В.М. Селезнев, С.А. Тихонов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Четырехразрядный фазовращатель диапазона 60 ГГц, выполненный по технологии КМОП 90 нм

В данной статье приведены результаты разработки микросхемы фазовращателя, спроектированного по технологии КМОП 90 нм, который предназначен для работы в диапазоне частот 57-64 ГГц и имеет фазовое разрешение 22,5°. Моделирование устройства осуществлялось в САПР Cadence IC. Электромагнитный анализ линий передачи и планарных катушек индуктивности проводился в среде CST MICROWAVE STUDIO. Разработанный фазовращатель может использоваться в современных беспроводных системах при проектировании фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона с электронным перенаправлением главного луча. По результатам моделирования потери в фазовращателе составили 13,5 дБ. Ширина полосы пропускания по уровню коэффициента отражения -10 дБ составила 7 ГГц. Фазовая ошибка на частоте 60 ГГц — 1,7°, амплитудная — 0,6 дБ. Площадь, занимаемая микросхемой без учета контактных площадок — 0,17 мм².

Ключевые слова: полупроводниковый фазовращатель, КМОП, миллиметровый диапазон длин волн, линия передачи, планарная индуктивность, топология

В связи с активным развитием высокоскоростных широкополосных систем беспроводной передачи информации, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн, возникает необходимость в разработке недорогих приемопередатчиков, а также различных радиочастотных функциональных блоков выполненных в виде интегральных микросхем. Одним из важнейших элементов современных беспроводных систем является фазовращатель, который в сочетании с антенной решеткой позволяет управлять сигналом в пространстве без физического перемещения антенны. Это обеспечивает повышение эффективности систем высокоскоростной радиорелейной связи, а также различных локальных и персональных систем передачи информации. Кроме того, блок фазовращателя необходим для создания современных систем радиовидения и автомобильных радаров, работающих в миллиметровом диапазоне. Поэтому задача разработки фазовращателя, выполненного в виде интегральной схемы, является актуальной.

В рамках данной работы была спроектирована схема и топология четырехразрядного фазовращателя, работающего в диапазоне частот 57-64 ГГц. Разработка проводилась на основе технологии КМОП 90 нм фабрики TSMC (Тайвань). Моделирование устройства выполнялось в системе автоматизированного проектирования (САПР) Cadence IC с использованием технологической библиотеки элементов интегральных схем фабрики TSMC.

Основными характеристиками фазовращателя являются: максимальный управляемый фазовый сдвиг, фазовое разрешение, вносимые потери, амплитудная и фазовая ошибки, полоса рабочих частот. В результате анализа имеющихся работ [1] — [3] по исследованию фазовращателей были сформулированы требования на характеристики разрабатываемого устройства. Максимальный управляемый фазовый сдвиг должен составлять 360°, фазовое разрешение 22,5°, амплитудная ошибка 0,8 дБ, фазовая ошибка 10°, полоса рабочих частот 57-64ГГц.

В данной работе для реализации четырехразрядного фазовращателя была выбрана схема, состоящая из пяти последовательных каскадов. Схема разработанного устройства

представлена на рис. 1.

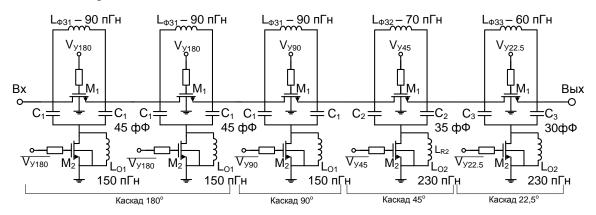


Рисунок 1. Схема разработанного четырехразрядного фазовращателя

Первые два каскада, каждый из которых дает фазовый сдвиг 90° , управляются одним напряжением. Таким образом достигается фазовый сдвиг 180° . Оставшиеся три каскада имеют задержку 90° , 45° и $22,5^\circ$ соответственно. Каждый каскад, в зависимости от режима работы, способен либо пропускать сигнал без задержки, либо с фазовым сдвигом (рис. 2a). Если транзистор M1 выключен, а M2 включен, индуктивность L_{φ_3} и емкость C формируют Побразный фильтр нижних частот, Φ ЧХ которого можно считать линейной вплоть до частоты 70 ГГц (рис. 26). В этом случае формируется фазовая задержка. Отличие Φ ЧХ от линейной зависимости на более высоких частотах связано с близостью частоты среза и влиянием паразитной емкости транзистора M1. Если же транзистор M1 включен, а M2 выключен, индуктивность L_0 и емкость C образуют полосно-заграждающий фильтр, это обеспечивает прохождение сигнала без задержки — режим обхода.

