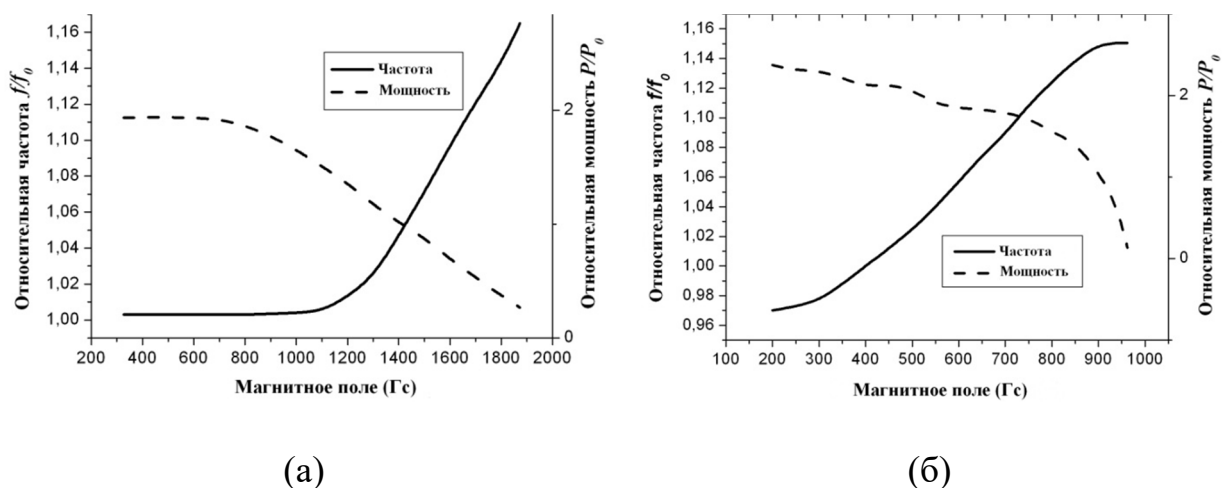


Рис.1. Зависимость мощности и частоты МПЛ-генератора на диоде Ганна от величины однородного магнитного поля – (а) поле, нормальное к ферритовой подложке; (б) поле, касательное к ферритовой подложке.

2. Принципы компьютерного моделирования и экспериментальные исследования МПЛ-генераторов на основе СВЧ-диодов.

Компьютерное исследование влияния однородных и локальных магнитных полей на распространение ЭМВ в МПЛ на ферритовой подложке проводилось путем конструирования аналогичной модели генератора в электронном формате и сравнения параметров с реальной установкой посредством пакета программ машинного моделирования СВЧ устройств MicrowaveOffice в заданной полосе частот. Так как данный пакет не поддерживает работу с магнитными полями, то вместо магнитной системы возбуждения используется соответствующий эквивалент в виде колебательной системы, показанный на рис. 2. Параметры L и C являются

динамическими, т.к. изменение магнитного поля системы приводит к изменению резонансных свойств системы.

В реальной установке сигнал от генератора качающейся частоты распространяется в МПЛ и частично отражается от плоскости ее поперечного сечения, в которую внесено магнитное поле. Выделенная направленным детектором отраженная ЭМВ сравнивается по амплитуде с падающей. Измеренный КСВ служит характеристикой коэффициента отражения от плоскости приложения магнитного поля, т.е. величины неоднородности, внесенной магнитным полем в МПЛ. При расположении над МПЛ двух магнитных систем друг за другом характеристика зависимости КСВ от частоты будет иметь ряд минимумов на частотах, соответствующих резонансному поглощению мощности в резонаторе. Таким образом, по характеристике зависимости КСВ от частоты можно определить резонансные частоты системы.

Перед непосредственным исследованием влияния внешних магнитных полей на прохождение ЭМВ в МПЛ с ферритовой подложкой были проведены вспомогательные работы:

– подбор ширины полоскового проводника МПЛ на соответствие волновому сопротивлению 50 Ом. Методика подбора заключается в сравнении уровней КСВ в заданной полосе частот при различных значениях ширины полоскового проводника

МПЛ, нагруженной на 50-омное сопротивление. В результате оптимальное согласование получено для МПЛ с полосковым проводником шириной 0,6

