

УДК 621.373.826, 621.376.2
EDN: XGMIJG

PACS: 42.79.Hp

**Микросборка сверхширокополосного электрооптического модулятора с интегрированным источником излучения***И. В. Юнусов, В. С. Арыков, М. В. Степаненко, Ю. С. Жидик, К. А. Петрухин,
С. П. Иваничко, А. В. Майкова, М. А. Филюшин*

Приведены результаты разработки микросборки сверхширокополосного электрооптического модулятора с интегрированным источником излучения для использования в волоконно-оптических системах передачи аналогового сигнала на длине волны оптической несущей 1,31 мкм. Микросборка выполнена на основе полупроводникового кристалла электроабсорбционного модулятора с встроенным лазером. Максимальная мощность излучения лазера превышает 10 мВт при токе потребления 90 мА, диапазон рабочих частот модулятора составляет от 100 кГц до 20 ГГц.

Ключевые слова: электрооптический модулятор, микросборка.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-1-91-95

Введение

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) используются для передачи как цифрового, так и аналогового сигналов. Благодаря бурному развитию цифровых телекоммуникаций ВОСП цифрового сигнала стандартизованы и коммерчески доступны. ВОСП аналогового сигнала [1–4] получили меньшее распространение, и используются, в первую очередь, в качестве замены классических коаксиальных линий передачи электрического сигнала.

Преимущества использования ВОСП аналогового сигнала по сравнению с коаксиальными линиями передачи основаны на сле-

дующих особенностях: низких погонных потерях мощности сигнала вне зависимости от частоты модуляции, малом удельном весе и малой толщине оптического волокна, помехозащищенности оптоволоконной линии. Благодаря этому ВОСП позволяют осуществлять передачу полезного сигнала от источника к приемнику, удаленному на расстояние до нескольких километров. Особый интерес такие ВОСП представляют для создания измерительных систем, комплексов тестирования оборудования в широком диапазоне частот, линий задержки сигнала.

ВОСП состоит из передающего и приемного модулей. Основой передающего модуля

Юнусов Игорь Владимирович¹, в.н.с., к.т.н.

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

Арыков Вадим Станиславович^{1,2}, в.н.с., к.т.н., директор.

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

Степаненко Михаил Валерьевич¹, в.н.с.

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

Жидик Юрий Сергеевич¹, в.н.с., к.т.н.

E-mail: zhidikyur@mail.ru

Петрухин Константин Александрович¹, м.н.с.

E-mail: petruhin_ka@niipp.ru

Иваничко Светлана Павловна¹, м.н.с.

E-mail: svetlana.ok.fet@gmail.com

Майкова Анастасия Владимировна¹, м.н.с.

E-mail: AkiSuzuya@yandex.ru

Филюшин Максим Алексеевич¹, м.н.с.

E-mail: filyshin.maxim@mail.ru

¹ ТУСУР.

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

² ООО «Ай Эм Тех».

Россия, 634041, г. Томск, ул. Кирова, 51А, стр. 5.

*Статья поступила в редакцию 28.11.2023**Принята к публикации 14.02.2024**Шифр научной специальности: 2.2.9.*

© Юнусов И. В., Арыков В. С., Степаненко М. В., Жидик Ю. С., Петрухин К. А., Иваничко С. П., Майкова А. В., Филюшин М. А., 2024

является устройство формирования модулированного оптического сигнала, состоящее из источника излучения и модулятора. Для модуляции сигнала используются два основных принципа. Первый – управление показателем преломления среды. На этом принципе основано функционирование фазовых модуляторов и их комбинаций, например, интерферометр Маха-Цендера [5]. Второй – управление коэффициентом поглощения среды. На этом принципе функционируют электроабсорбционные модуляторы (ЭАМ) [6]. Несмотря на то, что ЭАМ менее универсальны, они чрезвычайно компактны, и могут быть эффективными для амплитудной модуляции аналогового сигнала.

Цель настоящей работы – создание микросборки электрооптического модулятора с интегрированным лазером, которая обеспечивает согласование с входным СВЧ-трактом, оснащена мониторным ФД для контроля мощности лазера и выполнена на теплоотводящем основании.

Конструкция микросборки

В составе микросборки использованы кристалл ЭАМ с интегрированным источником излучения (лазерным диодом), кристалл фотодиода, конденсатор для поверхностного монтажа.

