

УДК 537.86, 621.396
EDN: DURMYW

PACS: 85.60.Gz

**Модуль мощного фотодетектора для диапазона частот
от 0 до 16 ГГц***В. С. Арыков, И. В. Юнусов, М. В. Степаненко, К. С. Журавлев,
А. М. Гилинский, И. Б. Чистохин, М. С. Аксенов, Д. В. Дмитриев*

Приведены результаты разработки модуля мощного фотодетектора СВЧ диапазона для использования в волоконно-оптических системах передачи аналогового сигнала на длинах волн оптической несущей 1,31 и 1,55 мкм. Модуль фотодетектора выполнен в герметичном корпусе. Диапазон рабочих частот фотодетектора составляет от 0 до 16 ГГц. Для изготовления модуля был использован мощный фотодиод на основе гетероструктуры InGaAs/InAlAs/InP, обеспечивающий максимальную мощность входного оптического излучения более 60 мВт при чувствительности 0,8 А/Вт.

Ключевые слова: мощный фотодетектор, фотодиод, фосфид индия.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-38-43

Введение

Современные волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) аналогового сигнала [1, 2] получили широкое распространение, в первую очередь, в качестве замены классических коаксиальных линий передачи электрического сигнала. Передача электрического сигнала широкого спектра (десятки и сотни гигагерц) посредством ВОСП требует высоко-го быстродействия полупроводниковых компонентов (в частности, фотодетектора), что почти всегда отрицательно влияет на их энергетические характеристики. В результате

электрический сигнал на выходе фотодетектора имеет небольшую мощность и обычно требует усиления.

В некоторых системах выгодно получать с фотодетектора ВОСП сигнал, который не потребует последующего усиления. Это позволяет значительно упростить систему и делает ее более привлекательной экономически. К таким системам, в частности, относятся антенны и антенные решетки, сигнал к которым поступает посредством ВОСП [3–6].

Существует два способа повышения мощности электрического сигнала на выходе фотодетектора: повышение токовой чувстви-

Арыков Вадим Станиславович^{1,2}, директор
ООО «Ай Эм Тех», в.н.с., к.т.н.
E-mail: arykov.v@ir-mw.com

Юнусов Игорь Владимирович², в.н.с., к.т.н.
E-mail: igor.v.yunusov@yandex.ru

Степаненко Михаил Валерьевич², в.н.с.
E-mail: stepanenko.m@ir-mw.com

Журавлев Константин Сергеевич³, зав. лаб., д.ф.-м.н.
E-mail: zhur@isp.nsc.ru

Гилинский Александр Михайлович³, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: gilinsky@isp.nsc.ru

Чистохин Игорь Борисович³, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: igor@isp.nsc.ru

Аксенов Максим Сергеевич³, и. о. зав. лаб., к.ф.-м.н.
E-mail: aksenov@isp.nsc.ru

Дмитриев Дмитрий Владимирович³, н.с.
E-mail: ddmitriev@isp.nsc.ru

¹ ООО «Ай Эм Тех».

Россия, 634041, г. Томск, просп. Кирова, 51а, стр. 5.

² ТУСУР.

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

³ ИФП СО РАН.

Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.

Статья поступила в редакцию 8.12.2022

После доработки 24.12.2022

Принята к публикации 30.12.2022

© Арыков В. С., Юнусов И. В., Степаненко М. В.,
Журавлев К. С., Гилинский А. М., Чистохин И. Б.,
Аксенов М. С., Дмитриев Д. В., 2023

тельности фотодиода, а также повышение входной оптической мощности. Поскольку значения токовой чувствительности современных фотодиодов близки к физическому пределу и объективно ограничены свойствами полупроводниковой структуры, данный параметр не может быть увеличен существенно. В связи с этим используется повышение входной оптической мощности.

Важным свойством полупроводникового фотодиода является то, что линейный рост входной оптической мощности вызывает квадратичный рост мощности выходного электрического сигнала. Иными словами, рост входной оптической мощности вызывает повышение коэффициента передачи по мощности фотодиода. Это позволяет, с одной стороны, непосредственно повысить уровень мощности выходного электрического сигнала, а с другой – снизить коэффициент шума ВОСП, поскольку коэффициент передачи фотодиода, в основном, определяет коэффициент шума ВОСП. Использование фотодиодов с высокими значениями выходного тока обеспечивает, таким образом, расширение динамического диапазона системы передачи аналогового сигнала.