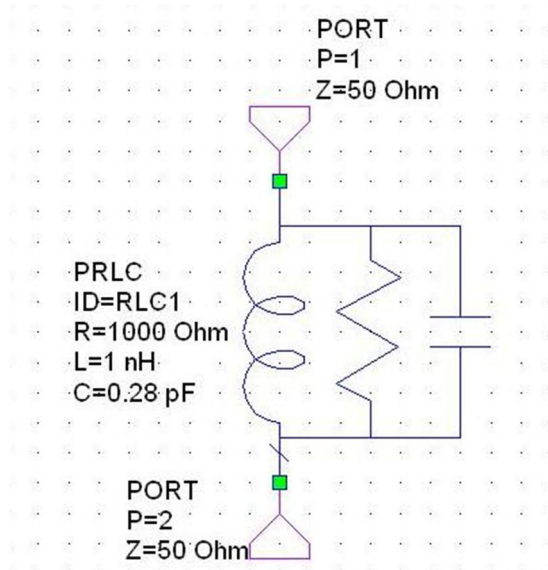


Рис.2 Колебательный контур (эквивалент магнитной системы) в MicrovaweOffice

мм (для подложки толщиной 1 мм из поликристаллического высокочистого феррита ЖИГ);

– измерение напряженности магнитного поля, создаваемого полюсными коническими наконечниками с различным числом дисковых самарий-кобальтовых магнитов (диаметром 0,8 см и длиной 1,5 см), расположенных на различных расстояниях от наконечников.

Рассмотрим эксперименты с макетами СВЧ-генераторов на МПЛ с магнитным управлением параметрами генерации. Исследовались МПЛ-генераторы на подложке из поликристаллического высокоочищенного феррита. Резонансные системы включают в себя резонатор, ограниченный с одной стороны разомкнутым концом МПЛ с низким волновым сопротивлением, с другой – неоднородностью в виде отверстия в МПЛ для включения активного элемента и трансформатора волновых сопротивлений на 50-Омную выходную линию в виде плавного перехода. В качестве активных элементов используется лавинно-пролетный диод (ЛПД тип АА707В) и диод Ганна (тип АА715D). В 3-сантиметровом диапазоне эти элементы имеют максимальную выходную мощность при высоких эксплуатационных параметрах.

Исследуемый генератор подключается согласно блок-схеме (рис. 3).

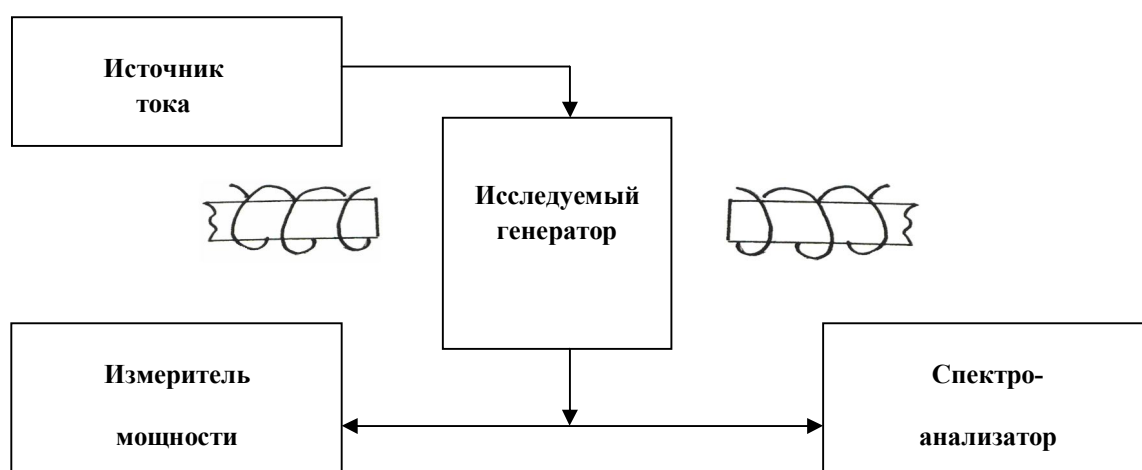


Рис. 3. Блок-схема установки для динамических измерений параметров МПЛ-генератора.

Напряжение смещения от источника питания подается непосредственно на активный элемент генератора (анод-катод диода). При этом разрыв цепи по постоянному току с выходом генератора осуществляется емкостным разрывом проводника МПЛ в месте подключения коаксиально-микроразветвляющегося перехода. Генерируемые колебания передаются через микроразветвляющийся-коаксиальный переход и коаксиальный тройник на измеритель мощности (ЕРМ-РЕ4416А) и анализатор спектра (PSAE4446А). Для исследований перестройки частоты МПЛ-генератора путем изменения эффективных размеров резонансной системы МПЛ-генератор помещается в поле электромагнита.

Спроектированный макет управляемого МПЛ-генератора показан на рис.4.

