

Раздел I. Электроника и радиотехника

УДК 004.272.44:004.382+535.2

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-6-16

**А.Г. Быков, И.В. Ошкин, В.Б. Профе, С.А. Степаненко, К.В. Троцюк,
Е.В. Тяпков**

МИКРОВОЛНОВЫЕ МАКЕТЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Интерференционные логические элементы (ИЛЭ) являются неотъемлемой частью вычислительных машин в современном мире. Одной из важнейших задач разработчиков современной вычислительной техники, является уменьшение длительности выполнения логических операций, обеспечивая тем самым быстрдействие различных вычислительных комплексов, применяемых, например, при моделировании крупных объектов с большим количеством деталей в различных отраслях промышленности, а также при обработке большого объема информации. Возможный путь решения данной задачи состоит в использовании ИЛЭ, основанных на элементной базе оптического диапазона длин волн. Цель, для которой разрабатываются данные макеты микроволновых ИЛЭ, состоит в реализации функций ИЛЭ на базе микрополосковой линии в сверхвысокочастотном диапазоне частот (СВЧ). В работе представлены результаты моделирования, разработки конструкции, изготовления и испытаний макетов микроволновых интерференционных логических элементов, образующих полный функциональный базис. Модель микроволнового макета ИЛЭ, реализующего функции «И», «исключающее ИЛИ» и «НЕ», состоит из 4 типов функциональных узлов СВЧ: циркуляторов, одноступенчатых кольцевых сумматоров мощности, двухшлейфового направленного ответвителя и элементов отбора мощности, представляющие собой направленные ответвители с боковой связью, с заданным коэффициентом ответвления. Для подтверждения принципа действия ИЛЭ и их реализуемости использовано численное моделирование системы методом конечного интегрирования во временной области. Макеты ИЛЭ реализуют функции «И», «исключающее ИЛИ» и «НЕ». Соблюдается идентичность значений интенсивности, соответствующих логическим «0» и «1», вырабатываемых различными элементами. Длительность выполнения логических операций определяется длительностью распространения импульса в волноводе. Применение в схеме построения ИЛЭ реактивных элементов позволяет минимизировать потери СВЧ-энергии при распространении электромагнитного импульса.

Микроволновые интерференционные логические элементы; интерференционный логический элемент «И»; интерференционный логический элемент «исключающее ИЛИ»; интерференционный логический элемент «НЕ».

A.G. Bykov, I.V. Oshkin, V.B. Profe, S.A. Stepanenko, C.V. Trotsuk, E.V. Tjapkov

MICROWAVE MODELS OF INTERFERENCE LOGIC ELEMENTS

In the modern world interference logic gates (ILG) are an integral part of computers in the modern world. One of the most important tasks of developers of new computing technology is to reduce the duration of logical operations. This ensures the performance of various computing systems used in large objects modeling with a large number of details in various industries and in processing a large amount of information. A possible way to solve this problem is to use ILGs based on the element base of the optical wavelength range. These models microwave ILG are being developed for implement the functions of ILG based on a microstrip line in the ultra-high frequency (UHF). The paper presents the result of modeling, engineering, manufacturing and testing

models of microwave ILG which form a complete functional basis. A numerical simulation microwave model ILG, which implements the functions "AND", "XOR" and "NOT", has been carried out. The model consists of four types microwave functional units: circulators, single-stage ring power adder and power take-off elements, which are directional couplers, with lateral coupling and with a given branch coefficient. The finite integration method in the time domain for numerical system modelling is used to confirm the operational principle of ILGs and their realizability. ILG mock-ups implement the functions "AND", "XOR" and "NOT". The identity of the intensity values corresponding to the logical "0" and "1", generated by different elements, is observed. The execution duration of logical operations is determined by the duration of the pulse propagation in the waveguide. The use of reactive elements in the design of the ILG makes it possible to minimize the loss of microwave energy during the propagation of an electromagnetic pulse.

Microwave interference logic gates; interference logic gates "AND"; interference logic gates "XOR"; interference logic gates "NOT".

Введение. Параметры современной электронной элементной базы приблизились к физическому пределу технологии. Поэтому актуальны разработки логических элементов на новых физических принципах, в частности, интерференционных логических элементов (ИЛЭ), задействующих эффекты взаимодействия когерентных световых волн. Разработке ИЛЭ посвящено много работ, они рассматриваются в качестве перспективного варианта, позволяющего повысить производительность и энергоэффективность вычислительных машин и других цифровых устройств [1].

