

# Дифференциальный трансимпедансный усилитель DC-20 ГГц на основе SiGe BiCMOS технологии для интегрального оптического приемника

А.А. Коколов<sup>1</sup>, А.С.Коряковцев<sup>1</sup>, Л.И.Бабак<sup>1</sup>, Ф.И.Шеерман<sup>1</sup>, Д.А. Конкин<sup>1</sup>, Ю.А. Светличный<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>НИИ микроэлектронных систем при ТУСУР

<sup>2</sup>ООО «ЛЭМЗ-Т»

**Аннотация:** Представлена разработка интегральной схемы (ИС) дифференциального трансимпедансного усилителя (ТИУ) диапазона DC-20 ГГц для оптического приёмника на основе 0.25 мкм SiGe BiCMOS технологии. Согласно результатам зондовых измерений ИС, в полосе до 20 ГГц коэффициент усиления  $|S_{21}|$  в 50-омном тракте составляет 17-20 дБ, а коэффициент трансимпедансного усиления  $Z_T$  равен 60-62 дБ·Ω; потребляемый ток составляет 47 мА при напряжениях питания 2.5 В и 3.3 В; размер микросхемы 0.7×0.7 мм<sup>2</sup>. Результаты моделирования однокристалльного интегрального оптического приемника в составе германиевого фотодиода и ИС ТИУ показывают его работоспособность при скорости передачи до 25 Гб/с.

**Ключевые слова:** радиофотоника, SiGeBiCMOS, интегрированный оптоэлектронный приемник, трансимпедансный усилитель.

## 1. Введение

В развитии современных радиоэлектронных и телекоммуникационных средств большое место занимает создание систем когерентной высокоскоростной передачи данных. Такое повышенное внимание обусловлено, в частности, увеличением объема передаваемых данных в сети Интернет, модернизацией стандартов передачи данных IEEE до 100 Гб/с (IEEE 802.3ba) и 400 Гб/с (IEEE P802.3bs). Повышение скорости передачи данных может быть достигнуто либо при помощи увеличения полосы пропускания отдельного канала за счет применение более производительной технологии электрооптического/оптоэлектронного преобразования, либо за счет использования многоуровневой модуляции (PAM-4) и/или увеличения количества каналов (как правило, спектральное уплотнение каналов – WDM). Новые когерентные стандарты связи стремятся использовать дополнительные способы увеличения пропускной способности – такие, как использование поляризации, применение более сложной модуляции (QPSK, QAM, и т.п.) [1–3].

В настоящее время указанные средства строятся, как правило, на основе традиционного подхода с применением дискретных компонентов – LiNbO<sub>3</sub> модуляторов, АЗВ5 усилителей, фотодиодов и т.п. Несмотря на то, что такой подход позволяет получить отличную линейность и большую полосу пропускания, при необходимости использования в системе большого количества каналов, например, для коммуникации данных в датацентрах, он становится объемным, энергозатратным и дорогим [3]. В связи с этим в настоящее время активно развивается другой подход, состоящий в создании и применении оптоэлектронных устройств и систем на базе кремниевой фотоники [4, 5]. Применение технологий кремниевой радиофотоники позволяет значительно улучшить массогабаритные характеристики, уменьшить стоимость, энергопотребление оптоэлектронных изделий и т.п.

Одним из важнейших блоков в системах когерентной передачи данных является трансимпедансный усилитель (ТИУ), который преобразует ток фотодиода (ФД) в

