

УДК 621.373.826, 621.376.2

И.В. Юнусов, В.С. Арыков, М.В. Степаненко, Г.Г. Жук, Д.П. Аргунов, А.А. Шейнбергер

## Сверхширокополосный электрооптический модулятор с интегрированным источником излучения

Приведены результаты оптимизации конструкции микросборки сверхширокополосного электрооптического модулятора с интегрированным лазерным диодом для её использования в составе оптической приставки для анализа параметров компонентов высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи аналогового и цифрового сигналов. Также данное изделие может быть использовано для модуляции цифрового сигнала на длине волны оптической несущей 1,31 мкм. В результате оптимизации конструкции микросборки сверхширокополосного электрооптического модулятора диапазон его рабочих частот расширен до 27 ГГц по уровню  $-3$  дБ. Максимальная мощность оптического излучения интегрированного лазера микросборки превышает 10 мВт при токе потребления 90 мА.

**Ключевые слова:** электрооптический модулятор, микросборка.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2024-27-3-25-29

Одной из основных задач при создании высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи данных (ВОСП) является измерение частотных характеристик электрооптического преобразования передатчика и оптоэлектронного преобразования приемника. Для измерения данных характеристик используются векторные анализаторы цепей с оптическими приставками, которые включают передающий и приемный модуль с известными заранее характеристиками [1]. Технически приставка представляет собой ВОСП аналогового сигнала [2–5], для которой выполнена калибровка трактов передатчика и приемника. Использование передающего модуля приставки позволяет выполнять измерение характеристик приемной части ВОСП, а приемный модуль приставки позволяет выполнять измерение параметров передающей части ВОСП. Использование одновременно передающего и приемного модуля приставки позволяет также измерять характеристики устройств с оптическими входами и выходами.

Основой передающего модуля приставки (передатчика) являются источник излучения и модулятор, выполняющие функцию формирования модулированного оптического сигнала. Существует два пути конструктивной реализации передатчика. В первом случае используются отдельные корпусированные модули лазера и модулятора. Во втором – единое устройство, выполненное по принципу монолитной или гибридно-монолитной интеграции, что позволяет получить более компактное и недорогое техническое решение.

Ранее авторами была разработана микросборка сверхширокополосного электрооптического модулятора с рабочей частотой до 18–20 ГГц [6], а также определены направления дальнейших работ, в частности, расширение диапазона рабочих частот до 40 ГГц.

Целью настоящей работы является оптимизация конструкции микросборки электрооптического модулятора с интегрированным источником излучения для расширения диапазона её рабочих частот и использования в качестве основного функционального блока передатчика оптической приставки.

### Конструкция микросборки модулятора

Схема электрическая принципиальная микросборки приведена на рис. 1. Микросборка имеет СВЧ-вход, который также используется для подачи постоянного смещения на электроабсорбционный модулятор (ЭАМ) VD1, RC-цепь, вывод питания лазерного диода VD2, вывод смещения и контроля тока мониторингового фотодиода VD3, а также общий вывод. Элементы, входящие в кристалл ЭАМ с интегрированным лазером, помещены на рис. 1 в прямоугольник с пунктирной границей.

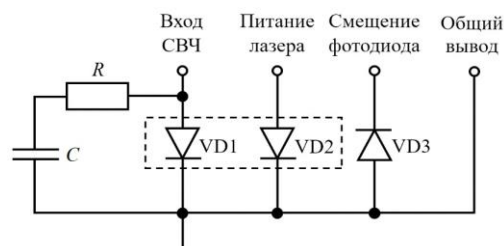


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная микросборки: VD1 – ЭАМ; VD2 – встроенный в ЭАМ лазерный диод; VD3 – мониторинговый фотодиод

При разработке топологии платы микросборки она была условно поделена на высокочастотную часть и низкочастотную часть. Высокочастотная часть платы включает себя сверхвысокочастотную (СВЧ) линию передачи до микросхемы ЭАМ (включая разварочные проволочки), интегрированный тонкопленочный резистор и керамический конденсатор, а также разводку общего контакта платы под микросхемой ЭАМ и керамическим конденсатором. Низкочастотная часть включает подводящие линии питания лазера VD2 и мониторингового фотодиода VD3, а также сам фотодиод.