Например, известны ИЛЭ, содержащие два волновода на входе и один на выходе [2]. Реализация различных функций достигается посредством создания разницы в длинах волноводов, по которым поступают входные сигналы. Выходной волновод представляет собой резонатор, в котором осуществляется интерференция входных сигналов, передаваемых из входных волноводов в выходной посредством электромагнитного взаимодействия, возникающего в результате определенного расположения волноводов. Недостатком данного ИЛЭ является необходимость использования порогового ограничителя для подавления мощности логического «0» до физического нуля и порогового оптического усилителя, восстанавливающего мощность логической «1» до единичного физического уровня [2, стр. 180]. В обоих случаях задействуются нелинейные эффекты, требующие большей длительности и больших энергетических затрат по сравнению с электронными аналогами.

Известны ИЛЭ на основе плазмонных поларитонов на графеновой поверхности [3]. В логических элементах задействуются четыре входных канала. В зависимости от реализуемой логической функции определенные два из четырех назначаются информационными, а остальные используются для управления. Сигнал на выходном канале получается в результате интерференции входных сигналов, при этом длины входных волноводов изменяются в соответствии с реализуемой логической операцией. К недостаткам этого варианта ИЛЭ относятся необходимость применения низкой температуры около 3° К [3, стр. 186], требуемой для работы элементов на основе графена, а также значительная длительность их релаксации – более $1,5 \cdot 10^{-12}$ с [3, стр. 186].

Известны ИЛЭ на основе интерференционного взаимодействия в метаматериалах [4]. Используются когерентные сигналы, проходящие по пяти каналам с одного входа и по пяти каналам с другого входа. В результате их столкновения образуется стоячая волна. Помещая пластину метаматериала в пучности или в узлы стоячей волны, изменяют интенсивность выходного сигнала и реализуемую элементом логическую функцию. Недостатком данного конструктивного исполнения является отсутствие однозначного соответствия значений интенсивности выходного сигнала значениям логических констант. Например, [4, табл. II] значение выходной интенсивности $0,25I$, где I – значение входной интенсивности, соответ-

ствует логической «1» в элементах, реализующих функции «исключающее ИЛИ» и «ИЛИ». Это же значение выходной интенсивности соответствует логическому «0» в элементе «И» [4, табл. II]. Вследствие этого синтез цифровых устройств из данных ОЛЭ невозможен.

Известны ОЛЭ на основе двумерных фотонных кристаллов [5]. Логический элемент содержит оптический волновод, выполненный на основе фотонного кристалла (ФК), имеющий три входа, расположенных с одной стороны волновода, и один выход. Три светоделиителя образованы в ФК равномерно расположенными вдоль заданного направления в кристалле линейными дефектами в виде воздушных стержней. Один из светоделиителей обеспечивает полное отражение, а два других отражают свет частично. Эффекты интерференции и самоколлимации задействованы для управления выходными сигналами. Оно осуществляется настройкой разности фаз сигнальных волн для достижения конструктивной или деструктивной интерференции. Радиус стержней дефекта меняется в зависимости от того, какие функции должен выполнять логический элемент. Эти элементы имеют технологический недостаток-разница в размерах ИЛЭ, реализующих различные функции, составляет лишь 0,4 нм.

В данной работе предлагается структура для реализации ИЛЭ, представленных в [6]. В ней применены функциональные СВЧ узлы (ответвители, сумматоры, циркуляторы) [7–20], которые могут быть разработаны и для оптического диапазона частот. Представлены результаты моделирования и разработки конструкции микроволновых макетов логических элементов, образующих полный функциональный базис. Для подтверждения принципа действия ИЛЭ и их реализуемости использовано численное моделирование системы методом конечного интегрирования во временной области [21]. Показано, что соблюдается идентичность значений интенсивности, соответствующих логическим переменным «0» и «1», вырабатываемых различными элементами.

Описание микроволнового макета ИЛЭ. Структурной основой логического элемента является волноведущая линия на основе несимметричной микрополосковой линии передачи энергии с рабочим диапазоном частот 2,4–2,5 ГГц. Диэлектрическая проницаемость материала подложки несимметричной линии составляет $\epsilon = 7,2$, а толщина металлического покрытия $d = 0,035$ мм. Модель микроволнового макета ИЛЭ (рис. 1) состоит из 4 типов функциональных узлов СВЧ. Этими элементами являются: циркуляторы (поз. 1, 2 на рис. 1), одноступенчатые кольцевые сумматоры мощности (поз. 3–6 на рис. 1), двухшлейфный направленный ответвитель (поз. 7 на рис. 1), элементы отбора мощности (поз. 8–11 на рис. 1) [6]. На рис. 2 изображена схема ИЛЭ в виде условных обозначений элементов.