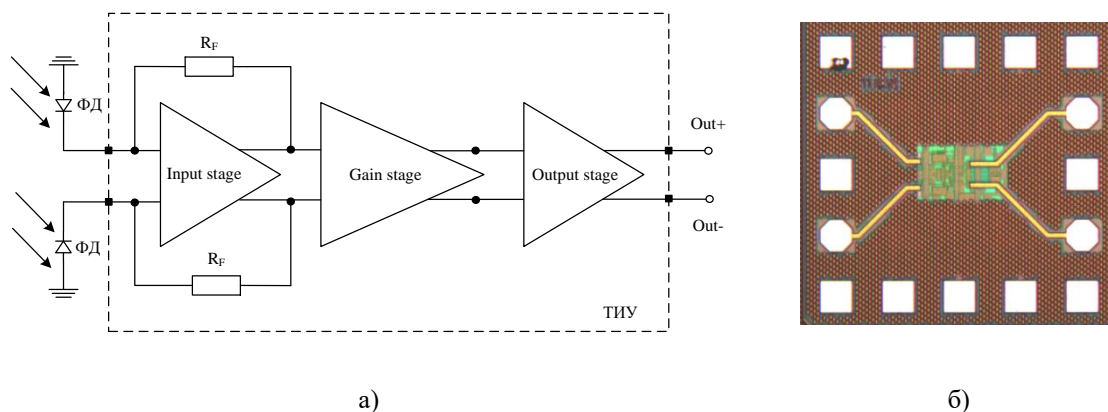
выходное напряжение и усиливает полезный сигнал. В отличие от приемников с модуляцией интенсивности с прямым способом детектирования, где используется несимметричный вход и симметричный выход, в когерентных системах используется дифференциальный ТИУ с балансными ФД (рисунок 1), подключенным к его входам [1, 2].

Использование SiGe BiCMOS технологии дает возможность осуществить интеграцию оптоэлектронных устройств (фотодиод, модулятор, оптический волновод) совместно с СВЧ электронными, а в перспективе – и с цифровыми устройствами на одном кристалле. Такой подход уже позволил повысить скорость передачи одного канала вплоть до 54 Гб/с [6]. Это достигается во многом благодаря отсутствию паразитных параметров проволочных межсоединений и более короткому пути от оптоэлектронных устройств до микрорелектронных.

Целью данной работы является разработка и экспериментальное исследование ИС дифференциального ТИУ с полосой до 20 ГГц на основе монолитной 0.25 мкм SiGe BiCMOS технологии, а также моделирование однокристалльного интегрального оптического приемника в составе ФД и ТИУ при скорости передачи до 25 Гб/с.

## 2. Проектирование и разработка топологии ИС дифференциального ТИУ

Разрабатываемый интегральный ТИУ состоит из трех каскадов: входной дифференциальный каскад преобразует ток ФД в напряжение, промежуточный каскад усиливает сигнал, выходной буфер обеспечивает требуемую выходную мощность и согласование с 50-омным трактом (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Структурная схема дифференциального ТИУ с полосой частот DC-20 ГГц (а) и топология кристалла ИС ТИУ с размером  $0,7 \times 0,7$  мм<sup>2</sup>(б)

На рисунке 2 представлена принципиальная схема дифференциального ТИУ. Ее особенностью является отсутствие катушек индуктивности, которые увеличивают площадь чипа. Входной каскад (Т1-Т8) реализован на основе схемы с параллельной обратной связью, резисторы R4 и R6 влияют на величину трансимпедансного коэффициента усиления и на согласование по входу. Промежуточный каскад (Т9-Т19) выполнен по каскадной схеме с цепью эмиттерной коррекции АЧХ, для согласования с выходным буферным каскадом используются эмиттерные повторители (Т20-Т25). Выходной буферный каскад (Т26-Т29) обеспечивает выходную мощность и согласование с нагрузкой, он также содержит эмиттерную RC-цепь коррекции АЧХ.