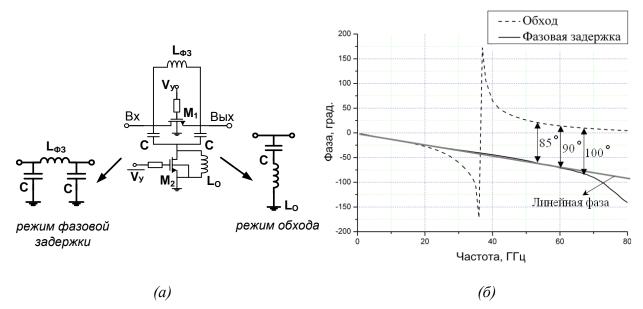


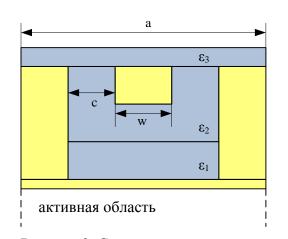
Рисунок 2. Упрощенные схемы работы каскада в режимах фазовая задержка и обход (а). ФЧХ каскада, осуществляющего фазовый сдвиг 90° (б)

Комбинируя различные режимы работы каскадов такого фазовращателя, можно управлять фазовой задержкой в диапазоне 360° с разрешением 22.5° .

Расчет значений элементов схемы четырехразрядного фазовращателя выполнялся в САПР Cadence IC. При этом использовались результаты предварительного электромагнитного моделирования линий передачи, соединяющих каскады между собой и планарных катушек индуктивности. Моделирование проводилось в среде CST MICROWAVE STUDIO. Необходимость этого обусловлена отсутствием в технологической библиотеке фабрики TSMC готовых моделей индуктивностей и линий передачи для диапазона частот выше 30 ГГц.

Микросхемы, выполненные по технологии TSMC 90 нм, содержат 9 слоев металла над активной областью, разделенных слоями диэлектрика с различной диэлектрической проницаемостью. Поэтому, для ускорения вычислений в данной работе структура слоев была заменена на упрощенную, без существенной потери в точности моделирования.

Таблица 1



Характеристика	Значение
Ширина линии (а), мкм.	20
Длина линии, мкм.	40
Ширина микрополоска (w), мкм	5
Расстояние между микрополоском	4,5
и боковой металлизацией (с), мкм	
Сопротивление, Ом.	0,22
Индуктивность, пГн.	11
Емкость, фФ.	7
Добротность	20

Рисунок 3. Структура линии передачи

На рис. 3 показана структура линии передачи с характеристическим импедансом 50 Ом. Она состоит из центрального проводника, по сторонам которого располагается боковая металлизация, а на нижнем уровне находится экранирующий слой металлизации. Данная конструкция линии передачи позволяет минимизировать влияние этого элемента на выходные характеристики фазовращателя благодаря тому, что в таком типе линии центральный проводник защищен от влияния соседних элементов схемы и от паразитных сигналов, распространяющихся по подложке микросхемы [4]. Параметры и характеристики разработанной линии передачи представлены в таблице 1.

На рис. 4а показана использованная в данной работе планарная катушка, представляющая собой закрученный в прямоугольный виток проводник шириной 3 мкм, находящийся на 9-ом уровне металлизации. Длина катушки 150 мкм, ширина 40 мкм, добротность равна 12. На рис. 4б приведена зависимость значения индуктивности от частоты, как видно значение индуктивности в области 60 ГГц составляет 90 пГн. Кроме того, были рассчитаны геометрические параметры катушек индуктивностью 60, 70, 150 и 230 пГн.

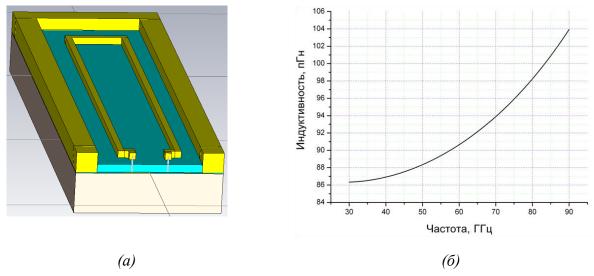


Рисунок 4. Планарная катушка индуктивности (a) и зависимость ее индуктивности от частоты (б)

На рис. 5 представлены основные характеристики разработанного фазовращателя: АЧХ и амплитудная ошибка (рис. 5а), ФЧХ и фазовая ошибка (рис. 5б). По результатам моделирования средний коэффициент передачи на частоте 60 ГГц составляет -13,6 дБ, амплитудная ошибка 0,6 дБ, фазовая ошибка 1,7°. Уровень коэффициента отражения S11 в полосе частот 57 - 64 ГГц не превышает - 11 дБ, а S22 меньше - 7,5 дБ.

