

МИКРОВОЛНОВЫЙ МАКЕТ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Тяпков Евгений Владимирович (staff@vniief.ru), Быков Александр Геннадьевич,
Троцюк Константин Васильевич*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Представлены результаты моделирования, разработки конструкции, изготовления и испытаний макетов микроволновых интерференционных логических элементов (ИЛЭ), образующих полный функциональный базис.

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.

Ключевые слова: микроволновые интерференционные логические элементы, интерференционный логический элемент «И», интерференционный логический элемент «исключающее ИЛИ», интерференционный логический элемент «НЕ».

MICROWAVE MODEL OF INTERFERENCE LOGIC GATES

*Tyapkov Evgeny Vladimirovich (staff@vniief.ru), Bykov Aleksandr Gennadevich,
Trotsyuk Konstantin Vasilevich.*

FSUE “RFNC-VNIIEF”, Sarov Nizhny Novgorod region

The results of modelling, design development, manufacturing and testing of models of microwave interference logic gates (ILG), which form a complete functional basis, are presented.

The ILG models implement the functions “AND”, “XOR”, and “NOT”. The identity of the intensity values corresponding to the logical “0” and “1” produced by different logic gates is observed. The duration of the execution of logical operations is determined by the duration of the pulse propagation in the waveguide.

Key words: 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, 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 [1–6].

В данной работе предлагается структура для реализации ИЛЭ, представленных в [6]. В ней применены функциональные сверхвысокочастотные (СВЧ) узлы (ответвители, сумматоры, циркуляторы) [7], 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 реализации использовано численное моделирование системы методом конечного интегрирования во временной области [8]. Показано, что соблюдается идентичность значений ин-

тенсивности, соответствующих логическим уровням «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 2,4–2,6 ГГц. Диэлектрическая проницаемость материала подложки несимметричной линии составляет $\epsilon = 7,2$, а толщина металлического покрытия $d = 0,035$ мм. Модель микроволнового макета ИЛЭ представлена на рис. 1 и состоит из 4 типов функциональных узлов СВЧ [6], схема ИЛЭ – на рис. 2.

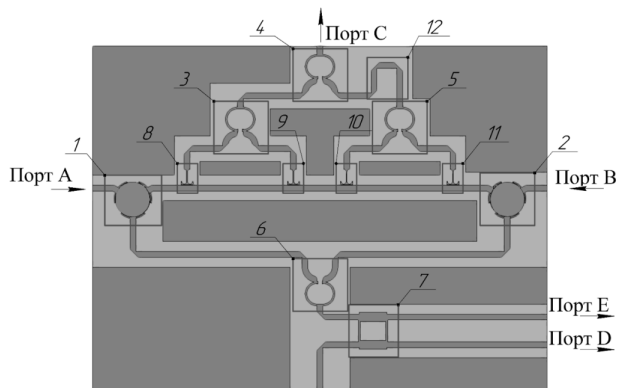


Рис. 1. Модель микроволнового макета ИЛЭ: 1, 2 – циркуляторы, 3–6 – сумматоры, 7 – направленный ответвитель, 8–11 – элементы отбора мощности, 12 – линия задержки

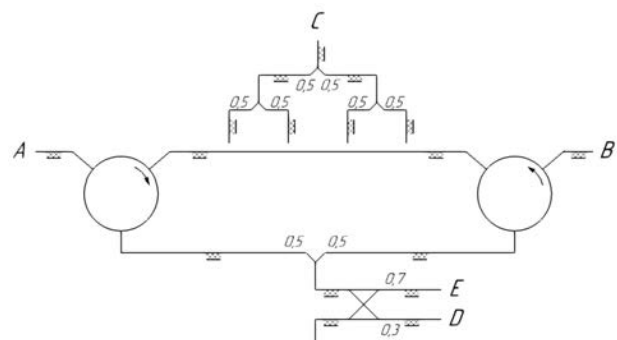


Рис. 2. Схема микроволнового макета ИЛЭ

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, установленными на входах волноведущей линии. Для выполнения логических операций применяются элементы отбора мощности, представляющие собой направленные ответвители с боковой связью, с заданным ко-

эффициентом 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».

Результаты численного моделирования ИЛЭ

В табл. 1 показаны значения функций, реализуемых ИЛЭ «И» и ИЛЭ «исключающее ИЛИ». Необходимо на выходах ИЛЭ «И» и ИЛЭ «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.