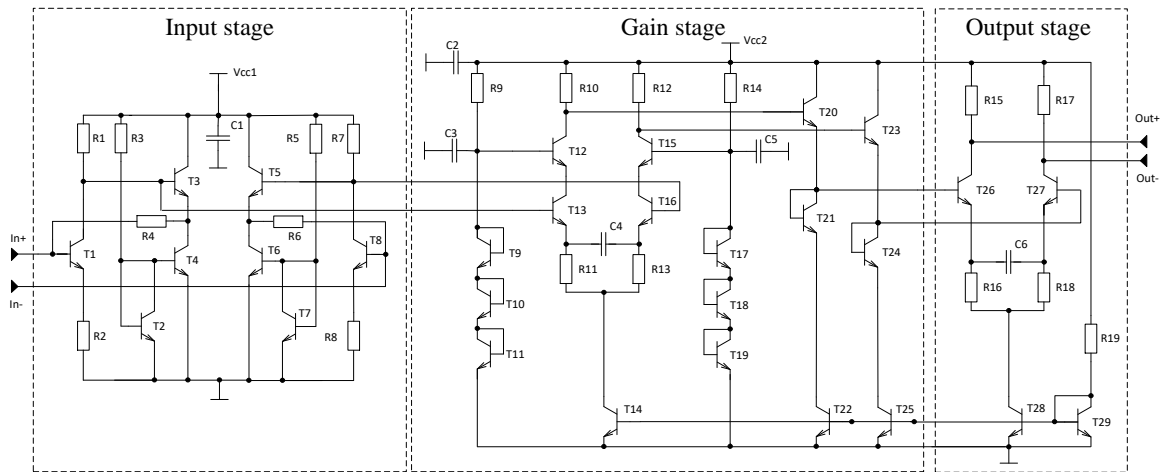


Рисунок 2. Принципиальная схема дифференциального ТИУ с полосой частот DC-20 ГГц

Моделирование схемы, разработка топологии ИС и экстракция паразитных элементов были выполнены в САПР Cadence. Дополнительно было проведено ЭМ моделирование подводящих линий и межсоединений в САПР ЭМ моделирования Momentum (Keysight).

### 3. Экспериментальное исследование ИС дифференциального ТИУ

На рисунке 3а представлены результаты зондовых измерений и моделирования  $S$ -параметров в 50-ом тракте для одного канала ИС ТИУ. На рисунке 3б представлен рассчитанный из измеренных и смоделированных  $S$ -параметров коэффициент трансимпедансного усиления  $Z_T$  и измеренное групповое время задержки  $\tau$  (ГВЗ). Согласно экспериментальным исследованиям, в полосе DC-20 ГГц коэффициент усиления  $|S_{21}|$  изменяется от 21 дБ до 17 дБ, а коэффициент трансимпедансного усиления составляет 60-62 дБΩ. Полоса пропускания по уровню -3 дБ для частотной зависимости  $Z_T$  равна 21 ГГц. Шумовой ток  $i_n$  составляет 35 пА√Гц, выходная мощность одного канала ИС ТИУ равна -4 дБм, что соответствует выходному размаху напряжения  $V_{pp} = 400$  мВ. Входной коэффициент отражения  $|S_{11}|$  изменяется в пределах от -15 дБ до -9 дБ, а выходной  $|S_{22}|$  – от -25 дБ до -7 дБ.

