

УДК 537.86, 621.396

PACS: 85.60.Gz

## Фотоприемник с интегрированным малошумящим усилителем X-диапазона

И. В. Юнусов, А. В. Кондратенко, В. С. Арыков, М. В. Степаненко, П. Е. Троян

*Приведены результаты разработки модуля фотоприемника с интегрированным малошумящим усилителем (МШУ) электрического сигнала. Использование фотодетектора на основе коммерческого фосфид-индиевого фотодиода и специально разработанной переходной платы обеспечило возможность использования оптической несущей с длиной волны 1,31 и 1,55 мкм и выполнения оптоэлектронного преобразования электрического сигнала в диапазоне частот от 0 до 50 ГГц. Разработанный и интегрированный в модуль бескорпусной малошумящий усилитель на основе арсенида галлия позволил компенсировать потери преобразования фотодиода в X-диапазоне частот с минимальным добавочным шумом. Модуль фотоприемника предназначен для использования в качестве приемной части радиофотонного тракта, который обеспечивает существенное расширение дальности передачи сверхвысокочастотного сигнала по сравнению с классическими типами линий передачи (к примеру, коаксиальной или волноводной).*

*Ключевые слова:* фотоприемник, малошумящий усилитель, радиофотонный тракт.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-6-41-46

### Введение

Современные волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП) используются для передачи цифрового и аналогового сигналов. Благодаря бурному развитию телекоммуникаций цифровые ВОЛП стандартизованы и коммерчески доступны. ВОЛП для передачи аналогового сигнала [1–4] получили меньшее распространение и являются, по большей части, за-

меной классических линий передачи электрического сигнала. В некоторых применениях аналоговые ВОЛП обладают по сравнению с коаксиальными линиями передачи такими преимуществами, как малый вес и малая толщина оптоволокна, низкие погонные потери сигнала вне зависимости от частоты модуляции, а также помехозащищенность. Аналоговые ВОЛП позволяют осуществлять передачу полезного сигнала (связь удаленной антенны с устройством обработки), а также решать задачи метрологии и тестирования, например, позволяют передавать на расстояния до нескольких километров сигналы с шириной спектра десятки и сотни гигагерц, повышать эффективность измерений сверхвысокочастотных (СВЧ) характеристик движущегося объекта при неподвижном измерительном оборудовании, создавать линии задержки сигнала и пр.

В настоящей работе авторы приводят результаты разработки фотоприемника для аналоговой ВОЛП X-диапазона частот. Характеристики фотоприемника во многом определяют характеристики ВОЛП. Особенностью оптоэлектронного преобразования в фотопри-

---

**Юнусов Игорь Владимирович**, в.н.с., к.т.н.

E-mail: igor.v.yunusov@yandex.ru

**Кондратенко Алексей Владимирович**, м.н.с.

E-mail: avk.design.team@gmail.com

**Арыков Вадим Станиславович**, в.н.с., к.т.н.

E-mail: arykov.v@ir-mw.com

**Степаненко Михаил Валерьевич**, в.н.с.

E-mail: stepanenko.m@ir-mw.com

**Троян Павел Ефимович**, в.н.с., д.т.н.

E-mail: tpe@tusur.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина 40.

Статья поступила в редакцию 01 ноября 2021 г.

---

© Юнусов И. В., Кондратенко А. В., Арыков В. С., Степаненко М. В., Троян П. Е., 2021

емнике является то, что его коэффициент передачи зависит от мощности оптического сигнала: чем выше оптическая мощность, тем больше коэффициент передачи. Наилучшие значения коэффициента передачи и коэффициента шума ВОЛП могут быть получены при использовании в составе фотоприемника фотодиода, который способен преобразовывать оптический сигнал высокой мощности, функционируя при этом в линейном режиме [5, 6]. Увеличение коэффициента передачи возможно также за счет усиления электрического сигнала непосредственно после демодуляции. При этом интеграция усилителя позволяет сделать модуль более компактным и недорогим, а также способствует минимизации суммарного коэффициента шума тракта.