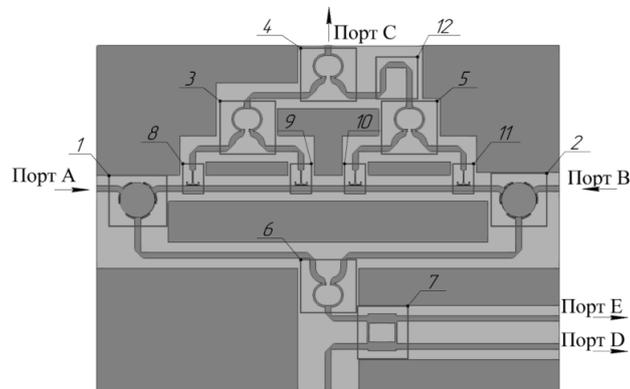


Рис. 1. Модель микроволнового макета ИЛЭ

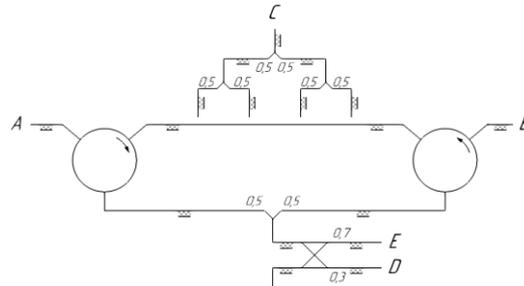


Рис. 2. Схема микроволнового макета ИЛЭ

В микроволновом макете ИЛЭ значение мощности выходного сигнала вырабатывается либо в результате воздействия одного импульса входного сигнала, либо в результате воздействия двух входных импульсов сигнала. В случае одного входного импульса сигнала задействуются интерференционные эффекты, порожденные бегущей волной, в случае двух входных импульсов – порожденные стоячей волной, образованной взаимодействием двух когерентных импульсов между циркуляторами, установленных на входах волноведущей линии. Для выполнения логических операций применяются элементы отбора мощности, представляющие собой направленные ответвители с боковой связью, с заданным коэффициентом ответвления. Для выравнивания уровней логических «0» и «1» в элементах «И» и «исключающее ИЛИ» используется двухшлейфный направленный ответвитель, который отводит необходимое количество мощности. Элемент «НЕ» получается подачей постоянного единичного сигнала на один из входов элемента «исключающее ИЛИ».

Длительность выполнения логических операций определяется длительностью распространения электромагнитного импульса в линии. Применение в схеме построения ИЛЭ реактивных элементов позволяет минимизировать потери СВЧ-энергии при распространении электромагнитного импульса.

Результаты численного моделирования ИЛЭ. В табл. 1 показаны значения функций, реализуемых элементами «И» и «исключающее ИЛИ». Необходимо на выходах элементов «И» и «исключающее ИЛИ» получить значения мощности, соответствующие значениям функций.

Таблица 1

Значения функций, реализуемых элементами «исключающее ИЛИ» и «И»

Вход А	Вход В	«исключающее ИЛИ»	«И»
		Выход С	Выход D
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

На рис. 3 изображен усредненный модуль вектора напряженности электрического поля $\langle |\vec{E}| \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |\vec{E}(\varphi)| d(\varphi)$ в ИЛЭ в случае бегущей волны. Для осуществления режима бегущей волны в ИЛЭ на порт В (см. рис. 1), при отсутствии подачи когерентного импульса в порт А, подается прямоугольный радиоимпульс с частотой заполнения 2,45 ГГц (см. $S_B(t)$ на рис. 5 интервал от 5 нс до 20 нс) мощностью 0,5 Вт. В результате, импульс электромагнитной волны мощностью 0,5 Вт, проходя через волноведущую линию, теряет мощность на каждом элементе отбора

(см. рис. 1 поз. 8-11) и путем суммирования (см. рис. 1 поз. 3-5) от каждого элемента отбора на порт С (выход искл. «ИЛИ») поступает радиоимпульс мощностью 0,19 Вт. Для синфазного суммирования мощности в ИЛЭ используется линия задержки (см. рис. 1 поз. 12). При этом на порт Е через циркулятор (см. рис. 1 поз. 2), сумматор (см. рис. 1 поз. 6) и двухшлейфный направленный ответвитель (см. рис. 1 поз. 7) поступает радиоимпульс мощностью 0,10 Вт и на порт D (выход «И») – 0,06 Вт. Режим бегущей волны может также осуществляться и в случае подачи прямоугольного радиоимпульса на порт А (см. $S_A(t)$ на рис. 5 интервал от 35 нс до 50 нс), в отсутствие подачи когерентного прямоугольного радиоимпульса в порт В. Таким образом, наличие или отсутствие подачи импульсов на порты А и В моделирует логические константы «1» и «0» соответственно.