На рис. 4 изображен усредненный модуль вектора напряженности электрического поля в ИЛЭ в случае стоячей волны.

Для осуществления режима бегущей волны в ИЛЭ в порт В (см. рис. 1), при отсутствии подачи когерентного импульса в порт А, подается прямоугольный радиоимпульс с частотой заполнения 2,45 ГГц ($S_B(t)$, рис. 5, в интервале от 5 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 8-11 (см. рис.1) и путем суммирования мощности сумматорами 3-5 от каждого элемента отбора в порт С (выход «исключающее ИЛИ») поступает радиоимпульс мощностью 0,19 Вт. Для синфазного суммирования мощности в ИЛЭ используется линия задержки 12. При этом в порт Е через циркулятор 2, сумматор 6 и двухшлейфный направленный ответвитель 7 поступает радиоимпульс мощностью 0,10 Вт и в порт D (выход «И») – 0,06 Вт.

Режим бегущей волны может также осуществляться и в случае подачи прямоугольного радиоимпульса на порт А ($S_A(t)$, на рис. 5, в интервале от 35 нс до 50 нс), в отсутствие подачи когерентного прямоугольного радиоимпульса в порт В. Таким образом, наличие или отсутствие подачи импульсов в порты А и В моделирует логические уровни «1» и «0» соответственно.

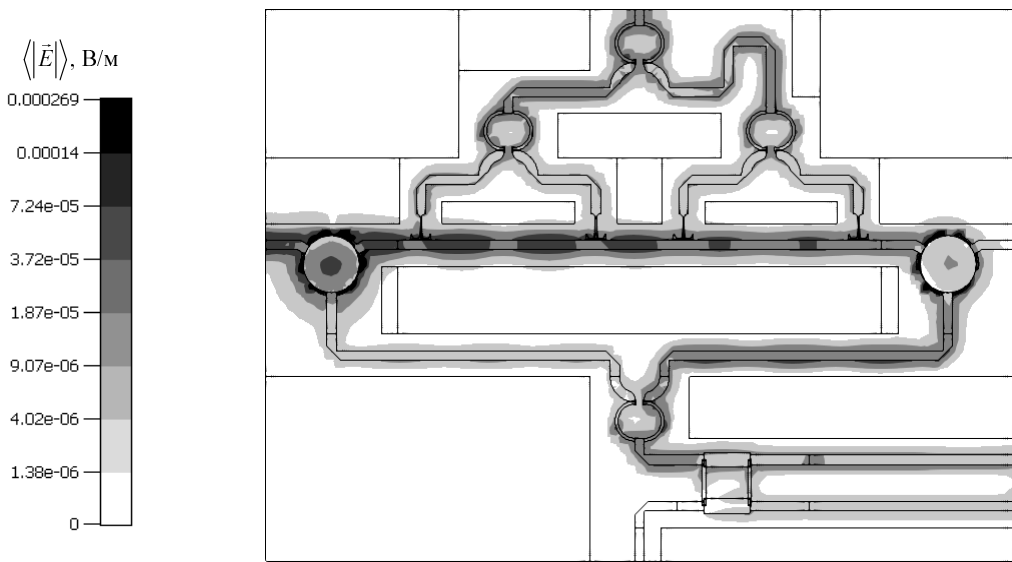


Рис. 3. Распределение усредненного модуля вектора напряженности электрического поля в случае бегущей волны