Для применения в качестве основания микросборки была разработана плата из нитрида алюминия (AlN). Применение данного материала обусловлено его высокой теплопроводностью и диэлектрическими свойствами, что позволяет обеспечить требуемый температурный режим кристалла лазерного диода и достичь низких потерь в сверхвысокочастотной (СВЧ) линии передачи. Габаритные размеры платы составляют $1,76 \times 1,70 \text{ мм}^2$, толщина подложки – 0,25 мм. Разводка выполнена на основе меди, покрытой золотом. На плате интегрирован согласующий резистор номиналом 50 Ом.

СВЧ линия передачи, сформированная на плате, имеет конфигурацию «щелевая линия». Волновое сопротивление линии составляет 50 Ом.

В качестве блокировочной емкости применен конденсатор с типоразмером 0402

($1,0 \times 0,5 \times 0,5 \text{ мм}^3$). Совместно с интегрированным резистором он составляет RC-цепь, выполняющую функцию блокировки постоянной составляющей электрического сигнала (управление рабочей точкой модулятора) и согласования по СВЧ-сигналу. Емкость конденсатора составляет 100 нФ, что обеспечивает нижнюю границу диапазона частот не выше 100 кГц.

Кристалл модулятора, выполненный на подложке InP, содержит встроенный лазер с длиной волны излучения 1,31 мкм, а также ЭАМ с верхней границей диапазона рабочих частот, превышающей 45 ГГц.

Кристалл фотодиода выполнен на подложке InP и предназначен для детектирования излучения, направленного в торец кристалла.

Внешний вид микросборки приведен на рис. 1, принципиальная схема приведена на рис. 2.

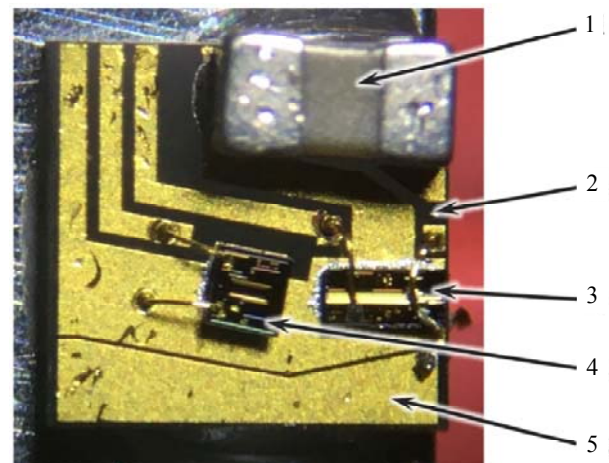


Рис. 1. Внешний вид микросборки: 1 – блокировочный конденсатор; 2 – интегрированный согласующий резистор; 3 – кристалл ЭАМ с интегрированным лазером; 4 – кристалл мониторингового фотодиода; 5 – плата на подложке AlN

Расчеты СВЧ-характеристик показали, что основное влияние на частотные характеристики коэффициента передачи по мощности и коэффициента отражения микросборки оказывают следующие факторы:

1) топология RC-цепи, состоящей из блокировочного конденсатора и интегрированного согласующего резистора;

2) длины разварочных проволочек, соединяющих СВЧ линию передачи с площадкой ЭАМ и далее площадку ЭАМ с площадкой согласующего резистора.

В результате расчета было установлено, что наибольшее значение имеет размер блокировочного конденсатора и соответствующая ему топология RC -цепи. Конденсатор с типоразмером 0402 позволяет получить плату с верхней границей диапазона рабочих частот не более (20–25) ГГц.

Микросборка имеет СВЧ-вход, который также используется для подачи постоянного смещения на ЭАМ $VD1$, вывод питания лазерного диода $VD2$, вывод смещения и контроля тока мониторингового фотодиода $VD3$, также общий вывод (рис. 2).