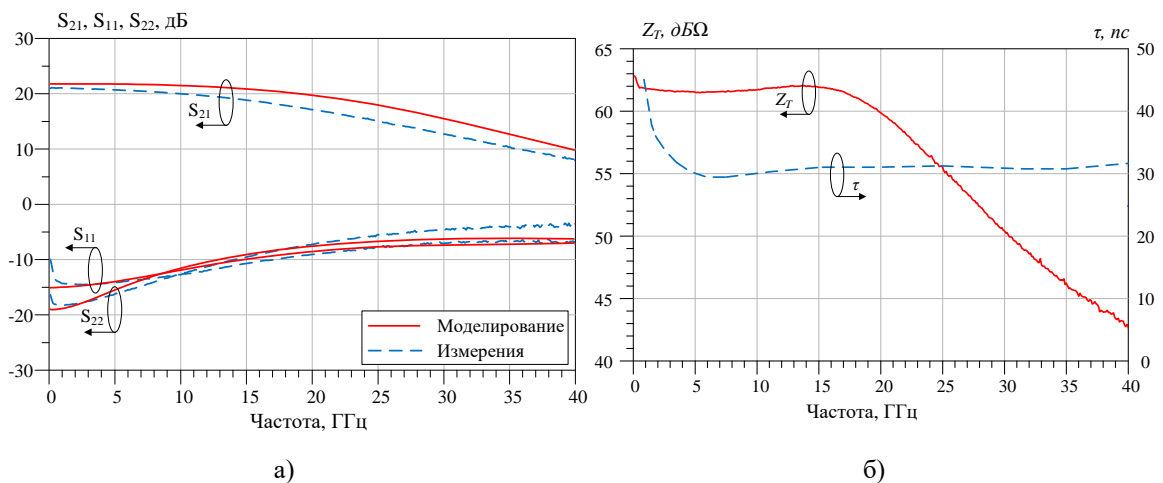


Рисунок 3. Измеренные и смоделированные характеристики дифференциального ТИУ: а)  $S$ -параметры; б) коэффициент трансимпедансного усиления и ГВЗ

В таблице 1 приведены характеристики разработанной МИС дифференциального ТИУ по сравнению с аналогами. Дифференциальные ТИУ, представленные в [1, 2],

обладают более широкой полосой пропускания и меньшим значением шумового тока [1], но при этом значительно большими потребляемой мощностью и габаритами. Наиболее высокочастотным является ТИУ [7], однако он изготовлен по дорогостоящей технологии 32 нм CMOS SOI, причем значение входного шумового тока  $i_n$  довольно высоко. Усилитель [6], выполненный по технологии 0,25 мкм SiGe BiCMOS, обладает лучшей полосой рабочих частот и меньшим значением шумового тока  $i_n$ , но использование индуктивностей для обеспечения согласования привело к увеличению площади чипа до 0.8 мм<sup>2</sup>, что соответственно увеличивает его стоимость. ТИУ, изготовленный на основе процесса 0.18 мкм SiGe BiCMOS [8], имеет меньшие значения потребляемой мощности и шумового тока, но при этом частотная полоса по уровню -3 дБ равна 15 ГГц.

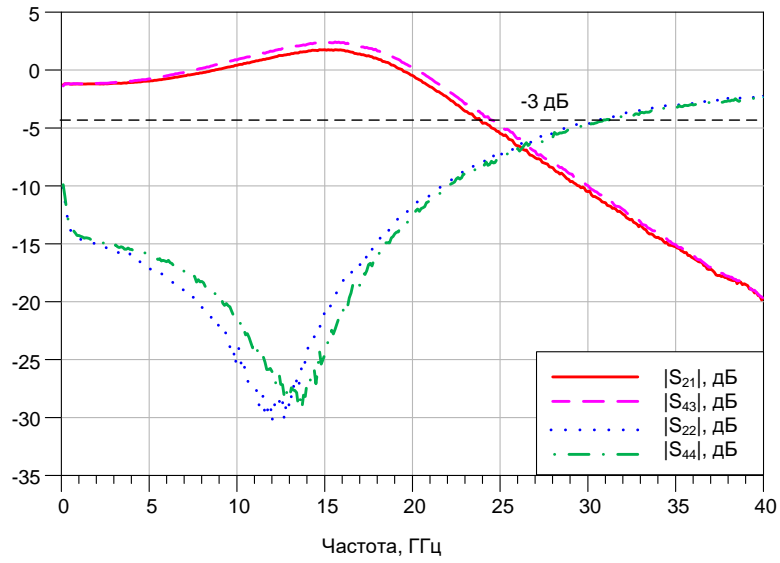
**Таблица 1.** Сравнение характеристик МИС широкополосных ТИУ

Авторы	$\Delta f$ , ГГц	$Z_T$ , дБΩ	$ S_{11} $ , дБ $ S_{22} $ , дБ	$i_n$ , пА/ $\sqrt{\text{Гц}}$	$P_{\text{diss}}$ , мВт	Размер, мм <sup>2</sup>	Технология
Awny [1]	33	74	-	12.2	218	1.5×1.3	0.13 мкм SiGe BiCMOS
Gudriev [2]	34	78	-	-	416	2.5×1.1	0.25 мкм SiGe BiCMOS
Eissa [6]	49	50	-; -6...-20	16.3	73	0.8×1	0.25 мкм SiGe BiCMOS
Chong [7]	72	38	-10...-5; -	84.1	27.6	0.55×0.45	32 нм CMOS SOI
Song [8]	15	60	-8; -10	22	32	0.54×0.55	0.18 мкм SiGe BiCMOS
Данная работа	20	60	-15...-9; -25...-7	35	130	0.7×0.7 0.34×0.4*	0.25 мкм SiGe BiCMOS