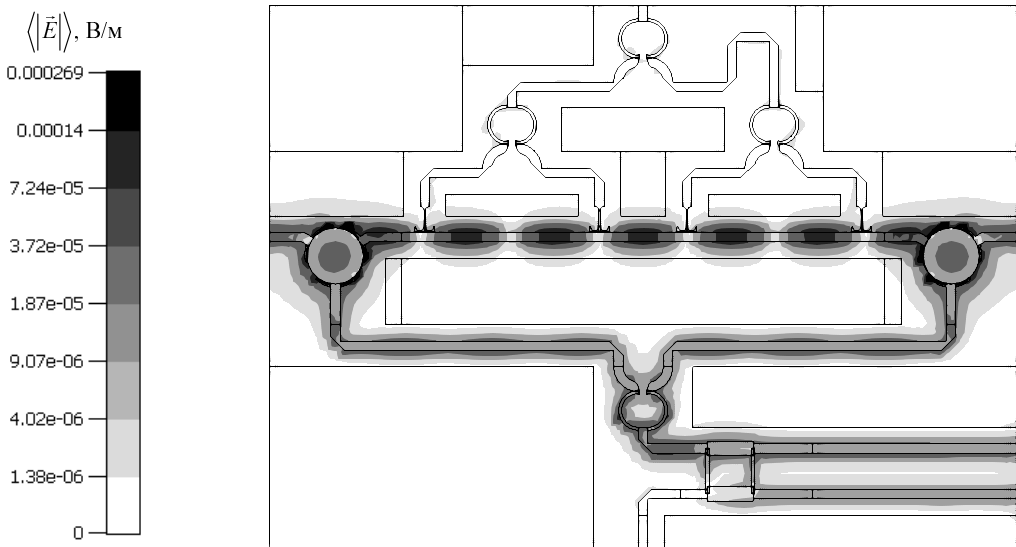


Рис. 4. Распределение усредненного модуля вектора напряженности электрического поля в случае стоячей волны

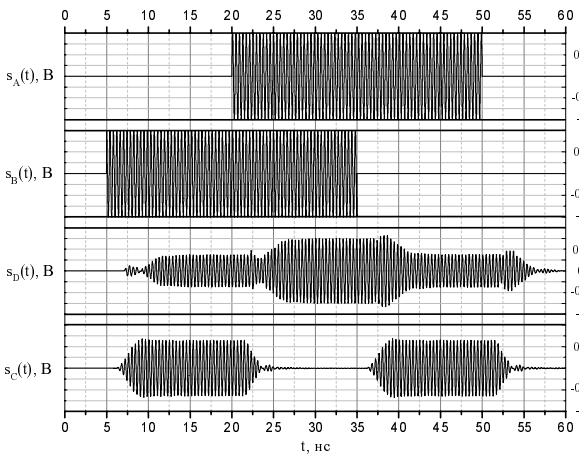


Рис. 5. Временная реализация сигналов в модели ИЛЭ

Для осуществления режима стоячей волны в ИЛЭ в порт *A* и в порт *B* (см. рис.1) поступают одновременно прямоугольные радиоимпульсы с частотой заполнения 2,45 ГГц одинаковой мощности 0,5 Вт ($S_A(t)$ и $S_B(t)$, рис. 5, в интервале от 20 нс до 35 нс). В результате взаимодействия когерентных радиоимпульсов, между циркуляторами 1-2 (см. рис. 1), образуется стоячая волна, при этом элементы отбора мощности 8-11 оказываются в узлах стоячей волны и в порт *C* поступает импульс низкой мощности равной 0,00005 Вт. При этом в порт *E* через циркулятор 2, сумматор 6 и направленный ответвитель 7 поступает радиоимпульс мощностью 0,42 Вт и в порт *D* – 0,26 Вт. Для логических элементов «исключающее ИЛИ» и «И», выходами являются порты *C* и *D*, соответственно.

В табл. 2 представлены уровни мощности для логических элементов «И» и «исключающее ИЛИ» в модели ИЛЭ.

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)

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 в 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», рис. 6.

Макет содержит элементы численной модели, а также дополнительные элементы, осуществляющие подачу сигналов на входы циркуляторов – в порты А и В (см. рис. 1).

На рис. 7 представлено конструктивное исполнение макета ИЛЭ.

Мощность входного сигнала делится на два канала, с помощью делителя 1, рис. 7, затем сигналы в каждом из каналов коммутируются СВЧ-переключателями 2-3 между согласованными нагрузками 4-5

и входами циркуляторов 8-9 – портами А и В. Подача сигнала в порт В с переключателя 3 осуществляется посредством линии задержки – коаксиального кабеля определенной длины между контактами 6-7, для обеспечения фазировки сигналов на входах циркуляторов 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 «исключающее ИЛИ») и D (выход «И»).