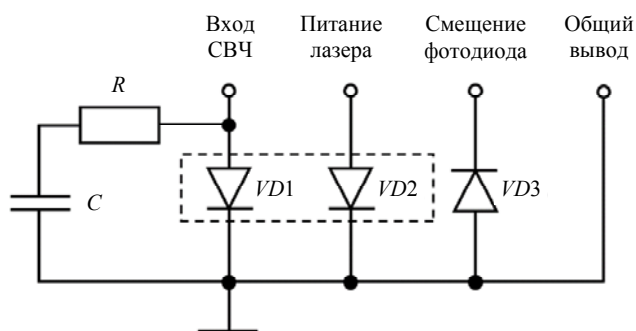


Рис. 2. Принципиальная схема микросборки: $VD1$ – ЭАМ; $VD2$ – лазерный диод; $VD3$ – фотодиод. $VD1$ и $VD2$ интегрированы на одном кристалле, что показано пунктирной линией

Параметры и характеристики микросборки по постоянному току были измерены с использованием стенда, включающего источник напряжения, мультиметры для измерения тока потребления лазера и тока фотодиода, а также систему вывода и измерения мощности излучения из кристалла лазера. Система вывода и измерения мощности излучения состояла из линзованного одномодового оптического волокна, манипулятора высокой точности и измерителя оптической мощности Thorlabs PM20.

Частотные характеристики микросборки были измерены с использованием стенда, включающего источник напряжения, векторный анализатор цепей Anritsu MS46122B, калибровочный модуль Anritsu MN4765B, а также внешний инжектор питания Anritsu K251, через который осуществлялась подача постоянного напряжения смещения на ЭАМ.

С использованием частотных характеристик параметров рассеяния были вычислены частотные характеристики нормализованного коэффициента передачи по мощности.

Результаты и обсуждение

Измеренная максимальная мощность оптического излучения микросборки составила более 11 мВт при токе питания лазера 90 мА, что соответствует характеристикам использованного кристалла.

Передаточная характеристика микросборки приведена на рис. 3. Анализ зависимости показывает, что наибольшая крутизна характеристики наблюдается в диапазоне напряжений на ЭАМ минус (1,5–1,8) В, что соответствует снижению выходной мощности приблизительно в два раза относительно состояния без подачи напряжения на ЭАМ. Таким образом, работа модулятора с наибольшим коэффициентом преобразования наблюдается в указанном диапазоне напряжений на ЭАМ. При использовании микросборки для модуляции цифрового сигнала коэффициент экстинкции для управляющего напряжения от 0 до минус 2,5 В составляет более 4 дБ.

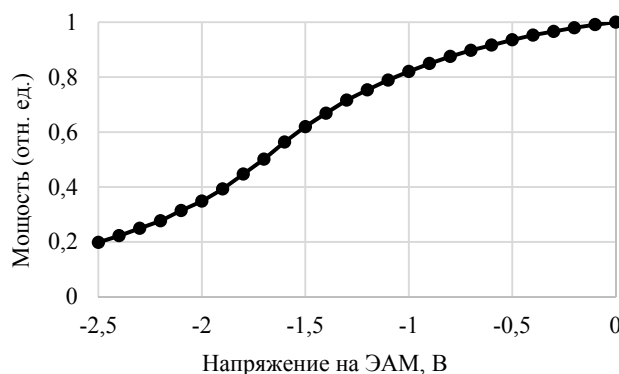


Рис. 3. Передаточная характеристика микросборки

На рис. 4 приведены частотные зависимости нормированного коэффициента передачи по мощности и модуля коэффициента отражения от входа микросборки при напряжении на ЭАМ минус 1,7 В.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 4, показывает, что нормированный коэффициент передачи по мощности снижается на 3 дБ относительно низкочастотного значения на частоте (18–20) ГГц, при этом функциональность микросборки с некоторым снижением коэффициента передачи сохраняется до (28–30) ГГц. Модуль коэффициента отражения СВЧ-сигнала от входа микросборки во всей полосе рабочих частот не превышает минус 9 дБ.