Одной из основных проблем использования ВОСП с повышенной мощностью оптического сигнала является создание мощных фотодетекторов, ключевым элементом которого является мощный СВЧ фотодиод [7–11]. Сложность разработки мощных СВЧ-фотодиодов заключается в преодолении таких физических ограничений, как существенный разогрев кристалла и эффекты пространственного заряда [11].

В настоящей работе авторы приводят результаты разработки модуля мощного СВЧ-фотодетектора, созданного на основе мощного СВЧ $p-i-n$ -фотодиода. Широкий динамический диапазон фотодетектора позволит использовать его в системах радиолокации и измерительной техники без дополнительного усиления СВЧ-сигнала с выхода фотодетектора при использовании лазера соответствующей мощности.

Мощный СВЧ-фотодиод

Основным элементом модуля является мощный СВЧ $p-i-n$ -фотодиод, выполненный на

основе гетероструктуры InGaAs/InAlAs/InP. Фотография топологии фотодиода приведена на рис. 1. Фотодиод выполнен по мезотехнологии с помощью оптической литографии и химического травления и имеет диаметр фоточувствительной области 20 мкм. Габаритные размеры чипа фотодиода $0,5 \times 0,5$ мм². На металлические контакты p - и n -областей фотодиода нанесены массивные золотые выводы толщиной около 5 мкм, обеспечивающие низкие тепловое и электрическое сопротивление. Кроме того, благодаря массивным контактным площадкам фотодиод может быть непосредственно смонтирован на копланарную СВЧ-линию передачи, которая также является теплоотводом. Оптическое излучение подается с обратной стороны чипа фотодиода. На подложку чипа нанесено просветляющее покрытие. Фотодиод может эффективно применяться для работы в спектральных диапазонах 1,31 и 1,55 мкм, используемых в ВОСП.

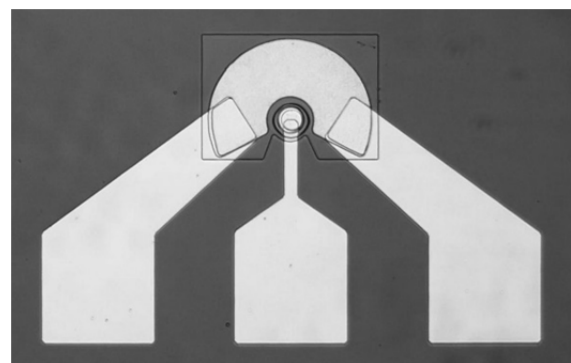


Рис. 1. Фотография топологии фотодиода

Модуль фотодетектора

Модуль разработанного фотодетектора представляет собой герметичный металлический корпус, на противоположных сторонах которого расположены оптоволоконный ввод и разъем СВЧ-сигнала (рис. 2). Габаритные размеры корпуса составляют $11 \times 10 \times 10$ мм³ без учета выводов питания, хвостовика ввода оптического излучения и СВЧ-разъема.

Функционально фотодетектор представляет собой кристалл фотодиода, установленный на переходную плату лицевой стороной вниз (рис. 2). Керамическая переходная плата содержит копланарную линию передачи электрического сигнала и метки для позиционирования кристалла фотодиода при монтаже.

Подача рабочего напряжения осуществляется через СВЧ-выход модуля с использованием внешнего инжектора питания.

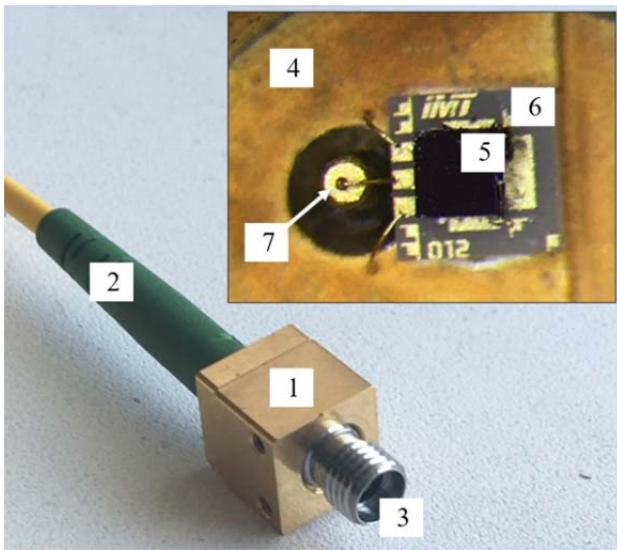


Рис. 2. Внешний вид модуля и его элементов: 1 – корпус модуля; 2 – оптический кабель входного сигнала; 3 – СВЧ-разъем выходного сигнала; 4 – полость корпуса; 5 – кристалл фотодиода; 6 – переходная плата; 7 – вывод СВЧ-сигнала