### Разработка МШУ

МШУ был выполнен в виде монолитной интегральной схемы (МИС), изготовленной на основе технологического процесса PL15-12 фабрики WIN Semiconductors (Тайвань). Выбранный активный элемент данного процесса (периферия затвора  $4 \times 75$  мкм) на частоте 10 ГГц характеризуется минимальным коэффициентом шума 0,3 дБ и коэффициентом усиления в режиме двухстороннего согласования 15,9 дБ. На рис. 1 приведена фотография кристалла разработанной МИС (габаритные размеры  $1900 \times 1200$  мкм).

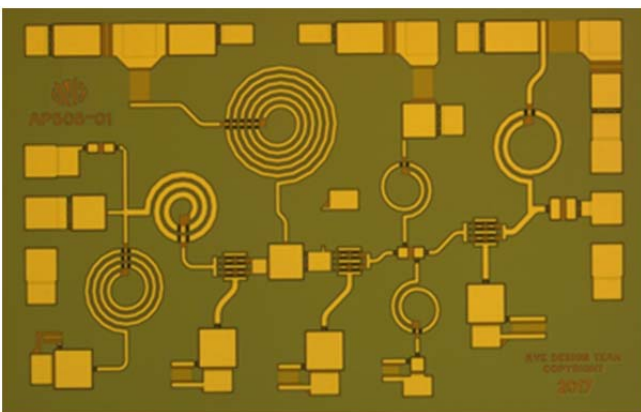


Рис. 1. Фотография МИС МШУ.

Усилитель содержит три каскада на основе транзисторов с высокой подвижностью электронов с интегрированными цепями согласования, коррекции амплитудно-частотной

характеристики, а также ввода и блокировки питания. Во всех каскадах применено классическое решение – последовательная обратная связь в виде высокоомного отрезка линии передачи в истоке транзистора. В первом каскаде величина обратной связи выбиралась исходя из реализации устойчивости и сближения условия оптимального согласования по шуму и условия комплексно-сопряженного согласования на входе транзистора. Выбор величины обратной связи во втором каскаде снова диктовался достижением устойчивости, а также необходимостью трансформации входного импеданса транзистора второго каскада для возможности реализации согласующей цепи между первым и вторым каскадом с минимальным количеством элементов. Введение обратной связи в третьем каскаде позволило добиться равномерности коэффициента усиления и согласования выхода МИС в рабочем диапазоне частот. Для организации требуемого режима по постоянному току во всех каскадах применена схема автосмещения.

Напряжение питания однополярное 5 В, номинальный ток потребления составляет 75 мА. Выходная мощность при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ составляет приблизительно 14 дБм. Данное значение в совокупности с коэффициентом усиления МШУ равным 23–25 дБ обеспечивает линейность усиления сигнала, поступающего на вход МШУ от платы с фотодиодом при всех допустимых уровнях мощности оптического излучения на входе фотодиода (коэффициент амплитудной модуляции оптического сигнала не превышает 70 % для обеспечения работы электрооптического модулятора в линейном режиме).

### Разработка модуля фотоприемника

Модуль фотоприемника включает кристалл фотодиода, переходную плату, МШУ и низкочастотные цепи питания (рис. 2).

Спектральный диапазон чувствительности установленного фотодиода на основе фосфида индия позволяет использовать фотоприемник для демодуляции сигнала с оптической несущей с длиной волны 1,31 и 1,55 мкм. Максимальная мощность оптического излучения на входе фотодиода (в непрерывном ре-

жиме) составляет 10 дБм, токовая чувствительность – не хуже 0,6 А/Вт.

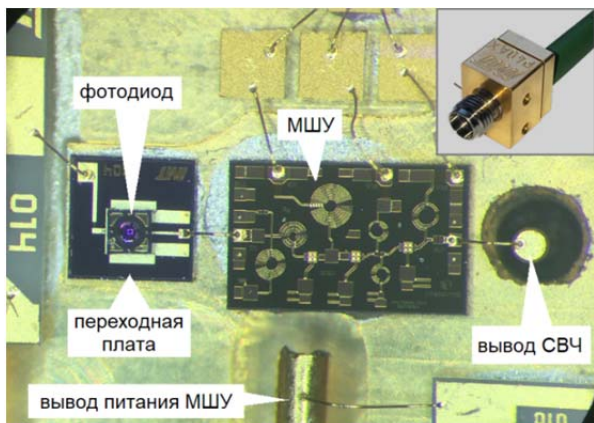


Рис. 2. Внешний вид модуля фотоприемника и его элементов.