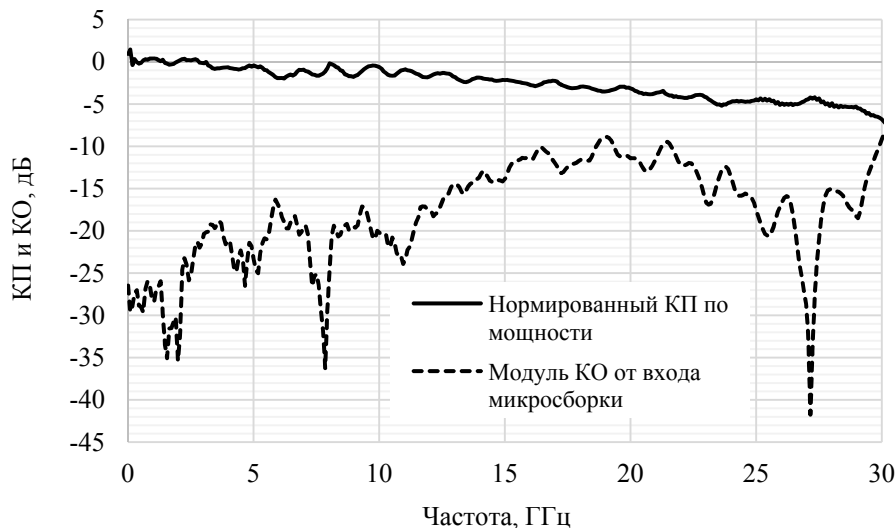


Рис. 4. Частотная зависимость нормированного коэффициента передачи по мощности и модуля коэффициента отражения от входа микросборки при напряжении на входе ЭАМ $U_{ea} = -1,7$ В

Измеренная зависимость фототока мониторингового фотодиода $I_{МФД}$ от тока потребления лазера I_L была экстраполирована функцией: $I_{МФД}(\text{мкА}) = 18I_L(\text{мА}) - 184$. При максимальном токе лазера 90 мА фототок мониторингового ФД составляет около 1,8 мА.

Заключение

В результате проведенной работы была разработана, создана и исследована микросборка сверхширокополосного электрооптического модулятора с интегрированным источником излучения. Микросборка может быть использована как в ВОСП аналогового сигнала, так и для модуляции цифрового сигнала в одном из форматов амплитудной модуляции.

Направления дальнейшего развития работы включают разработку микросборки с оптимизированной топологией RC -цепи и на основе конденсатора с меньшими геометрическими размерами (типоразмеры 0201, 01005), что позволит существенно повысить рабочую частоту микросборки и использовать ее вплоть до частоты 40 ГГц.

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).

ЛИТЕРАТУРА

1. Seeds A. / IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2002. Vol. 50. № 3. P. 877–887.
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. 906–920.
4. Yao J. / J. Lightwave Technol. 2009. № 27. P. 314–335.
5. Klein H. / Integrated InP Mach-Zehnder Modulators for 100 Gbit/s Ethernet Applications using QPSK Modulation. Doctoral dissertation, Berlin Institute of Technology, Berlin, Germany, 2010.
6. Hui-Tao W., Dai-Bing Z., Rui-Kang Z., Dan L., Ling-Juan Z., Hong-Liang Z., Wei W., Chen J. / Chin. Phys. Lett. 2015. Vol. 32. № 8.

Microassembly of an ultra-wideband electro-optical modulator with an integrated laser

I. V. Yunusov¹, V. S. Arykov^{1,2}, M. V. Stepanenko¹, Yu. S. Zhidik¹, K. A. Petruhin¹, S. P. Ivanichko¹, A. V. Maikova¹ and M. A. Filyshin¹

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenina prospect, Tomsk, 634050, Russia
E-mail: igor.v.yunusov@yandex.ru

² Infrared and Microwave Technologies, LLC
Bd. 5, 51A Kirova Ave., Tomsk, 634041, Russia

Received 28.11.2023; accepted 14.02.2024

Authors present the results of development of an ultra-wideband electro-optical modulator assembly containing an integrated laser. The microassembly is designed for use in fiber-optic systems for transmitting analog signals at 1.31 μm optical carrier wavelength. The microassembly is based on a semiconductor chip containing electroabsorption modulator and laser. The maximum output power of laser exceeds 10 mW at 90 mA bias current. The operating frequency range of the modulator is 100 kHz – 20 GHz.

Keywords: electro-optical modulator, microassembly.

REFERENCES

1. Seeds A., Microwave photonics, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **50** (3), 877–887 (2002).
2. Cox C., Analog Optical Links. Cambridge, U.K., Cambridge Univ. Press, 2004.
3. 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 Trans. Microw. Theory Tech. **54** (2), 906–920 (2006).
4. Jianping Yao, Microwave Photonics, J. Lightwave Technol., № 27, 314–335 (2009).
5. Klein H., Integrated InP Mach-Zehnder Modulators for 100 Gbit/s Ethernet Applications using QPSK Modulation. Doctoral dissertation, Berlin Institute of Technology, Berlin, Germany, 2010.
6. Hui-Tao W., Dai-Bing Z., Rui-Kang Z., Dan L., Ling-Juan Z., Hong-Liang Z., Wei W. and Chen J., Optimization of 1.3- μm InGaAsP/InP Electro-Absorption Modulator. Chin. Phys. Lett. **32** (8), (2015).