

DOI: 10.17725/rensit.2022.14.351

Возбуждение электромагнитных волн круговой поляризации полосковыми линиями передачи

¹Полозов Д.В., ^{1,2}Габриелян Д.А., ^{1,2}Сафин А.Р., ^{2,3}Калябин Д.В

¹Московский энергетический институт, <https://mpei.ru/>

Москва 111250, Российская Федерация

²Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>

Москва 125009, Российская Федерация

³Московский физико-технический институт, <https://mipt.ru/>

г. Долгопрудный 141701, Московская область, Российская Федерация

E-mail: dmitry_polozov@mail.ru, davidgabrielyan1997@gmail.com, arsafin@gmail.com, dmitry.kalyabin@phystech.edu

Поступила 21.11.2022, рецензирована 28.11.2022, принята 05.12.2022

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Аннотация. Исследуется схема возбуждения электромагнитного поля с круговой поляризацией за счет скрещенных полосковых линий передачи. Проведено сравнение двух вариантов: копланарной и микрополосковой линий передачи, возбуждающих круговую поляризацию магнитного поля в пространстве над пересечением полосковых структур. Степень эллиптичности поля на пересечении полосковых структур может меняться с помощью изменения фазового рассогласования между возбуждающими источниками колебаний. Моделирование данных устройств в системе автоматизированного проектирования позволило количественно определить амплитуды компонентов электромагнитного поля, по которым был рассчитан коэффициент эллиптичности при различных значениях частоты и фазы. Полученные результаты позволяют определить условия, необходимые для реализации круговой поляризации магнитного поля. Исследуемые структуры планируется использовать в интегральном исполнении для возбуждения колебаний круговой поляризации в магнитных микро- и наноструктурах.

Ключевые слова: круговая поляризация, полосковая линия передачи, коэффициент эллиптичности, магнетизм, ферромагнитный резонанс

УДК 621.37

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FFWZ-2022-0015).

Для цитирования: Полозов Д.В., Габриелян Д.А., Сафин А.Р., Калябин Д.В. Возбуждение электромагнитных волн круговой поляризации полосковыми линиями передачи. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2022, 14(4):351-358. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.351.

Excitation of Circularly Polarized Electromagnetic Waves Based on Striped Transmission Lines

Dmitry V. Polozov

Moscow Power Engineering Institute, <https://mpei.ru/>

Moscow 111250, Russian Federation

E-mail: dmitry_polozov@mail.ru

David A. Gabrielyan, Ansar R. Safin, Dmitry V. Kalyabin

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>

Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: davidgabrielyan1997@gmail.com, arsafin@gmail.com, dmitry.kalyabin@phystech.edu

Received 18 November 2022, peer-reviewed 25 November 2022, accepted 02 December 2022

Abstract: The article investigates the scheme of excitation of an electromagnetic field with circular polarization due to crossed strip transmission lines. Two variants are compared: coplanar and microstrip transmission lines that excite circular polarization of the magnetic field in the space above the intersection of strip structures. The degree of ellipticity of the field at the intersection of strip structures can be changed by changing the phase mismatch between exciting oscillation sources. Modeling of these devices in the computer-aided design system made it possible to quantify the amplitudes of the components of the electromagnetic field, from which the ellipticity coefficient was calculated at different values of frequency and phase. The obtained results allow us to determine the conditions necessary for the realization of circular polarization of the magnetic field. The studied structures are planned to be used in an integral design to excite circular polarization oscillations in magnetic micro- and nanostructures.

Keywords: circular polarization, strip transmission line, ellipticity coefficient, magnetism, ferromagnetic resonance

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FFWZ-2022-0015).