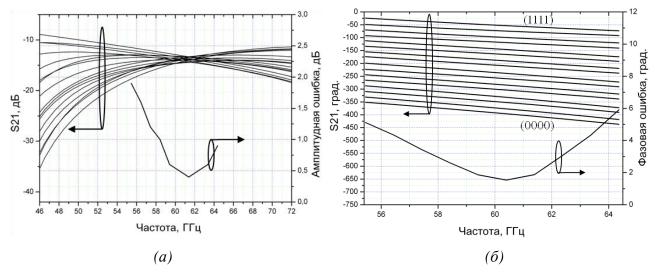


Рисунок 5. Характеристики разработанного фазовращателя

Разработка топологии микросхемы выполнялась в среде Cadence VirtuosoXL. При создании топологии учитывались требования, касающиеся металлизации, плотности максимальных допустимых расстояний, И других ограничений, минимальных предъявляемых фабрикой изготовителем. Топология четырехразрядного фазовращателя представлена на рис. 6. Контактные площадки входа и выхода фазовращателя предназначены для подключения СВЧ зондов типа земля-сигнал-земля с расстоянием между выводами 150 мкм. Площадь, занимаемая микросхемой, без учета контактных площадок составляет 0,17 мм².

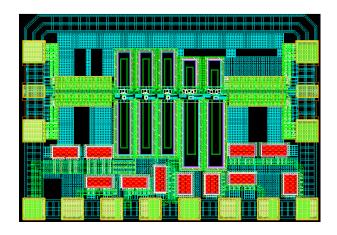


Рисунок 6. Топология микросхемы фазовращателя

Основные характеристики спроектированного фазовращателя и некоторых известных аналогичных устройств приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристика	Значение	[1]	[1]	[2]
Частота	60 ГГц	34 ГГц	34 ГГц	60 ГГц
Технология	КМОП 90	КМОП 130	КМОП 130	КМОП 130
	НМ	НМ	НМ	НМ
Управляемый фазовый сдвиг	360°	360°	360°	156°
Фазовое разрешение	22,5°	22,5°	22,5°	-
Вносимые потери	13,1-14,2 дБ	11,5-13,7 дБ	8,8-11,2 дБ	6,3-12,5 дБ
Амплитудная ошибка	0,6 дБ	0,6 дБ	0,7 дБ	-
Фазовая ошибка	1,7°	2,5°	5°	-
Площадь	$0,17 \text{ mm}^2$	$0,12 \text{ mm}^2$	0.18 mm^2	0,2 mm ²

В результате данной работы была разработана схема четырехразрядного фазовращателя диапазона 60 ГГц и создана топология микросхемы на основе технологии TSMC КМОП 90 нм. Проведено моделирование работы устройства с использованием результатов электромагнитного исследования линий передачи и планарных катушек индуктивности. Характеристики разработанного фазовращателя, в целом, не хуже аналогов. В настоящее время ведется подготовка к запуску микросхемы в производство. Спроектированный четырехразрядный фазовращатель может быть использован при разработке фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона длин волн.

Библиографический список

- 1. B.-W. Min and G. M. Rebeiz, "Single-Ended and Differential Ka-Band BiCMOS Phased Array Front-Ends," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 43, no. 10, pp. 2239-2250, October 2008.
- 2. H. Krishnaswamy, A. Valdes-Garcia, J.W. Lai, "A silicon-based, all-passive, 60 GHz, 4-element, phased-array beamformer featuring a differential, reflection-type phase shifter," IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY), pp. 225—232, 2010.
- 3. Yikun Yu. and Hajimir A, "A 60 GHz Phase Shifter Integrated with LNA and Pa in 65 nm CMOS for Phased Aray systems," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 45, no.9, pp 1697-1709, 2010.
- 4. Vecchi F., "Design and Modelling for bulk CMOS mm-Wave Wideband Front-Ends," PhD thesis: University of Pavia, Italy, 2009.