Характеристики фотодетектора по постоянному току были измерены с использованием стенда на основе источника лазерного излучения Emsco 1782A с длиной волны излучения 1550 нм. Максимальная мощность оптического излучения на входе фотодетектора составила 63 мВт. Измерение мощности излучения выполнялось измерителем Thorlabs PM20, величина фототока регистрировалась с помощью мультиметра Arpa 106.

Частотные характеристики фотодетектора были измерены с использованием стенда, включающего источник лазерного излучения Emsco 1782A, электрооптический модулятор IXBlue MXAN-LN-40 на основе интерферометра Маха-Цендера, векторный анализатор цепей Anritsu MS46122B и калибровочный модуль Anritsu MN4765B. Стенд представлял собой ВОСП аналогового сигнала с внешней модуляцией лазерного излучения, к входу и выходу которой подключен векторный анализатор цепей. Методика измерения частотных характеристик состояла из двух шагов. На первом шаге выполнялось измерение характеристик ВОСП, в которой в качестве фотоприемника использовался калибровочный модуль, и вычислялись параметры рассеяния

электрооптического модулятора. На втором шаге выполнялось измерение характеристик ВОСП, в которой в качестве фотоприемника использовался тестируемый фотодетектор. С использованием частотных характеристик параметров рассеяния электрооптического модулятора вычислялись частотные характеристики нормированного коэффициента передачи по мощности. Измерения выполнялись для различных напряжений питания фотодетектора: от минус 2 В до минус 5 В с шагом 1 В.

Результаты и обсуждение

Графики зависимости величины фототока разработанного модуля от мощности входного излучения при различных значениях напряжения питания фотодетектора приведены на рис. 3. На рис. 4 приведены экспериментальные частотные зависимости нормированного коэффициента передачи по мощности при различных напряжениях питания фотодетектора при уровне входной оптической мощности 10 мВт.

Анализ зависимости величины фототока от мощности входного оптического излучения (рис. 3) показывает, что для обеспечения линейности фотодетектора при мощности излучения свыше 50 мВт напряжение питания фотодетектора должно составлять не менее 4 В. Токовая чувствительность составила 0,8 А/Вт.

Результаты измерений, приведенные на рис. 4, показывают, что диапазон рабочих частот модуля составляет 16 ГГц по уровню минус 3 дБ от низкочастотного значения коэффициента передачи по мощности при оптимальных напряжениях питания. Следует отметить, что частотные характеристики ограничены спадом резонансного характера, пик которого расположен в диапазоне частот 17–18 ГГц. Как было установлено, резонанс связан с конструкцией переходной платы, что может быть скорректировано в ходе дальнейших работ.

Сравнение разработанного модуля фотодетектора с функциональными аналогами приведено в таблице. Данные таблицы показывают, что по основным параметрам разработанный фотодиод сопоставим с зарубежными аналогами.