### Проектирование микросборки модулятора

При проектировании микросборки основное внимание уделялось высокочастотной части платы. Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе был выполнен упрощенный аналитический расчет, на втором этапе – моделирование с применением электромагнитного анализа.

Для контроля температуры микросборки необходимо предусмотреть ее размещение на элементе Пельтье. В связи с этим отсутствует возможность реализации микрополосковой линии передачи с металлизацией оборотной стороны платы. Поэтому в качестве линии передачи выбрана копланарная линия. Линия передачи располагается на диэлектрической подложке из AlN. В электрической схеме для учёта ёмкости диода ЭАМ включён идеальный конденсатор, одна из обкладок которого заземлена. СВЧ-характеристики керамического конденсатора в электрической схеме учитываются на основе параметров рассеяния, предоставленных производителем. Результаты моделирования приведены на рис. 2.

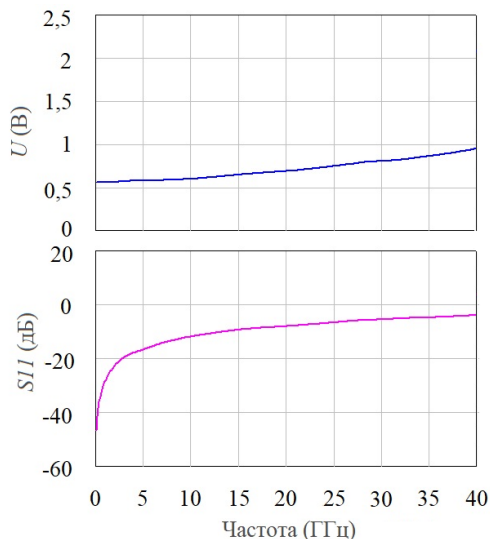


Рис. 2. Частотные зависимости, полученные в результате аналитического расчёта модели микросборки: зависимость амплитуды напряжения на ЭАМ (сверху); зависимость модуля коэффициента S11 от СВЧ-входа (снизу)

Амплитуда напряжения на диоде модулятора монотонно увеличивается с ростом частоты в требуемом частотном диапазоне: от 0 до 40 ГГц. Рост амплитуды напряжения на диоде связан с изменением импеданса цепи, состоящей из проволоочки, идущей от микросхемы лазера на RC-цепь. С ростом частоты модуль импеданса данной цепи растёт, что позволяет компенсировать частотные потери амплитуды напряжения на диоде модулятора. При этом коэффициент отражения от СВЧ-входа микросборки возрастает.

При проведении электромагнитного анализа некоторые элементы и компоненты платы были рассмотрены в качестве сосредоточенных элементов и упрощенных моделей (диод электроабсорбционного модулятора, разварочные проволоочки) и включены в аналитическую модель наряду с электромагнитной моделью высокочастотной части платы.

Диэлектрические материалы модели платы заданы в виде стека из слоя воздуха толщиной 500 мкм и слоя диэлектрика AlN толщиной 450 мкм. Металлизация на поверхности диэлектрика выполнена из золота толщиной 6 мкм. Удельное сопротивление резистивной пленки согласующего тонкопленочного резистора составляет 20 Ом/кв.

В связи с требованиями по подключению платы разварочными проволочками на лицевую сторону платы в одной плоскости, были рассмотрены два варианта конфигурации СВЧ-линии на плате: копланарная и щелевая. Анализ результатов расчета показал, что сборка с щелевой линией имеет более равномерную частотную характеристику напряжения. Копланарная линия демонстрирует наличие резонанса в полосе рабочих частот, предположительно связанного с задержкой протекания тока в заземленной линии, приводящей к изменению фаз распространения сигнала в сигнальной и заземленной линии. Таким образом, была разработана плата на AlN микросборки с щелевой линией передачи СВЧ-сигнала.