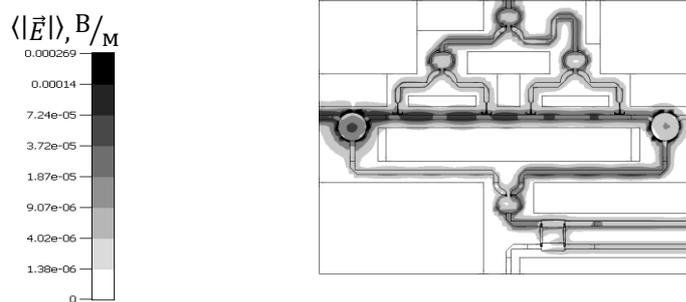


Рис. 3. Распределение усредненного модуля вектора напряженности электрического поля в случае бегущей волны

На рис. 4 изображен усредненный модуль вектора напряженности электрического поля в ИЛЭ в случае стоячей волны. Для осуществления режима стоячей волны в ИЛЭ на порт А и на порт В (см. рис. 1) поступают одновременно прямоугольные радиоимпульсы с частотой заполнения 2,45 ГГц одинаковой мощности 0,5 Вт (см. $S_A(t)$ и $S_B(t)$ на рис. 5 интервал от 20 нс до 35 нс). В результате взаимодействия когерентных радиоимпульсов, между циркуляторами (см. рис. 1 поз. 1, 2), образуется стоячая волна, при этом элементы отбора мощности (см. рис. 1 поз. 8-11) оказываются в узлах стоячей волны и на порт С поступает импульс низкой мощности равной 0,00005 Вт. При этом на порт Е через циркулятор (см. рис. 1 поз. 2), сумматор (см. рис. 1 поз. 6) и двухшлейфный направленный ответвитель (см. рис. 1 поз. 7) поступает радиоимпульс мощностью 0,42 Вт и на порт D – 0,26 Вт. Для логических элементов «исключающее ИЛИ» и «И», выходами являются порты С и D соответственно.

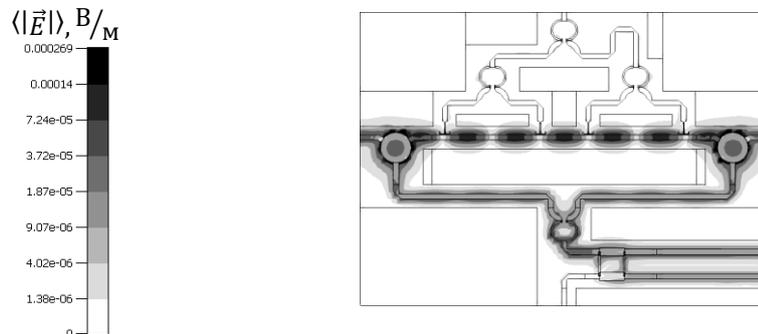


Рис. 4. Распределение усредненного модуля вектора напряженности электрического поля в случае стоячей волны

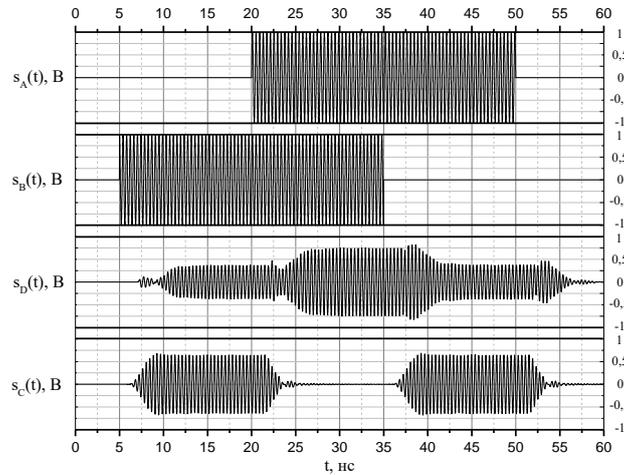


Рис. 5. Временная реализация сигналов в модели ИЛЭ

Длительность переходных процессов в модели ИЛЭ, составляет не более 5 нс для логического элемента «исключающее ИЛИ» и не более 7 нс для элемента «И». Таким образом, уровень логического «0» – в случае осуществления режима бегущей волны на порт С от уровня логической «1» – в случае осуществления режима бегущей волны на порт D отличается в 3,16 раза по мощности, что обеспечивает помехоустойчивость логического элемента.

В режиме стоячей волны (рис. 4) на порт E поступает 0,42 Вт, что близко к значению 0,5 Вт. Эту мощность, в дальнейшем, можно использовать для создания логического отрицания «НЕ». Также данную мощность можно использовать для дополнительного питания других логических элементов входящих в состав цифровых устройств.