For citation: Dmitry V. Polozov, David A. Gabrielyan, Ansar R. Safin, Dmitry V. Kalyabin. Excitation of circularly polarized electromagnetic waves based on striped transmission lines. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2022, 14(4):351-358e. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.351.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (352)
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ СКРЕЩЕННОЙ КОПЛАНАРНОЙ ЛП (353)
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ СКРЕЩЕННОЙ КОПЛАНАРНОЙ ЛП С ЗАЗЕМЛЕНИЕМ (355)
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ЛП ТИПА МЕАНДР (356)
5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ (357)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (357)

ЛИТЕРАТУРА (357)

1. ВВЕДЕНИЕ

Возбуждение электромагнитных волн (ЭМВ) с контролируемой поляризацией магнитного поля является важной задачей в области магнетизма. Изменение поляризации ЭМВ дает более широкую возможность возбуждения собственных частот различных резонаторов. Возбуждение линейно поляризованного излучения представляет собой стандартную задачу прикладной электродинамики, тогда как возбуждение ЭМВ с круговой или, более широко, эллиптической поляризацией представляет

собой заметные трудности. Простейшим способом возбуждения ЭМВ круговой поляризации является использование объемных волноводов и резонаторов [1-8]. Вместе с тем имеется необходимость реализации круговой или эллиптической поляризации ЭМВ в интегральном исполнении с помощью полосковых линий передачи в диапазоне СВЧ.

В данной работе исследуется схема возбуждения ЭМВ с круговой поляризацией за счет скрещенных полосковых линий передачи [9]. Нас будет интересовать реализация круговой поляризации магнитной компоненты ЭМВ, что объясняется необходимостью возбуждения различных мод колебаний магнитных материалов: ферро-, ферри- и антиферромагнетиков в диапазоне СВЧ, вплоть до субтерагерцевого диапазона (на частотах до 100 ГГц). Проведено сравнение двух вариантов: копланарной и микрополосковой линий передачи, возбуждающих круговую поляризацию магнитного поля в пространстве над пересечением полосковых структур. Степень эллиптичности поля

на пересечении полосковых структур может меняться с помощью изменения фазового рассогласования между возбуждающими источниками колебаний. Моделирование данных устройств в системе автоматизированного проектирования позволило количественно определить амплитуды компонентов электромагнитного поля, по которым был рассчитан коэффициент эллиптичности при различных значениях частоты и фазы. Полученные результаты позволяют определить условия, необходимые для реализации круговой поляризации магнитного поля. Исследуемые структуры планируется использовать в интегральном исполнении для возбуждения колебаний круговой поляризации в магнитных микро- и наноструктурах.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ СКРЕЩЕННОЙ КОПЛАНАРНОЙ ЛП

Для возбуждения ЭМВ с круговой поляризацией магнитного поля можно использовать две копланарные линии передачи (ЛП) с заземлением и разместить их перпендикулярно друг другу таким образом, чтобы на перекрестии происходило сложение электромагнитных колебаний (см. **Рис. 1**). Результатом сложения двух волн будет являться волна, поляризация которой зависит от пространственной и временной конфигураций складывающихся волн. Чтобы добиться круговой поляризации магнитного поля необходимо соблюдать условие

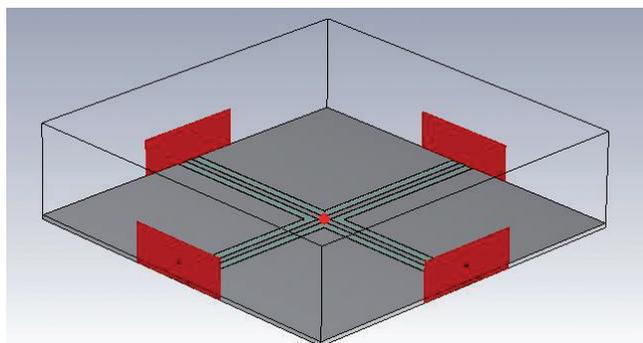


Рис. 1. Модель скрещенной копланарной ЛП.

пространственной и временной квадратуры при возбуждении ЭМВ с помощью двух скрещенных ЛП [7,8]. Результатом моделирования данной линии передачи является зависимость изменения параметров, характеризующих поляризацию ЭМВ на пересечении линий передачи от изменения частоты и фазы. На Рис.1 представлена ЛП, имеющая четыре порта. При этом два соседних входа возбуждают колебания в линии передач. Сигналы, наводящиеся от этих портов, будут отличными на заданную в моделировании величину начальной фазы.