Внешний вид изготовленной микросборки на разработанной плате из AlN представлен на рис. 3. Габаритные размеры платы составляют 1,76×1,70 мм<sup>2</sup>, толщина – 0,25 мм.

СВЧ-линия передачи выполнена на основе двухслойной металлизации Cu + Au и имеет конфигурацию «щелевая линия» с волновым сопротивлением 50 Ом.

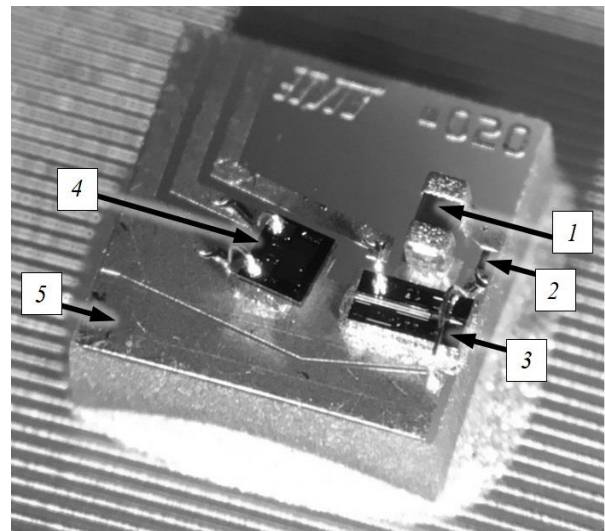


Рис. 3. Фотография установленной в корпус микросборки: 1 – блокировочная емкость; 2 – согласующий резистор; 3 – ЭАМ с интегрированным лазерным диодом; 4 – мониторинговый фотодиод; 5 – металлизированная разводка СВЧ-платы

По сравнению с представленным ранее результатом, описанным в [6], топология платы была переработана с целью уменьшения влияния размеров блокировочного конденсатора и необходимых для его монтажа площадок. В качестве блокировочной емкости был применен конденсатор с типоразмером 01005 с размерами 0,4×0,2×0,2 мм<sup>3</sup> (ранее использовался 0402) емкостью 100 нФ. Сформированная RC-цепь на СВЧ-входе необходима для согласования по СВЧ-сигналу, а также для блокировки постоянной составляющей смещения на ЭАМ.

ЭАМ с интегрированным лазерным диодом с длиной волны излучения 1,31 мкм выполнен на подложке InP. Его паспортная максимальная рабочая частота превышает 45 ГГц.

Мониторный фотодиод выполнен также в виде отдельного кристалла на основе InGaAs на подложке InP и обеспечивает обратную связь, детектируя оптическое излучение лазера.

#### Измерение характеристик микросборки и обсуждение результатов

Для измерения передаточной характеристики модулятора был собран измерительный стенд, состоящий из лабораторных источников напряжения, задающих режим работы элементов микросборки, приборов для измерения тока и напряжения, а также системы сбора и измерения оптической мощности излучения.

Система сбора и измерения оптической мощности излучения лазера состояла из одномодового оптоволоконна SMF-28 с сформированной на торце принимающей излучение микролинзой и подключенного к измерителю оптической мощности PM20CH (Thorlabs, США). Для совмещения полупроводникового волновода ЭАМ и фокуса микролинзы линованный торец оптоволоконна был установлен в микропозиционер наноразмерной точности MAX609/M (Thorlabs, США).

Измеренное максимальное значение оптической мощности излучения лазера ЭАМ превышает 10 мВт при питающем токе лазерного диода 90 мА. Измеренное значение соответствует паспортным характеристикам кристалла ЭАМ.

Для определения рабочего диапазона напряжений, в котором ЭАМ имеет наибольший коэффициент преобразования, была измерена его передаточная характеристика (рис. 4).