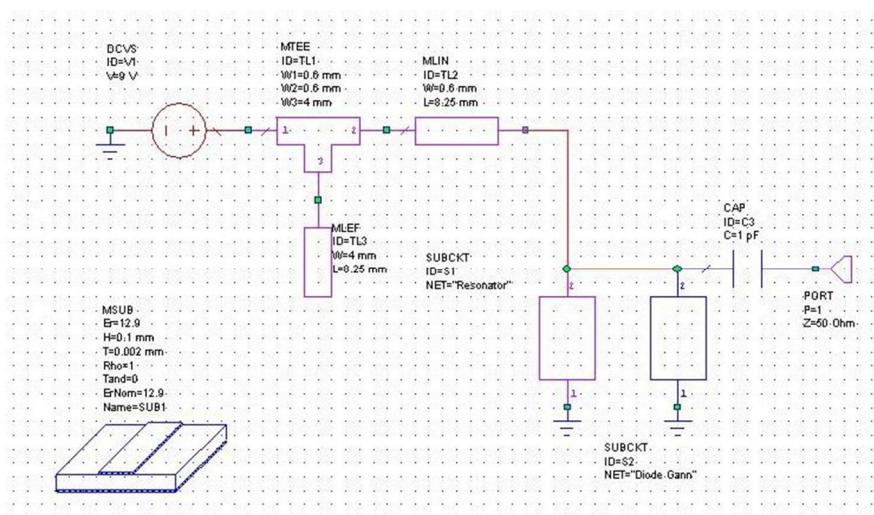


Рис.4. Макет электрической схемы МПЛ-генератора с использованием диода Ганна в качестве активного элемента

В соответствии с описанным выше методом были измерены параметры генераторов на МПЛ с ферритовым заполнением с одним активным элементом (диодом Ганна или ЛПД).

Следует отметить, что расчет генераторов на диодах Ганна затруднен приблизительным характером данных как о параметрах эквивалентной схемы диода, так и о параметрах эквивалентной схемы колебательной системы, а также узла крепления диода (особенно на высоких частотах). Поэтому для практического исследования генератора в среде Microwaveoffice в качестве

активного элемента (диода Ганна) применяется набор параметров диода в виде файла данных и включенных в подсхему под названием "DiodeGann".

Заключение.

Компьютерное моделирование экспериментальных исследований МПЛ-генераторов на основе СВЧ-диодов проводилось с помощью пакета программ машинного проектирования СВЧ-устройств MicrowaveOffice. Эксперименты, проведенные с изготовленными образцами, позволили изучить динамические свойства СВЧ-генераторов, состоящих из МПЛ и активного элемента. Взаимодействие этих элементов осуществлялось посредством ферромагнитной подложки, свойства которой изменялись за счет воздействия магнитного поля. Спектральные характеристики и выходная мощность МПЛ-генераторов зависели от диэлектрической и магнитной проницаемостей.

В данной работе было проанализировано влияние магнитного поля на параметры МПЛ-генератора и создан электронный макет установки. Сравнение работы реального генератора с результатами полученными с помощью электронного макета установки, спроектированного с помощью пакета MicrowaveOffice, показало, что проектирование СВЧ МПЛ-генераторов является серьезной проблемой и требует либо создания нового программного продукта, либо использования всяческих ухищрений в стандартном пакете, хотя соответствие полученных результатов с экспериментом наблюдается.

Список использованной литературы.

1. К. Гупта. Машинное проектирование СВЧ устройств. 1997
2. Г.И. Веселов, Е.Н. Егоров. Микроэлектронные устройства СВЧ. 1988
3. Е.Е. Дмитриев. Основы моделирования в MicrowaveOffice 2014 (на примерах).
4. Разевиг В.Д. и др. Проектирование СВЧ устройств с помощью MicrowaveOffice. 2013.
5. Щука А. А. Электроника. Учебное пособие / Под ред. проф. А. С. Сигова, СПб.: БХВ-Петербург, 2011, с.800.
6. G. O. Young, Synthetic structure of industrial plastics (Book style with paper title and editor),” in *Plastics*, 2nd ed. vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64.
7. J. D. Adam, L.E. Davis, G.F. Dionne, E.F. Schloemann, and S.N. Stitzer, Ferrite devices and materials,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp.721-737, Mar. 2002.
8. Веселов Г.И. и др. Микроэлектронные устройства СВЧ, М: Высшая школа, 1988, с.280.
9. Егунов М. С., Воторопин С. Д. ОАО «НИИПП», г. Томск, Россия. Перестраиваемый генератор на диоде Ганна 5-мм диапазона. 2010.