Исследуемый ферритовый материал размещается в точке максимума круговой поляризации магнитного поля. Для этого необходимо провести исследования электрической и магнитной компонент полей в точке пересечения двух копланарных ЛП, так как именно на пересечении будет происходить сложение векторов и возникновение круговой поляризации. Исследуемый магнитный материал имеет высоту 3 мм, поэтому измерение поля проводится в трех точках, на поверхности ЛП $H = 0$ мм и на высотах $H = 1.5$ мм и $H = 3$ мм.

Для количественной оценки поляризации магнитного поля будем использовать коэффициент эллиптичности, который рассчитывается по формуле [6]

$$k = \frac{|H_r| - |H_l|}{|H_r| + |H_l|}, \quad (1)$$

где квадратурные компоненты полей

$$H_r = \frac{1}{\sqrt{2}}(H_x + jH_y),$$

$$H_l = \frac{1}{\sqrt{2}}(H_x - jH_y),$$

где $H_{x,y}$ – компоненты магнитного поля.

Коэффициент эллиптичности может принимать значения от -1 до 1 , где $k = 0$ – линейная поляризация, а $k = 1$ ($k = -1$) – правая (левая) круговая поляризация. Ниже приведены полученные численно

Таблица 1

Численные данные компонентов магнитного поля на частоте 20 ГГц с разностью фаз 90° .

H, мм \ H, А/м	ReH _x	ImH _x	ReH _y	ImH _y	k
0	17.5	27	-25.5	18	-0.95
1.5	1.1	1.9	-1.9	1.2	-0.96
3	0.14	0.45	-0.42	0.17	-0.91

данные компонентов векторов магнитного поля, а также рассчитанные значения коэффициентов эллиптичности.

Полученные результаты из **Таблицы 1** показывают, что в каждой из трех рассчитанных точек реализуется эллиптическая поляризация с коэффициентом эллиптичности $k = -0.94$ (среднее значение), что является близким к круговой поляризации значением. Суммарный вектор магнитного поля будет максимальным на поверхности копланарной ЛП и будет убывать при удалении, поэтому минимальное значение поля будет на высоте 3 мм.

Для анализа амплитуды магнитного поля определим ее зависимость от высоты над структурой копланарной ЛП.

На **Рис. 2**, видно, что максимальное значения поля ограничено значением $H = 40$

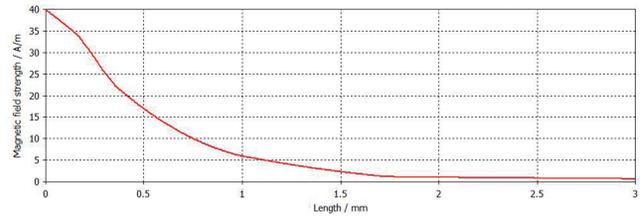
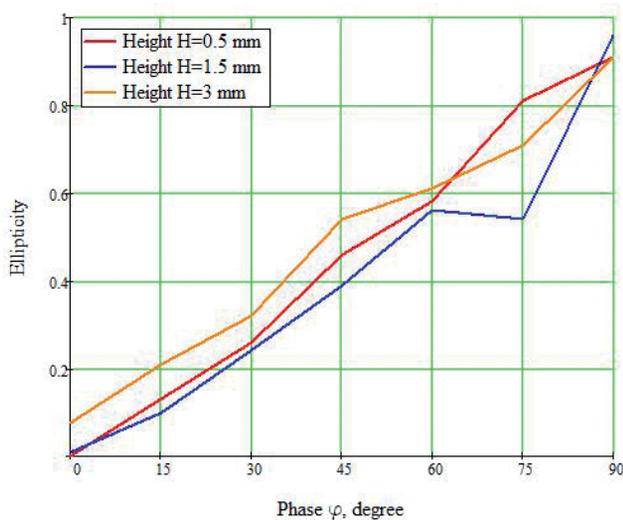
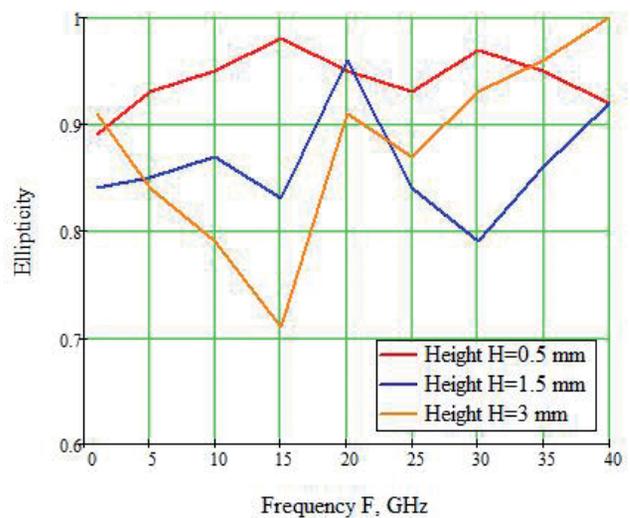