Наибольшая крутизна измеренной передаточной характеристики наблюдается в диапазоне напряжений на ЭАМ минус (1,3–1,7) В. Указанный диапазон соответствует снижению выходной мощности относительно состояния без подачи напряжения на ЭАМ в два раза. Исходя из измерений, оптимальная рабочая точка смещения ЭАМ была выбрана равной –1,5 В.

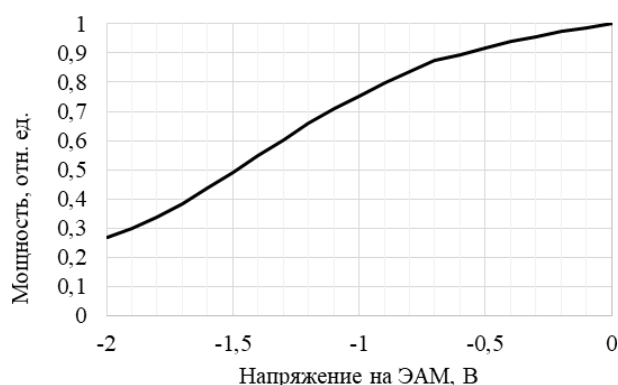


Рис. 4. Передаточная характеристика микросборки сверхширокополосного ЭАМ

Для определения частотных характеристик нормализованного коэффициента передачи по мощности векторным анализатором цепей MS46122B-043 (Anritsu, США) с калибровочным модулем O/E MN4765B (Anritsu, США) измерялись частотные характеристики параметров рассеяния микросборки. Подача постоянного напряжения смещения на ЭАМ осуществлялась через коаксиальный широкополосный инжектор питания K251 (Anritsu, США).

На рис. 5 приведены полученные частотные зависимости нормированного коэффициента передачи сигнала по мощности — кривая 1 и модуля коэффициента отражения сигнала от входа микросборки — кривая 2. При проведении измерений напряжение смещения на ЭАМ соответствовало определенной оптимальной рабочей точке –1,5 В, а величина тока лазерного диода составляла 40 мА. При установленном токе лазера 40 мА фототок мониторингового фотодиода составлял около 0,83 мА. Для проведения сравнительного анализа на рис. 5 также приведена частотная зависимость нормированного коэффициента передачи по мощности для микросборки модулятора предыдущей конструкции, описанной в [6] (кривая 3).

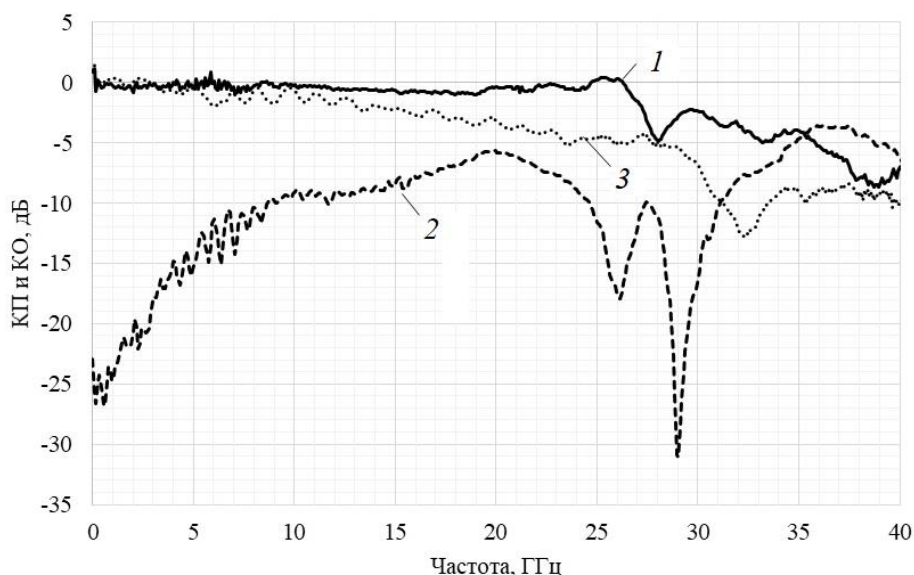


Рис. 5. Частотная зависимость нормированного коэффициента передачи (КП) по мощности и модуля коэффициента отражения (КО) от входа микросборки: 1 — КП; 2 — КО; 3 — КП для результата, описанного в [6]