Результаты экспериментальных исследований макета ИЛЭ. На основе численной модели ИЛЭ, представленной в предыдущем разделе, реализован макет ИЛЭ «И» и «исключающее ИЛИ» (см. рис. 6). Макет содержит те же элементы, что и численная модель, а также дополнительные элементы, осуществляющие симуляцию подачи или отсутствия сигналов на входах циркуляторов – на портах А и В (см. рис. 1). Симуляция осуществляется делением входной мощности сигнала (см. рис. 6 позиция 1) на два канала, затем сигналы в каждом из каналов коммутируются СВЧ-переключателями (см. рис. 7 поз. 2,3) между согласованными нагрузками (см. рис. 7 поз. 4,5) и входами циркуляторов (см. рис. 7 поз. 8,9) – портами А и В. При этом подача сигнала на порт В с переключателя (см. рис. 7 поз. 3) осуществляется посредством линии задержки – коаксиального кабеля определенной длины (см. рис. 7, между поз. 6 и 7), для обеспечения фазировки сигналов на входах циркуляторов (см. рис. 7 поз. 8,9) – портов А и В. На рис. 7 порт №1 соответствует портам А и В в численной модели (см. рис. 1) после прохождения сигналов через схему коммутации, а порты №2 и №3 соответствуют портам С (выход искл. «ИЛИ») и D (выход «И»).

На рис. 8 изображена блок-схема измерения параметров макета ИЛЭ. На рис. 9,а,в,д,ж изображены графики коэффициента прохождения логического элемента «исключающее ИЛИ» в диапазоне частот 2,4–2,7 ГГц. На рис. 9,б,г,е,з изображены графики коэффициента прохождения логического элемента «И» в диапазоне частот 2,4–2,7 ГГц. Центральная частота рабочего диапазона экспериментального макета составила 2,545 ГГц. На этой частоте наилучшим образом формируется

интерференционная картина поля в линии передачи. Отличие центральной частоты численного моделирования и экспериментального макета обусловлено допусками на диэлектрическую проницаемость подложки и технологии изготовления печатных проводников.