Рис. 2. Зависимость амплитуды H -поля от расстояния на частоте 20 ГГц для модели скрещенной копланарной ЛП.

40 А/м. Поле ЭМВ, распространяющихся перпендикулярно ЛП, убывает. Поле ЭМВ стремится к нулю при распространении вдоль ЛП. На высоте 3 мм поле имеет значение $H = 1$ А/м. На **Рис. 3а** построена зависимость коэффициента эллиптичности от разности фаз возбуждаемых ЭМВ. Видно, что с приближением к разности фаз возбуждаемых колебаний в 90 градусов коэффициент эллиптичности приближается к 1 при различной высоте над структурой. На **Рис. 3б** построена зависимость коэффициента эллиптичности от частоты (от 0 до 40 ГГц). Видно, что для различных значений высоты над структурой есть оптимальное значение, которое соответствует максимуму коэффициента эллиптичности. Вместе с тем с увеличением расстояния над структурой коэффициент эллиптичности падает.



а



б

Рис. 3. Зависимость коэффициента эллиптичности (K) от разности фаз (а) возбуждаемых ЭМВ и от частоты (б) на разной высоте от структуры скрещенных линий передачи.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ СКРЕЩЕННОЙ КОПЛАНАРНОЙ ЛП С ЗАЗЕМЛЕНИЕМ

В качестве второго примера скрещенных полосковых линий передачи для возбуждения ЭМВ с круговой поляризацией рассмотрим широкополосную ЛП, состоящую из двух копланарных ЛП, пересеченных под прямым углом, с коротким замыканием на конце. Аналогичную по назначению конструкцию можно реализовать, не прибегая к двум различным источникам ЭМВ с разностью фаз в 90 градусов, но тогда необходимо соблюдать разницу в расстояниях до перекрестия, чтобы электромагнитная волна, доходя до центра, имела фазовую задержку относительно второй в 90 градусов. Для идеализации и моделирования ЛП с коротким замыканием (КЗ), использовалась модель, в которой разность фаз задается в источниках питания.

В [7] представлены размеры аналогичного устройства, но данная конструкция трудно-реализуема на практике, так как требуется высокотехнологичное производство. А именно, ширину металлического проводника в 10 (мкм) и зазор около 5 (мкм) сложно реализовать, в виду меньшей точности лазера. Как следствие, уже на этапе производства модель не будет соответствовать заявленным характеристикам. Поэтому за основу была взята модель ЛП с отличной геометрией. Также данный тип ЛП легко реализуем на практике, так как имеет размеры, часто используемые в диапазоне СВЧ. В связи с этим реальное устройство будет иметь близкие характеристики по сравнению с устройством, рассчитанным в системах автоматического проектирования (САПР).

Промоделируем данную конструкцию при помощи инструментов САПР (Рис. 4).