Анализ приведенных на рис. 5 частотных зависимостей микросборки оптимизированной конструкции показывает, что:

1) нормированный коэффициент передачи по мощности (кривая 1) снижается на 3 дБ относительно низкочастотного значения на частоте 27–28 ГГц, при этом функциональность микросборки с некоторым снижением коэффициента передачи сохраняется вплоть до 40 ГГц;

2) модуль коэффициента отражения СВЧ-сигнала от входа микросборки во всей полосе рабочих частот не превышает минус 6 дБ;

3) нормированный коэффициент передачи по мощности (кривая 1) имеет значительно более высокую равномерность в диапазоне частот до 26 ГГц по сравнению с ранее опубликованным результатом (кривая 3);

4) диапазон рабочих частот микросборки увеличен с 18–20 до 26–27 ГГц по уровню –3 дБ по сравнению с предыдущим результатом [6].

Улучшение результатов, указанных в последних двух пунктах, связывается, в первую очередь, с переработкой топологии платы и использованием конденсатора меньшего типоразмера.

#### Заключение

В результате проведенной работы был разработан, изготовлен и исследован сверхширокополосный электрооптический модулятор с интегрированным источником излучения. В результате оптимизации топологии и использования конденсатора меньшего размера удалось значительно повысить рабочую частоту микросборки, что позволит успешно использовать ее до частоты 40 ГГц в составе модуля передатчика оптической приставки. Кроме того, полученный модулятор может быть использован для модуляции цифрового сигнала в одном из форматов амплитудной модуляции.

Направления дальнейшего развития работы включают непосредственно разработку и сборку модуля передатчика оптической приставки.

Работа выполнена в рамках проекта FEWM 2024-0004.

#### Литература

1. Wong R.W. High-Speed Lightwave Component Analysis to 20 GHz / R.W. Wong, P.R. Hernday, D.R. Harkins // HP Journal. – 1991. – Vol. 42, No. 1. – P. 6–13.
2. Seeds A. Microwave photonics // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2002. – Vol. 50, No. 3. – P. 877–887.
3. Cox C. Analog Optical Links. – Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004. – P. 1–18.
4. Limits on the Performance of RF-Over-Fiber Links and Their Impact on Device Design / C. Cox, E. Ackerman, G. Betts, J. Prince // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2006. – Vol. 54, No. 2. – P. 906–920.
5. Yao J. Microwave Photonics // J. Lightwave Technol. – 2009. – No. 27. – P. 314–335.
6. Микросборка сверхширокополосного электрооптического модулятора с интегрированным источником излучения / И. Юнусов, В. Арыков, М. Степаненко, Ю. Жидик, К. Петрухин, С. Иваничко, А. Майкова, М. Филюшин // Прикладная физика. – 2024. – № 1. – С. 91–95.

#### Юнусов Игорь Владимирович

Канд. техн. наук, вед. н.с. лаб. интегральной оптики и радиофотоники (ЛИОР)  
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61  
Эл. почта: igor.v.yunusov@yandex.ru

#### Арыков Вадим Станиславович

Канд. техн. наук, директор ООО «Ай Эм Тех», г. Томск; вед. н.с. ЛИОР ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61  
Эл. почта: arykov.v@ir-mw.com

#### Степаненко Михаил Валерьевич

Науч. сотр. ЛИОР ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61  
Эл. почта: stepanenko.m@ir-mw.com