Фотодиод устанавливается на специально разработанную переходную плату, выполненную на основе арсенида галлия. Плата представляет собой цепи ввода питания и согласования фотодиода, включающие тонкопленочные конденсаторы и резисторы. СВЧ выход платы с установленным фотодиодом согласован на сопротивление 50 Ом в широком диапазоне частот, что обеспечило низкий коэффициент отражения от выхода платы (не хуже минус 20 дБ в диапазоне частот до 30 ГГц).

Элементы фотоприемника были смонтированы в герметичный металлический корпус. Габаритные размеры корпуса составляют  $11 \times 13 \times 10 \text{ мм}^3$  без учета выводов питания, хвостовика ввода оптического излучения и СВЧ разъема.

Частотные характеристики модуля были измерены с использованием стенда, включающего источник лазерного излучения Pure Photonics PPCL550 (длина волны излучения 1550 нм), электрооптического модулятора IXBlue MXAN-LN-40 на основе интерферометра Маха-Цендера, векторного анализатора цепей Anritsu MS46122B и калибровочного модуля Anritsu MN4765B. Стенд представлял собой аналоговую ВОЛП с внешней модуляцией, к входу и выходу которую подключен векторный анализатор цепей. Методика измерения частотных характеристик состояла из двух шагов. На первом шаге выполнялось измерение характеристик ВОЛП, в которой в качестве фотоприемника использовался калибровочный модуль, и вычислялись параметры рассеяния электрооптического модуля-

тора. На втором шаге выполнялось измерение характеристик ВОЛП, в которой в качестве фотоприемника использовался изготовленный модуль. С использованием частотных характеристик параметров рассеяния электрооптического модулятора вычислялись частотные характеристики нормализованного коэффициента преобразования по мощности, а также модуль коэффициента отражения от выхода изготовленного модуля фотоприемника.

### Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлен график, демонстрирующий корреляцию расчетных и экспериментальных результатов для частотных зависимостей коэффициента усиления, модулей коэффициентов отражения от входа и выхода, а также коэффициента шума МИС МШУ. Качество модельной базы в библиотеке элементов используемого процесса WIN Semiconductors, верифицированные подходы к проектированию, а также стабильность технологического процесса позволили получить данный результат сразу после первой итерации изготовления МИС.

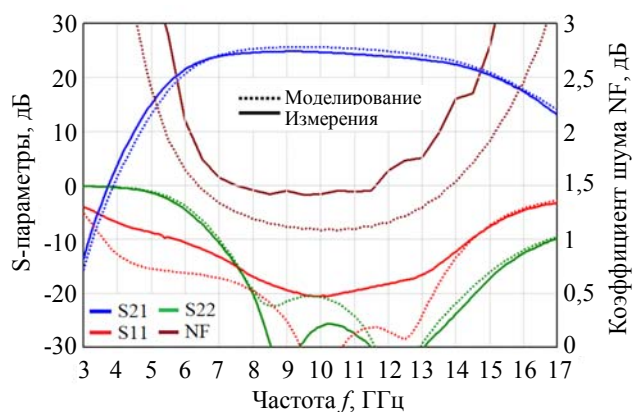


Рис. 3. Частотные зависимости характеристик МШУ.

На рис. 4 приведены экспериментальные частотные зависимости нормированного коэффициента оптоэлектронного преобразования и частотные зависимости модуля коэффициента отражения от выхода изготовленного модуля фотоприемника. Для сравнения приведены зависимости для разработанного фотоприемника, а также для базовой версии фотоприемника без интегрированного МШУ. В табл. 1 приведены параметры разработанного фотоприемника.