На Рис. 5 приведена зависимость амплитуды магнитного поля от высоты над структурой копланарной ЛП, а также в

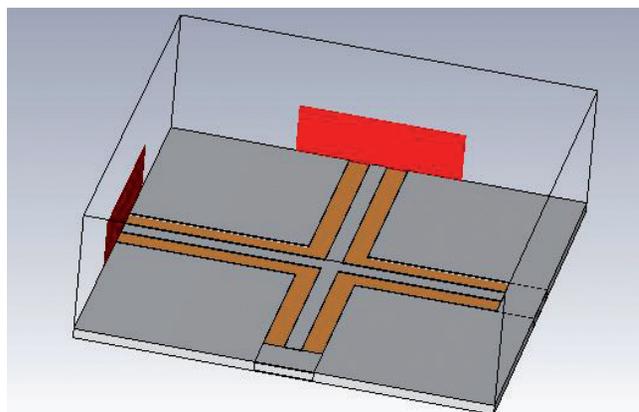


Рис. 4. Модель скрещенной копланарной ЛП с КЗ.

Таблице 2 приведены расчетные значения амплитуды компонентов магнитного поля в трех точках.

При сравнении графиков распространения магнитного поля в двух копланарных ЛП, а именно Рис. 2 и Рис. 5 следует, что скрещенная копланарная ЛП с КЗ обладает более высоким значением возбуждения круговой поляризации магнитного поля. Значения поля на поверхности линии передач в 1.5 раза больше, чем у модели без КЗ на Рис. 2. Амплитуда поля убывает по такому же закону, следовательно, и на расстоянии 3 мм значение амплитуды выше, и как следствие, большее возбуждение магнитного материала.

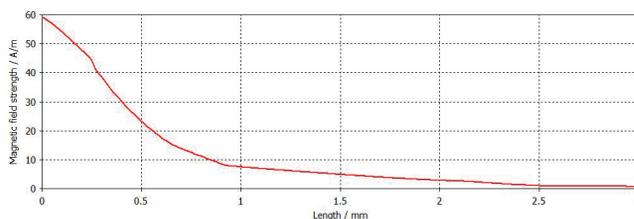


Рис. 5. Зависимость амплитуды H -поля от расстояния на частоте 20 ГГц для модели, скрещенной копланарной ЛП с КЗ.

Таблица 2

Численные данные компонентов магнитного поля на частоте 20 ГГц.

H , А/м	ReH_x	ImH_x	ReH_y	ImH_y	k
H , мм					
0	-13.7	-55.2	40	11.2	-0.53
1.5	-1.31	-4.03	3.05	0.96	-0.48
3	0.15	-0.6	0.38	0.3	-0.61

Согласно расчетным амплитудам компонентов магнитного поля, коэффициент эллиптичности равный единице не был получен, в среднем он равен -0.54. Это говорит о том, что значения ЛП не оптимизированы. Несмотря на это, по зависимостям амплитуды поля от длины Рис. 2, 5 видно, что для короткозамкнутой линии передач можно получить характеристики эллиптичности лучше, чем в линии передач с 4 портами, а следовательно наблюдается более эффективное возбуждение.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ЛП ТИПА МЕАНДР

Ниже представлены результаты моделирования еще одного вида ЛП, который возбуждает круговую поляризацию магнитного поля. Структура представляет собой микрополосковую ЛП, в которой полоски расположены в форме меандра, где также происходит сложение двух волн, в результате которого реализуется круговая поляризация [11]. В отличие от предыдущих видов, данная ЛП имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что она работает только на определенной частоте, то есть является узкополосным, тогда как рассмотренные выше ЛП являются