#### Жук Григорий Григорьевич

Аспирант каф. радиоэлектроники и систем связи (РСС), м.н.с. ЛИОР ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-8929-2833  
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61  
Эл. почта: grigoriy26.04@mail.ru

#### Аргунов Дмитрий Пантелеевич

Мл. н.с. ЛИОР ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Инженер-программист АО «НИИПП»  
Красноармейская ул., 99а, г. Томск, Россия, 634034  
ORCID: 0000-0002-8828-4014  
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61  
Эл. почта: argunov\_dp@niipp.ru

#### Шейнбергер Анна Андреевна

Мл. н.с. ЛИОР ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61  
Эл. почта: annasejnberger@gmail.com

Yunusov I.V., Arykov V.S., Stepanenko M.V., Zhuk G.G., Argunov D.P., Sheinberger A.A.

#### Ultra-wideband electro-optical modulator with an integrated laser

The paper presents the results of upgrading the design of a microassembly of an ultra-wideband electro-optical modulator with an integrated laser diode with a radiation wavelength of 1.31  $\mu\text{m}$  for its use in an optical attachment to analyze the parameters of components of high-speed fiber-optic systems used for transmitting analog and digital signals. This product can also be used to modulate a digital signal at an optical carrier wavelength of 1.31  $\mu\text{m}$ . As a result of upgrading the design of the microassembly, it was possible to increase its maximum frequency to 40 GHz and expand the range of operating frequencies (100 kHz – 27 GHz). The maximum power of optical radiation of the integrated laser of the microassembly exceeds 10 mW at a consumption current of 90 mA.

**Keywords:** electro-optical modulator, microassembly.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2024-27-3-25-29

---

**References**

1. Wong R.W., Hernday P.R., Harkins D.R., High-Speed Lightwave Component Analysis to 20 GHz, *HP Journal*, 1991, vol. 42, no. 1, pp. 6–13.
2. Seeds A., Microwave photonics, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, vol. 50, no. 3, pp. 877–887.
3. Cox C., *Analog Optical Links*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004, pp. 1–18.
4. Cox C.H., Ackerman E.I., Betts G.E., and Prince J.L., Limits on the Performance of RF-Over-Fiber Links and Their Impact on Device Design, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, vol. 54, no. 2, pp. 906–920.
5. Yao J., Microwave Photonics, *Journal of Lightwave Technology*, 2009, no. 27, pp. 314–335.
6. Yunusov I., Arykov V., Stepanenko M., Zhidik Yu., Petrukhin K., Ivanichko S., Maikova A., Filyushin M., *Mikrosborka sverkhshirokopolosnogo elektroopticheskogo modulyatora s integrirovannym istochnikom izlucheniya* [Microassembly of an ultra-wideband electro-optical modulator with an integrated laser], *Applied Physics*, 2024, no. 1, pp. 91–95 (in Russ.).

---

**Igor V. Yunusov**

Doctor of Science in Engineering, Leading Researcher, Laboratory of Integrated Optics and Radiophotonics (LIOR), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-48-61  
Email: igor.v.yunusov@yandex.ru

**Vadim S. Arykov**

Doctor of Science in Engineering,  
Director, IM Tech LLC, Tomsk,  
Leading Researcher LIOR TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-48-61  
Email: arykov.v@ir-mw.com

**Michael V. Stepanenko**

Researcher LIOR TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-48-61  
Email: stepanenko.m@ir-mw.com

**Gregory G. Zhuk**

Postgraduate student, Department of Radio Electronics and Communication Systems, Junior Researcher LIOR TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-8929-2833  
Phone: +7 (382-2) 41-48-61  
Email: grigoriy26.04@mail.ru

**Dmitry P. Argunov**

Junior Researcher LIOR TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-8828-4014  
Phone: +7 (382-2) 41-48-61  
Email: sss@pgtu.bpla.ru

**Anna A. Sheinberger**

Junior Researcher LIOR TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-48-61  
Email: annasejnberger@gmail.com