Рис. 6. Макет ИЛЭ

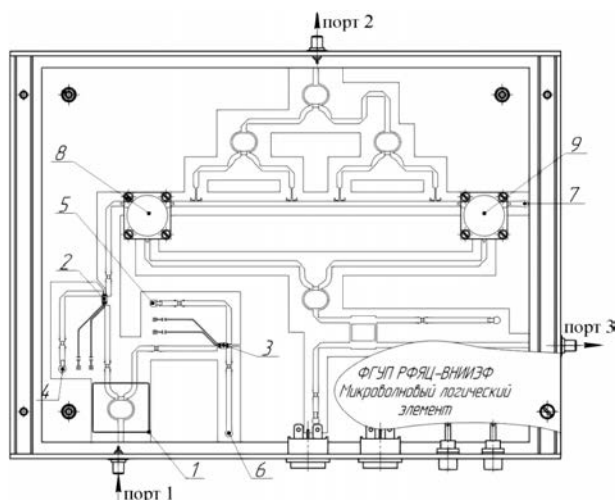


Рис. 7. Конструктивное исполнение макета ИЛЭ: 1 – делитель мощности, 2-3 – СВЧ-переключатели, 4-5 – согласованные нагрузки, 6-7 – контакты подключения линии задержки, 8-9 – циркуляторы

На рис. 8 изображена схема измерения параметров макета ИЛЭ.

На рис. 9 изображены графики частотной зависимости коэффициентов прохождения в макете ИЛЭ.

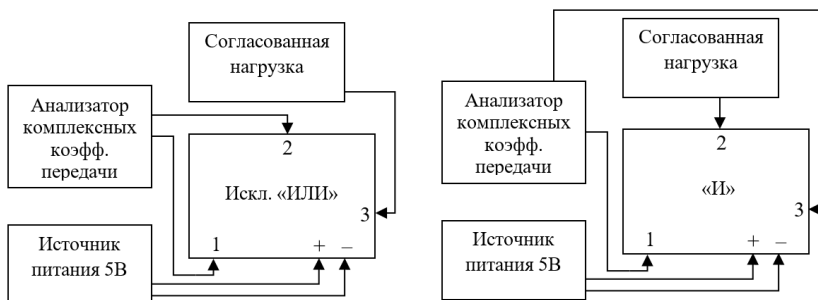
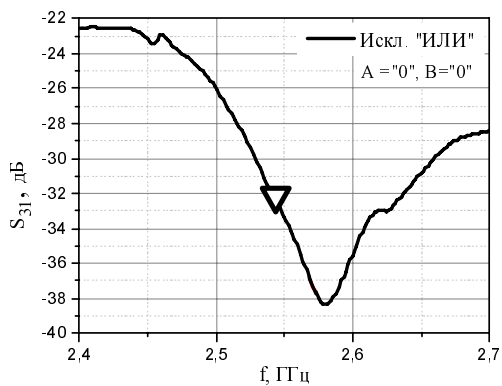
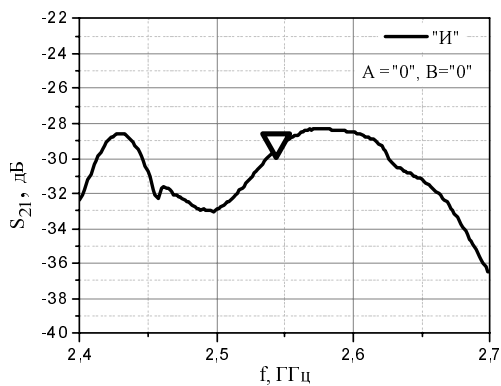


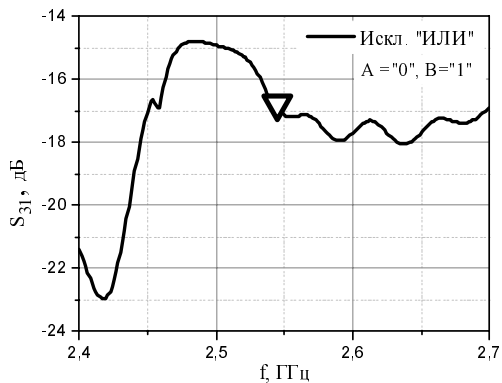
Рис. 8. Схема измерений параметров макета ИЛЭ