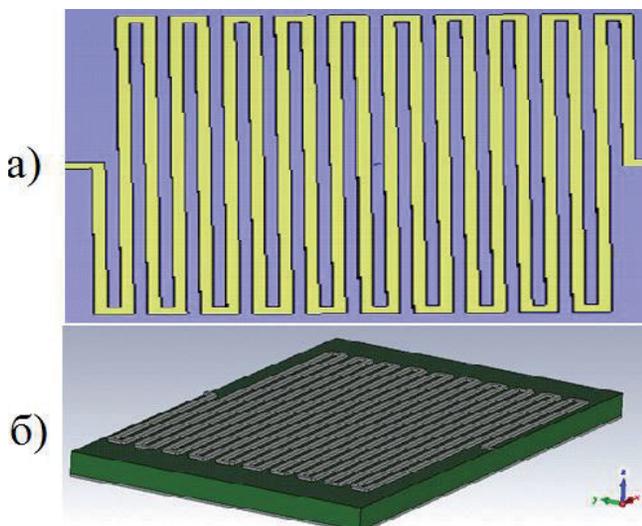


Рис. 6. Модель микрополосковой ЛП вида меандр: а) вид сверху, б) вид сбоку.

Таблица 3

Численные данные компонентов магнитного поля на частоте 20 ГГц.

H, A/m \ H, мм	ReH _x	ImH _x	ReH _y	ImH _y	k
0	18	6	-8	-15	0.4
1.5	-2.5	-1.4	1.1	3.4	0.38
3	-0.07	-0.12	-0.19	-0.06	0.35

широкополосными [4]. Достоинством данной ЛП по сравнению с рассмотренными выше является возможность реализации круговой поляризации ЭМВ в плоскости перпендикулярной плоскости структуры, тогда как ЛП, рассмотренные в предыдущем разделе, реализуют круговую поляризацию поля в плоскости образца. Геометрия структуры представлена на Рис. 6. Вывод амплитуды векторов магнитного поля в трех точках и расчет коэффициента эллиптичности выполнен по формуле (1) и представлен в Таблице 3.

Согласно результатам расчета видно, что в ЛП эллиптическая поляризация магнитного поля. На Рис. 7 представлена зависимость амплитуды вектора H-поля от высоты над структурой ЛП по аналогии с Рис. 2, 5.

Данная ЛП имеет высокую амплитуду на поверхности полоска, но так как круговая поляризация образуется только между линиями, то данная поляризация только в некоторых точках будет круговой, что существенно ограничивает использование данной структуры для возбуждения ЭМВ в магнитных материалах. Также остается

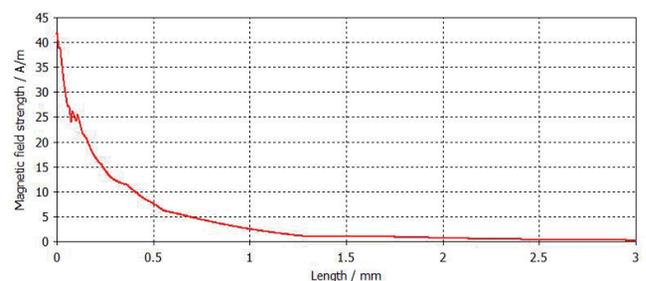


Рис. 7. Зависимость амплитуды H-поля от длины на частоте 20 ГГц для модели микрополосковой ЛП типа меандр.

проблема сложности реализации на практике, так как для получения высоких характеристик амплитуды магнитного поля требуется уменьшать размеры как платы, так и ширины полоска, при размерах 0.01 мм будет большая погрешность при производстве, и как следствие, ухудшение характеристик получения круговой поляризации.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализируя **Таблицу 4**, приходим к выводу, что скрещенная копланарная ЛП является наилучшим вариантом для возбуждения магнитных материалов в широком диапазоне частот. Хотя у данного устройства амплитуда магнитного поля на поверхности полоска и не является максимальной, но при условии, что ЭМВ с круговой поляризацией эффективней возбуждает магнитный материал, можно пренебречь амплитудой в пользу коэффициента эллиптичности, так как данный вид ЛП возбуждает поляризацию магнитного поля с коэффициентом эллиптичности $|k| \approx 1$.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в данной работе моделирование в САПР позволило оценить численно возможность проектирования полосковых структур, возбуждающих ЭМВ с круговой поляризацией. Было выяснено, что для эффективного возбуждения магнитных материалов требуется обеспечить круговую