Зависимости (рис. 4) позволяют утверждать следующее: 1) сборка, состоящая из фотодиода и переходной платы демонстрирует высокую равномерность частотной зависимости нормированного коэффициента оптоэлектронного преобразования, а также низкий коэффициент отражения от выхода в целевом диапазоне частот; 2) интеграция разработанного МШУ позволяет увеличить коэффициент

преобразования в X-диапазоне на величину, близкую к собственному коэффициенту усиления МИС; 3) снижение коэффициента усиления модуля и повышение его коэффициента отражения по выходу относительно ожидаемых значений обусловлены, по всей видимости, качеством сборки и могут быть нивелированы в дальнейшем.

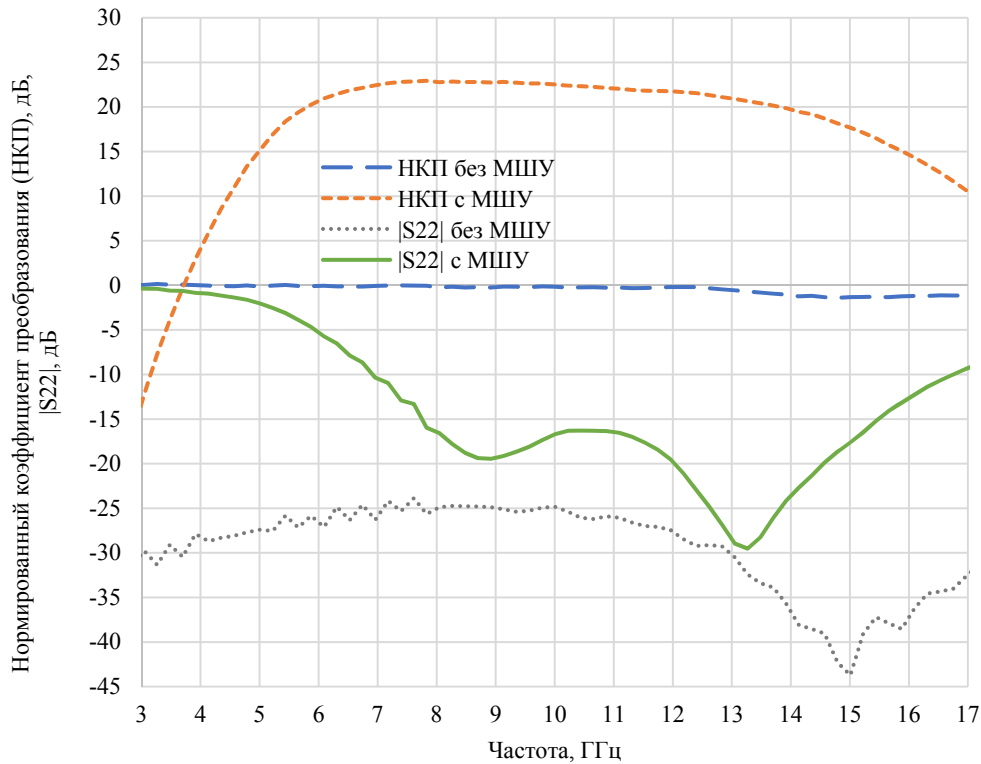


Рис. 4. Частотные зависимости характеристик модулей фотоприемников

Таблица 1

Параметры разработанного модуля фотоприемника (при нормальных условиях)

Параметр	Обозн.	Условия	Значение	Ед. изм.
Диапазон длин волн оптического излучения	$\lambda$		1260–1620	нм
Максимальная мощность оптического излучения	$P_{\text{опт макс}}$		10	дБм
Токсовая чувствительность фотодиода	$S$	$\lambda = 1310$ нм	0,65	А/Вт
		$\lambda = 1550$ нм	0,60	
Коэффициент отражения оптического сигнала	$K_{\text{отр опт}}$		минус 40	дБ
Диапазон рабочих частот	$\Delta f$	$\lambda = 1550$ нм $P_{\text{опт}} = 0$ дБм	8–12	ГГц
Коэффициент усиления МШУ	$K_{\text{у}}$	$f = (8-12)$ ГГц	23–25	дБ
Коэффициент шума МШУ	$NF$		1,5	дБ
Модуль коэффициента отражения от выхода модуля, не хуже	$ S_{22} $		минус 10	дБ
Темновой ток фотодиода	$I_{\text{т}}$		10	нА
Напряжение питания модуля	$U_{\text{пит}}$		5	В
Ток потребления модуля	$I_{\text{пит}}$		75	мА