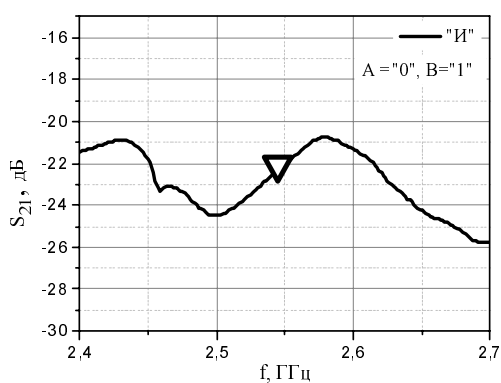
а



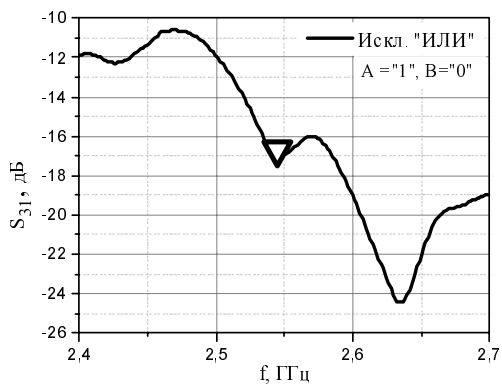
б



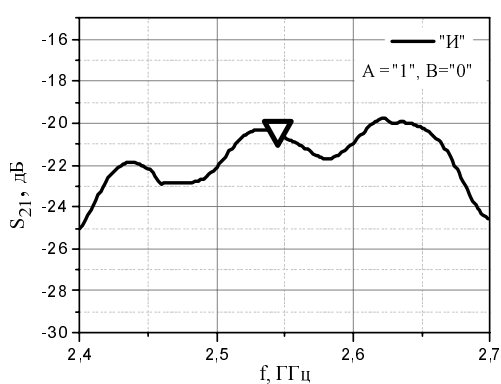
в



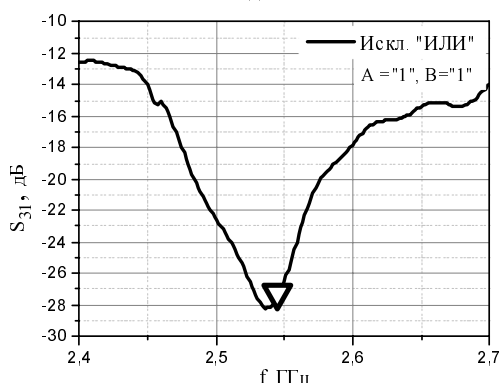
г



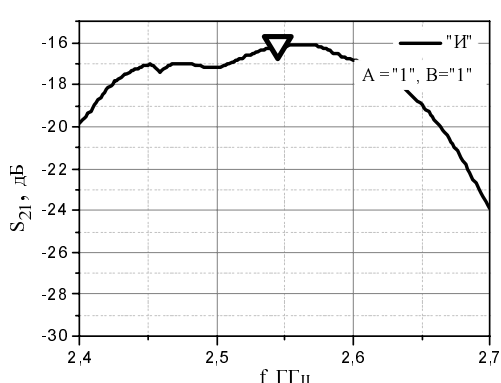
д



е



ж



з

Рис. 9. Частотная зависимость коэффициентов прохождения в макете ИЛЭ: а, в, д, ж – ИЛЭ «исключающее ИЛИ» в диапазоне частот 2,4–2,7 ГГц; б, г, е, з – ИЛЭ «И» в диапазоне частот 2,4–2,7 ГГц

На рис. 9,а,в,д,ж изображены графики частотной зависимости коэффициента прохождения ИЛЭ «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.

В табл. 3 представлены уровни мощности сигналов на выходах макета ИЛЭ на частоте 2,545 ГГц.

Таблица 3

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

Вход А	Вход 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)

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.

Заключение

Предложена реализация интерференционных логических элементов на основе микрополосковых устройств СВЧ. Логические элементы образуют полный функциональный базис, с соблюдением требований идентичности значений интенсивности, соответствующих логическим уровням «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 2,4–2,6 ГГц. Переход в оптический диапазон частот при сохранении принципа работы ИЛЭ, увеличить быстродействие ИЛЭ, но потребует высокотехнологичного оборудования для их производства.

Список литературы

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 Nadia H. Rafat. 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. Maria Papaioannou, Eric Plum, João Valente, Edward T. F. Rogers, and Nikolay I. Zheludev, All-optical multichannel logic based on coherent perfect absorption in a plasmonic metamaterial, *APL Photonics* 1, 090801 (2016); 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. N 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: Учебное пособие. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. С. 446.
8. 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. N 3. P. 302–307.