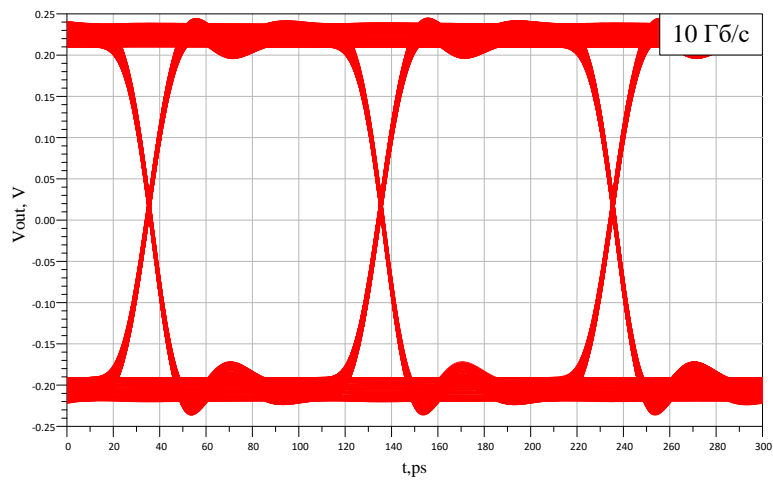
\*без учета контактных площадок

#### 4. Моделирование интегрального оптического приемника на основе фотодиода и дифференциального ТИУ

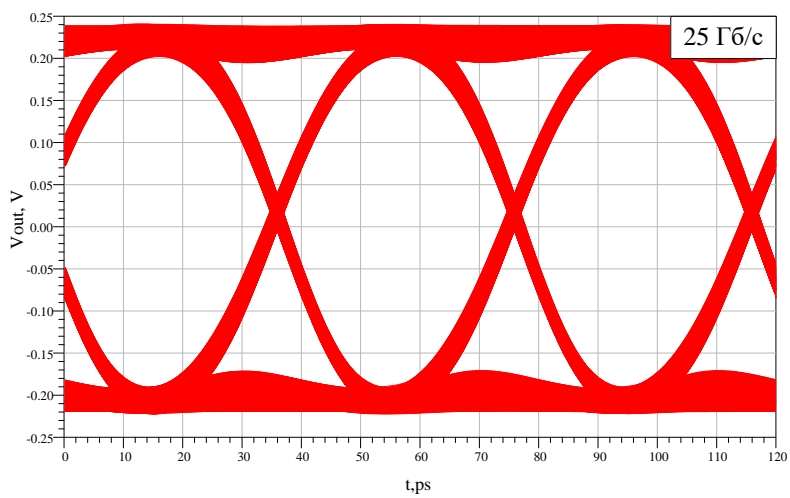
Было выполнено моделирование интегрального оптического приемника, который включает в себя германиевый ФД с полосой пропускания 67 ГГц, разработанный компанией ИНР, и описанный выше дифференциальный ТИУ. Все компоненты приемника (устройство ввода оптического сигнала, оптический волновод, ФД и ТИУ) могут быть изготовлены на одном чипе на основе единого кремниевого технологического процесса EPIС, который совмещает в себе 0,25 мкм SiGe BiCMOS технологию для микроэлектронных устройств и SOI технологию для оптических/оптоэлектронных устройств. При моделировании приемника были использованы измеренные на зондовой станции 4-портовые S-параметры МИС дифференциального ТИУ, а также оптоэлектронные S-параметры ФД при напряжении смещения -2 В, предоставленные компанией ИНР. Для моделирования соединительных разварочных проволочек, имеющих на выходе ТИУ, они были представлены в виде последовательно включенных индуктивностей порядка 0,3 нГн. На рисунке 4а показаны смоделированные коэффициенты передачи ( $|S_{21}|$ ,  $|S_{43}|$ ) и отражения по выходу ( $|S_{22}|$ ,  $|S_{44}|$ ) оптического приемника. На рисунке 4б,в изображены результаты моделирования глазковой диаграммы приемника при подаче на его вход последовательности со скоростью 10 Гб/с и 25 Гб/с, соответственно. При моделировании интегральный ФД представлен в виде эквивалентной RC-цепочки ( $R = 5 \text{ Ом}$ ,  $C = 50 \text{ фФ}$ ).