Рис. 6. Макет микроволнового ИЛЭ

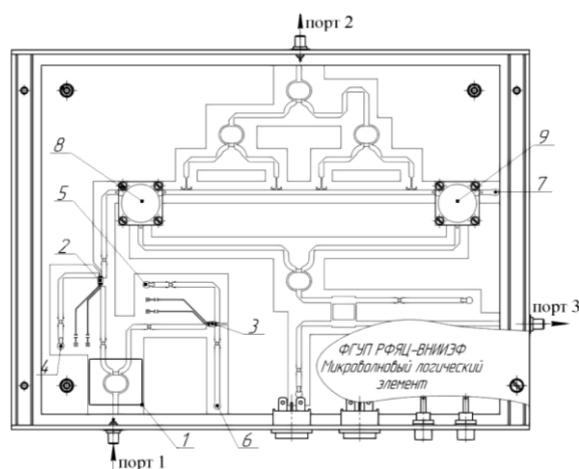


Рис. 7. Чертеж макета ИЛЭ

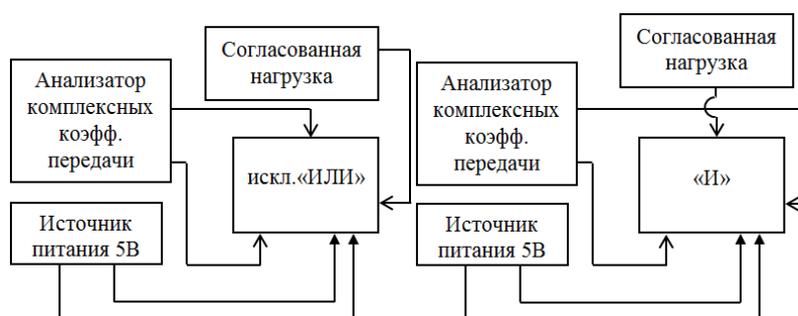


Рис. 8. Блок-схема измерений макета ИЛЭ

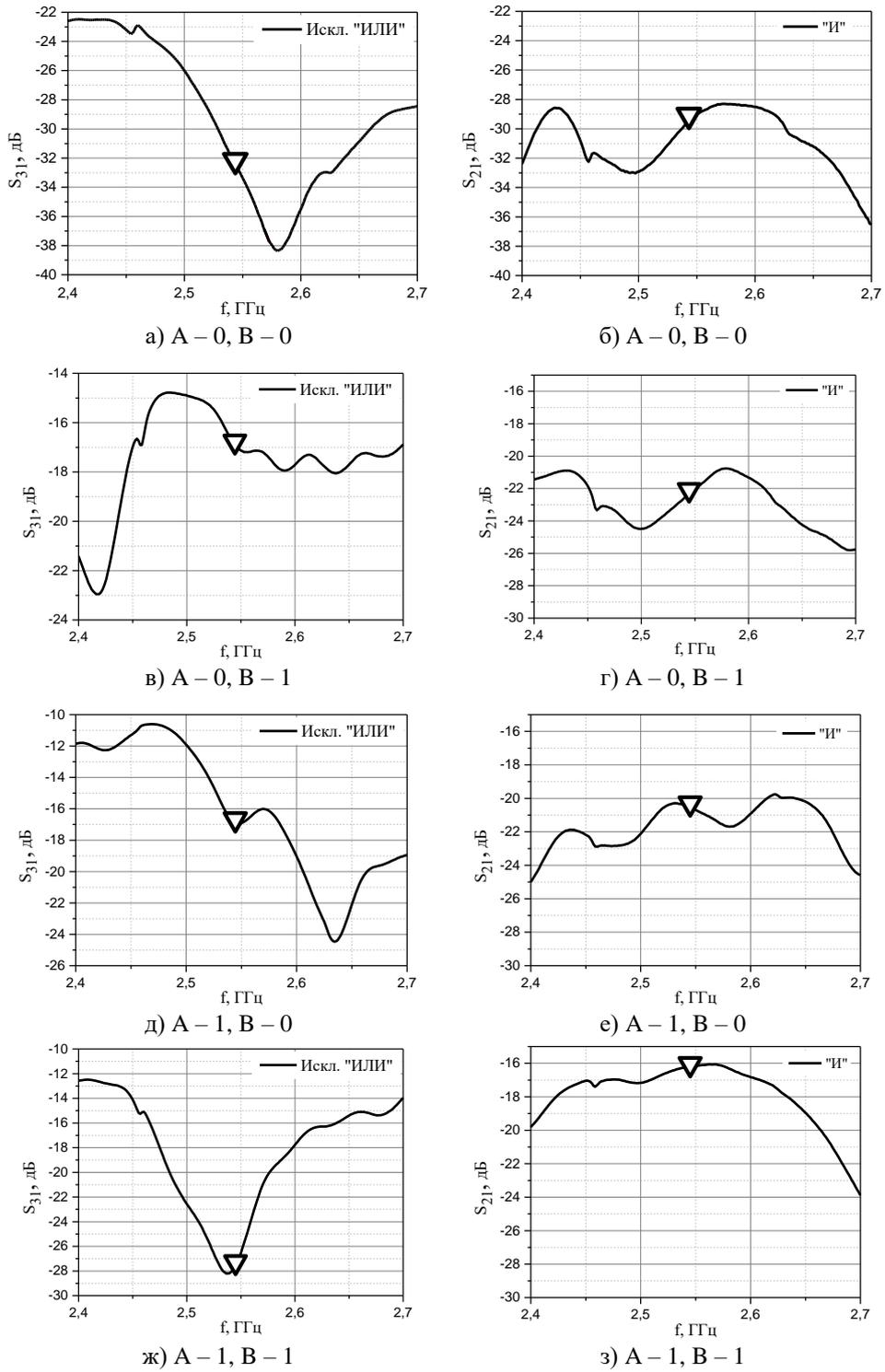


Рис. 9. Частотная зависимость коэффициентов прохождения в макете ИЛЭ

В табл. 3 представлены уровни мощности сигналов на выходах макета ИЛЭ на частоте 2,545 ГГц. Из табл. 3 видно, что уровни логических единиц «1» в логических элементах «исключающее ИЛИ» и «И» практически равны, разница составляет менее 12%. При этом разница между логическими «0» и «1» составляет 3,5 дБ, что соответствует 2,23 раза по мощности.

Таблица 2

Уровни мощности для логических элементов «И» и «исключающее ИЛИ» в модели ИЛЭ

Вход А, Вт	Вход В, Вт	«исключающее ИЛИ»	«И»
		Выход С, Вт	Выход D, Вт
0	0	0 (0)	0 (0)
0	0,5	0,19 (1)	0,06 (0)
0,5	0	0,19 (1)	0,06 (0)
0,5	0,5	0,00005 (0)	0,26 (1)

Таблица 3

Уровни мощности для логических элементов «исключающее ИЛИ» и «И» в макете ИЛЭ на частоте 2,545 ГГц

А	В	«исключающее ИЛИ»	«И»
		С, дБ	D, дБ
0	0	-32 (0)	-30 (0)
0	1	-17 (1)	-22 (0)
1	0	-17 (1)	-20,5 (0)
1	1	-27,5 (0)	-16,5 (1)