поляризацию магнитного поля в пространстве расположения данного материала. Поэтому были исследованы ЛП с различной структурой. По результатам численного моделирования можно заключить, что наилучшим вариантом для возбуждения ферритовых материалов, в пространстве расположения данного материала, в интегральном исполнении будет скрещенная копланарная ЛП с нагруженными выходами. В данной конфигурации реализуется круговая поляризация магнитной компоненты ЭМВ, с коэффициентом эллиптичности практически равным 1. Можно отметить, что данный вид ЛП легко реализуем на практике, что является его большим преимуществом. В настоящее время при построении интегральных СВЧ схем стараются минимизировать размеры основных компонентов. Проанализировав частотные и фазовые зависимости для различных ЛП, можно сделать вывод, что имеется возможность управления коэффициентом эллиптичности, изменяя разность фаз источников колебаний. Отметим, что значения коэффициентов эллиптичности при различных соотношениях между фазами возбуждаемых колебаний будут постоянными и не изменяться от частоты в данной структуре ЛП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коломейцев ВА, Ковряков ПВ, Семенов АЭ, Дрогайцева ОВ. Возбуждение электромагнитного поля в прямоугольном резонаторе, частично заполненном диэлектрическим материалом. *Вестник Саратовского гос. техн. ун-та*, 2014, 1(77):47-54.
2. Nelson CE. Circularly Polarized Microwave Cavity Filters. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1957, 5(2):136-147.
3. Dionne GF, Oates DE, Temme DH, Weiss JA. Superconductivity for Improved Microwave

Таблица 4

Сравнение характеристик ЛП.

Параметр	Коеф-т эллиптичности (k)	Диапазон частот (ГГц)	Ампл. магн. поля Н на пов-сти линии (А/м)	Реализуемость
Скрещенная копланарная ЛП	-1	1-40	40	хорошая
Скрещенная копланарная ЛП с КЗ	-0.54	1-40	59	хорошая
ЛП типа меандр	-0.38	20	42	плохая

- Ferrite Devices. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1996, 9(1):19-32.
4. Mohebbi HR, Majedi AH. CAD model for circuit parameters of superconducting-based hybrid planar transmission lines. *Superconductor Science and Technology*, 2009, 22(1):12.
 5. Сазонов ДМ. *Антенны и устройства СВЧ*. Москва, Высшая школа, 1988, 432 с.
 6. Коган Б.Л. *Поляризаационные характеристики антенн*. Москва, МЭИ, 2013, 42 с.
 7. Kan I, Soeno Y, Roppongi T, Nozaki Y. Circularly polarized magnetic field generated by two microfabricated crossed coplanar waveguides. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(20).
 8. Broeder FJ, Janssen E, Hoving W, Zeper WB. Perpendicular magnetic anisotropy and coercivity of Co/Ni multilayers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1992, 28(5):2760-2765.
 9. Dionne GF, Oates DE, Temme DH. YBCO/ferrite low-loss microwave phase shifter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1995, 5(2):2083-2086.
 10. Lax B, Button KJ. Microwave ferrites and ferrimagnetics. *Solid State Electronics*, 1963, 6(4):392-393.
 11. Lax B. Frequency and Loss Characteristics of Microwave Ferrite Devices. *Proceedings of the IRE*, 1956, 44(10):1368-1386.

Полозов Дмитрий Валерьевич

студент

Московский энергетический институт
14, ул. Красноказарменная, Москва 11250, Россия

E-mail: dmitry_polozov@mail.ru

Габриелян Давид Ашотович

аспирант

Московский энергетический институт
14, ул. Красноказарменная, Москва 11250, Россия

E-mail: davidgabrielyan1997@gmail.com

Сафин Ансар Ризаевич

к.т.н., доцент

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия

E-mail: arsafin@gmail.com

Калябин Дмитрий Владимирович

к.ф.-м.н.

ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН
11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия

E-mail: dmitry.kalyabin@phystech.edu.