а)



б)



в)

**Рисунок 4.** Смоделированные характеристики интегрального оптического приемника: а) коэффициенты передачи и отражения по выходу; б) глазковая диаграмма одного канала при скорости передачи 10 Гб/с и 25 Гб/с

Как видно из рисунка 4а, полоса пропускания интегрального оптического приемника с разработанным дифференциальным ТИУ составляет 24 ГГц, что достаточно для передачи цифровых данных со скоростью не менее 25 Гб/с.

## 5. Заключение

В статье представлены разработка и экспериментальное исследование ИС дифференциального ТИУ диапазона DC-20 ГГц для оптического приёмника на основе 0.25 мкм SiGe BiCMOS технологии. Измеренные зондовым способом характеристики ИС ТИУ: коэффициент усиления  $|S_{21}| = 17-20$  дБ, коэффициент трансимпедансного усиления  $Z_T = 60-62$  дБ·Ω в полосе до 20 ГГц, потребляемый ток составляет 47 мА при напряжениях питания 2.5 В и 3.3 В, размер микросхемы 0.7×0.7 мм<sup>2</sup> (0.34×0.4 мм<sup>2</sup> без учета контактных площадок). Результаты моделирования однокристалльного интегрального оптического приемника в составе германиевого фотодиода и дифференциального ТИУ показывают, что его полоса пропускания составляет 24 ГГц, что достаточно для передачи цифровых данных со скоростью не менее 25 Гб/с.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Уникальный идентификатор 8.4029.2017/4.6.

### Список литературы

1. Awny, A. A Linear Differential Transimpedance Amplifier for 100-Gb/s Integrated Coherent Optical Fiber Receivers / A. Awny [at al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2018. — Vol. 66. — P. 973-986.
2. Gudriev, S. Coherent ePIC Receiver for 64 GBaud QPSK in 0.25 μm Photonic BiCMOS Technology / S. Gudriev // Journal of Lightwave Technology. — 2019. — Vol. 37. — P. 103-109.
3. Ahmed, A.H. A 6 V Swing 3.6% THD >40 GHz Driver with 4.5×Bandwidth Extension for a 272 Gb/s Dual-Polarization 16-QAM Silicon Photonic Transmitter / A.H.Ahmed, [at al.] // IEEE International Solid-State Circuits Conference. — 2019. — P. 484-486.
4. Yao, J. Microwave photonics / J. Yao // Journal of Lightwave Technology. — 2009. — Vol. 27. — P. 314-335.
5. Analui, B. A Fully Integrated 20-Gb/s Optoelectronic Transceiver Implemented in a Standard 0.13 μm CMOS SOI Technology / B. Analui [at a;.] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. — 2006. — Vol. 41. — P. 2945-2955.
6. Eissa, M.H. A Wideband Monolithically Integrated Photonic Receiver in 0.25 μm SiGe:C BiCMOS Technology / M.H. Eissa [at al.] // 42nd European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC Conference 2016). — 2016. — P. 487-490.
7. Song, S. Wideband SiGe BiCMOS transimpedance amplifier for 20 Gb/s optical links / S. Song [at al.] // IEICE Electronic Express. — 2015. — Vol. 12. — P. 1-8.
8. Chong, J. A 100 Gb/s transimpedance amplifier with diode-connecting input-resistance-reduction in 32 nm CMOS technology / J.Chong [at al.] // 2015 IEEE 58th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). — 2015. — P. 1-4.