Заключение. Предложена микроволновая реализация макета интерференционных логических элементов ИЛЭ, в основе которой различие значений мощности электромагнитной волны, возникающее в результате отсутствия или наличия интерференции электромагнитных волн и их взаимодействия с волноведущими линиями логических элементов. Элементы образуют полный функциональный базис, с соблюдением требований идентичности значений интенсивности, соответствующих логическим константам «0» и «1», вырабатываемых различными элементами в заданные фиксированные интервалы времени. Экспериментальные оценки параметров интерференционных логических элементов, подтверждают правильность применения физических принципов, определяющих функционирование элементов. Представленный микроволновый макет ИЛЭ функционирует в диапазоне частот 2,4–2,5 ГГц. Переход в оптический диапазон частот при сохранении принципа работы ИЛЭ, улучшит значения параметров ИЛЭ, но потребует высокотехнологичного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степаненко С.А. Фотонная вычислительная машина. Принципы реализации. Оценки параметров // Доклады академии наук. – 2017. – Т. 476, № 4. – С. 389-394.
2. Hussein M.E., Tamer A. Ali, and Rafat Nadia H.. New designs of a complete set of Photonic Crystals logic gates // Optics Communication. – 2018. – Vol. 411. – P. 175-181.
3. Xiaoting Wu, Jinping Tian, Rongcao Yang. A type of all-optical plasmon polaritons // Optics Communications. – 2017. – Vol. 403. – P. 185-192.
4. Papaioannou Maria, Plum Eric, João Valente, Edward T.F. Rogers, and Zheludev Nikolay I. All-optical multichannel logic based on coherent perfect absorption in a plasmonic metamaterial // APL Photonics. – 2016. – Vol. 1. 090801. – DOI: 10.1063/1.4966269.

5. Sun Xiao-Wen, Yang Xiu-Lun, Meng Xiang-Feng, Zhu Ji-Nan, Wang Yu-Rong, Yin Yong-Kai, Dong Guo-Yan. Design and analysis of logic NOR, NAND and XNOR gates based on interference effect // *Quantum Electronics*. – 2018. – Vol. 48, No. 2. – P. 178-183.
6. Степаненко С.А. Интерференционные логические элементы // Доклады РАН «Математика, информатика, процессы управления». – 2020. – Т. 493. – С. 64-69.
7. Астайкин А.И., Троцюк К.В., Ионова С.П., Профе В.Б. Теория и техника СВЧ: учеб. пособие. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. – 446 с.
8. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1992.
9. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет элементов на полосковых линиях. – М.: Сов. радио, 1972.
10. Фельдштейн Ф.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. – М.: Сов. радио, 1967.
11. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. А.Л. Фельдштейна. – М.: Связь, 1979.
12. Мейнке М., Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. Т. 1. – М.: Госэнергоиздат, 1971.
13. Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. – М.: Атомиздат, 1980.
14. Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. – М.: Сов. радио, 1976.
15. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988.
16. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ / под ред. Д.М. Сазонова. – М.: Высшая школа, 1981.
17. Конструирование и расчет полосковых устройств / под ред. И.С. Ковалева. – М.: Сов. радио, 1974.
18. Сосунов В.А., Шибяев А.А. Направленные ответвители сверхвысоких частот. – Саратов, 1964.
19. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высшая школа, 1970.
20. Хижа Х.С., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А. СВЧ – фазовращатели и переключатели. – М.: Радио и связь, 1984.
21. Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // *IEEE Transactions on antennas and propagation*. – 1966. – Vol. 14, No. 3. – P. 302-307.

REFERENCES

1. Stepanenko S.A. Fotonnaya vychislitel'naya mashina. Printsipy realizatsii. Otsenki parametrov [Photonic computing machine. Principles of implementation. Parameter estimates], *Doklady akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2017, Vol. 476, No. 4, pp. 389-394.
2. Hussein M.E., Tamer A. Ali, and Rafat Nadia H. New designs of a complete set of Photonic Crystals logic gates, *Optics Communication*, 2018, Vol. 411, pp. 175-181.
3. Xiaoting Wu, Jinping Tian, Rongcao Yang. A type of all-optical plasmon polaritons, *Optics Communications*, 2017, Vol. 403, pp. 185-192.
4. Papaioannou Maria, Plum Eric, João Valente, Edward T.F. Rogers, and Zheludev Nikolay I. All-optical multichannel logic based on coherent perfect absorption in a plasmonic metamaterial, *APL Photonics*, 2016, Vol. 1. 090801. DOI: 10.1063/1.4966269.
5. Sun Xiao-Wen, Yang Xiu-Lun, Meng Xiang-Feng, Zhu Ji-Nan, Wang Yu-Rong, Yin Yong-Kai, Dong Guo-Yan. Design and analysis of logic NOR, NAND and XNOR gates based on interference effect, *Quantum Electronics*, 2018, Vol. 48, No. 2, pp. 178-183.
6. Stepanenko S.A. Interferentsionnye logicheskie elementy [Interference logic elements], *Doklady RAN «Matematika, informatika, protsessy upravleniya»* [Reports of the Russian Academy of Sciences "Mathematics, Computer Science, control processes"], 2020, Vol. 493, pp. 64-69.
7. Astaykin A.I., Trotsyuk K.V., Ionova S.P., Profe V.B. Teoriya i tekhnika SVCH: ucheb. posobie [Theory and technique of microwave: a textbook]. Sarov: FGUP «RFYATS-VNIIEF», 2008, 446 p.
8. Baskakov S.I. Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and propagation of radio waves]. Moscow: Vysshaya shkola, 1992.
9. Maloratskiy L.G., Yavich L.R. Proektirovanie i raschet elementov na poloskovykh liniyakh [Design and calculation of elements on strip lines]. Moscow: Sov. radio, 1972.
10. Fel'dshteyn F.L., Yavich L.R., Smirnov V.P. Spravochnik po elementam volnovodnoy tekhniki [Handbook on the elements of waveguide technology]. Moscow: Sov. radio, 1967.

11. Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroystv [Handbook on the calculation and design of microwave strip devices], ed. by A.L. Fel'dshcheyna. Moscow: Svyaz', 1979.
12. *Meynke M., Gundlakh F.* Radiotekhnicheskiy spravochnik [Radio Engineering Handbook], Vol. 1. Moscow: Gosenergoizdat, 1971.
13. *Milovanov O.S., Sobenin N.P.* Tekhnika sverkhvysokikh chastot [Ultrahigh frequency technology]. Moscow: Atomizdat, 1980.
14. *Maloratskiy L.G.* Mikrominiaturizatsiya elementov i ustroystv SVCh [Microminiaturization of microwave elements and devices]. Moscow: Sov. radio, 1976.
15. *Sazonov D.M.* Antenny i ustroystva SVCh [Antennas and microwave devices]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988.
16. *Sazonov D.M., Gridin A.N., Mishustin B.A.* Ustroystva SVCh [Microwave devices], ed. by D.M. Sazonov. Moscow: Vysshaya shkola, 1981.
17. Konstruirovaniye i raschet poloskovykh ustroystv [Design and calculation of strip devices], ed. by I.S. Kovaleva. Moscow: Sov. radio, 1974.
18. *Sosunov V.A., Shibaev A.A.* Napravlennye otvetviteli sverkhvysokikh chastot [Directional couplers of ultrahigh frequencies]. Saratov, 1964.
19. *Lebedev I.V.* Tekhnika i pribory SVCh [Microwave equipment and devices]. Moscow: Vysshaya shkola, 1970.
20. *Khizha Kh.S., Vendik I.B., Serebryakova E.A.* SVCh – fazovrashchateli i pereklyuchateli [Microwave phase shifters and switches]. Moscow: Radio i svyaz', 1984.
21. *Kane Yee.* Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 1966, Vol. 14, No. 3, pp. 302-307.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.И. Левин.

Быков Александр Геннадьевич – Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»); e-mail: bykov_a_g@mail.ru; г. Саров, Россия; тел.: 88313022131; инженер-исследователь.

Ошкин Игорь Владимирович – e-mail: IVOshkin@vniief.ru; тел.: 88313040896; с.н.с.

Профе Виктор Борисович – e-mail: beavervic@yandex.ru; тел.: 88313041800; начальник научно-исследовательского отдела; к.т.н.

Степаненко Сергей Александрович – e-mail: ssakuban@mail.ru; тел.: 88313026289; д.ф.-м.н.; г.н.с.

Троцюк Константин Васильевич – e-mail: KVTrotsuk@vniief.ru; тел.: 88313024230; начальник научно-исследовательской группы; к.т.н.

Тяпков Евгений Владимирович – e-mail: EVTjapkov@vniief.ru; тел.: 88313021869; инженер-исследователь.

Bykov Alexandr Gennadievich – Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics" (FSUE "RFNC-VNIIEF"); e-mail: bykov_a_g@mail.ru; Sarov, Russia; phone: +78313022131; engineer-researcher.

Oshkin Igor Vladimirovich – e-mail: IVOshkin@vniief.ru; phone: 88313040896; senior researcher.

Profe Victor Borisovich – e-mail: beavervic@yandex.ru; phone: 88313041800; head of the Scientific Department; cand. of eng. sc.

Stepanenko Sergey Alexandrovich – e-mail: ssakuban@mail.ru; phone: 88313026289; dr. of phys. and math. sc.; chief scientific officer.

Trotsuk Constantin Vasilievch – e-mail: KVTrotsuk@vniief.ru; phone: 88313024230; head of the Scientific Group; cand. of eng. sc.

Tjapkov Evgeny Vladimirovich – e-mail: EVTjapkov@vniief.ru; phone: 88313021869; engineer-researcher.