## Заключение

В результате проведенной работы были созданы микросхема МШУ, переходная плата для СВЧ фотодиода и модуль фотоприемника X-диапазона частот. Энергетические характеристики МШУ согласованы с параметрами фотодиода. Разработанный модуль характеризуется низким током потребления, однополярным питанием 5 В для МШУ и для смещения фотодетектора, а также небольшими размерами.

Направления дальнейшего развития работы включают: 1) разработку модуля фотоприемника с мощным фотодиодом, что позволит использовать более мощный лазер, повысить коэффициент передачи и понизить коэффициент шума; 2) разработку модуля лазерного передатчика, включающего источник лазерного излучения, модулятор и предусилитель СВЧ-сигнала на основе разработанного МШУ, что в итоге позволит создать эффективную и компактную аналоговую ВОЛП X-диапазона с эквивалентным коэффициентом передачи более 10 дБ.

*Работа выполнена коллективом научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения №075-03-2020-237/1 от 5 марта 2020 г. (внутренний номер проекта FEWM-2020-0040). Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» (регистрационный номер 200568).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Seeds A. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2002. Vol. 50. № 3. P. 877.
2. Cox C. Analog Optical Links. – Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004.
3. Cox C., Ackerman E., Betts G., Prince J. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2006. Vol. 54. № 2. P. 906.
4. Yao J. // J. Lightwave Technol. 2009. № 27. P. 314.
5. Kato K. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1999. Vol. 47. № 7. P. 1265.
6. Tulchunsky D., Li X., Li N., Demiguel S., Campbell J., Williams K. // IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. 2004. Vol. 10. № 4. P. 702.
7. Текшеев В. Б., Плигин С. Г. // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника. 1994. № 2(462). С. 19.
8. Ди Лоренцо Д. В. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления. – М.: Радио и связь, 1988.

PACS: 85.60.Gz

## A photoreceiver with an integrated X-band low-noise amplifier

*I. V. Yunusov, A. V. Kondratenko, V. S. Arykov, M. V. Stepanenko, and P. E. Troyan*

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40 Lenina prospect, Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: igor.v.yunusov@yandex.ru

*Received November 01, 2021*

*The paper presents development results for a photodetector module with an integrated low-noise amplifier. The photodetector is based on a commercial indium-phosphide photodiode and a custom-designed adapter board and allows to use an optical carrier with wavelengths of 1.31 and 1.55  $\mu\text{m}$  and performs optoelectronic conversion for electrical signals into 0–50 GHz range. The developed gallium arsenide low-noise amplifier is used to compensate photodiode conversion loss in the X-band frequency range. The photodetector module is intended for use as a microwave photonic link receiver, which provides a significant extension of the signal transmission range in comparison with classical types of transmission lines.*

*Keywords:* photoreceiver, low-noise amplifier, microwave photonic link.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-6-41-46

#### REFERENCES

1. A. Seeds, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **50** (3), 877 (2002).
2. C. Cox, *Analog Optical Links* (Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004).
3. C. H. Cox, E. I. Ackerman, G. E. Betts, and J. L. Prince, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **54** (2), 906 (2006).
4. Jianping Yao, *J. Lightwave Technol.* No. 27, 314 (2009).
5. K. Kato, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** (7), 1265 (1999).
6. D. Tulchunsky, X. Li, N. Li, S. Demiguel, J. Campbel, and K. Williams, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron* **10** (4), 702 (2004).
7. V. B. Tekshev, *Elektronnaya tehnika. Ser. SVCH-tehnika*, No. 2(462), 19 (1994).
8. J. V. Dilorenzo and D. D. Khandelwal, *Gallium Arsenide Field Effect Transistor Principles and Technology* (Artech House, 1982; Radio i Svyaz, Moscow, 1988).