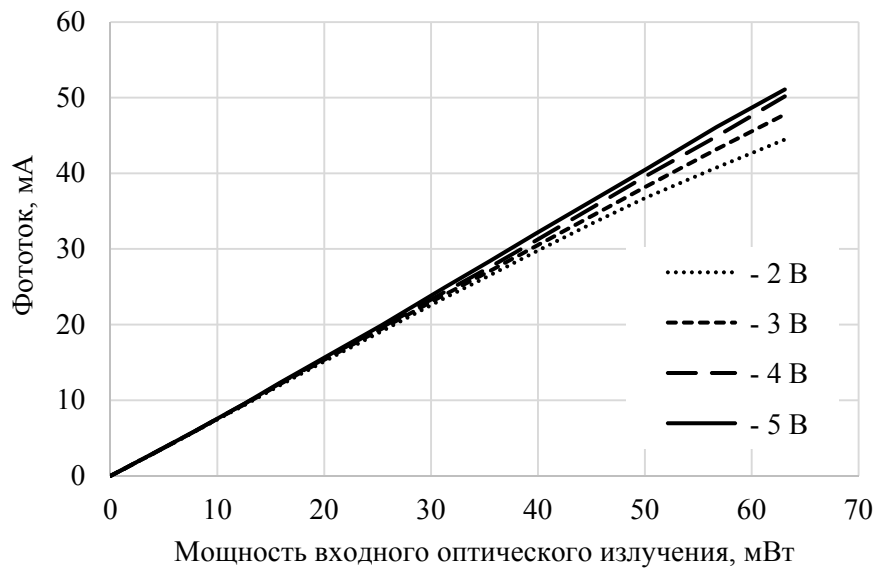


Рис. 3. Зависимость величины фототока от мощности входного оптического излучения при различных напряжениях питания

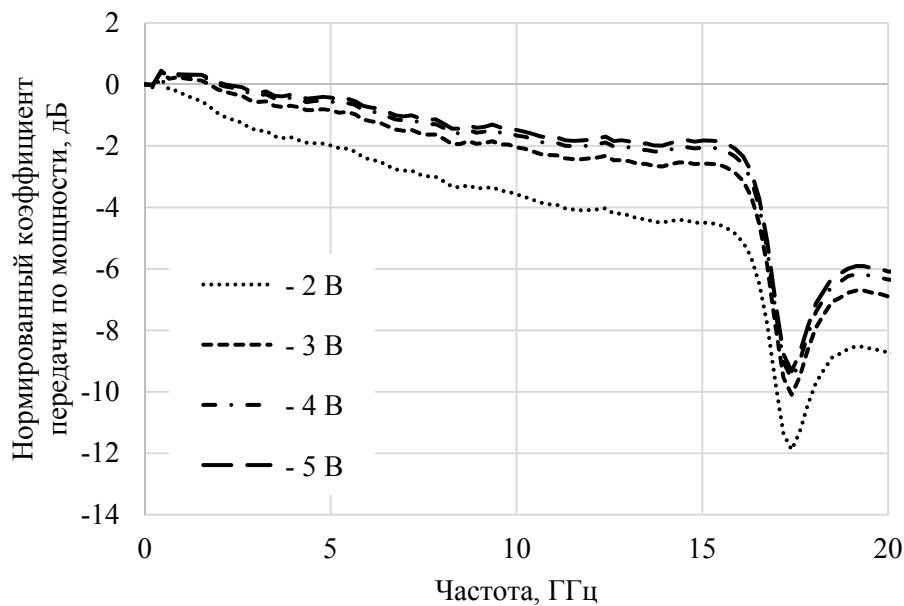


Рис. 4. Частотная зависимость нормированного коэффициента передачи по мощности фотодетектора при различных напряжениях питания

Таблица

Основные параметры разработанного модуля и его функциональных аналогов

Производитель и наименование изделия	Точковая чувствительность, А/Вт	Максимальная рабочая частота по уровню минус 3 дБ, ГГц	Максимальная входная оптическая мощность, мВт
Albis Optoelectronics PQW10B-L	0,8	15	не менее 50
Freedom Photonics FP1015a	0,4	16	не менее 200
Apic Corporation ARX20-50	0,8	20	не более 50
Optoplex PD-200	0,65	22	не более 40
II-VI VPDV2120	0,55	12	не менее 220
Разработанный модуль	0,8	16	не менее 60

Заклучение

В результате проведенной работы был создан компактный модуль мощного СВЧ-фотодетектора на основе мощного СВЧ $p-i-n$ -фотодиода. Измерены частотные и динамические характеристики модуля, демонстрирующие перспективность его применения в ВОСП аналоговых СВЧ-сигналов.

Направления дальнейшего развития работы включают разработку модуля фотодетектора на основе фотодиода с выходным током не менее 100 мА и частотным диапазоном до 25 ГГц и более, а также разработку модуля со встроенным инжектором питания. Особый интерес в перспективе представляют исследования разработанных фотодетекторов в импульсном режиме подачи сигнала.

Работа выполнена коллективом научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники ТУСУР 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. Tulchinsky D., Boos J., Park D., Goetz P., Rab-inovich W., Williams K. / J. Lightw. Technol. 2008. Vol. 26. № 4. P. 408–416.
4. Xie X., Li K., Zhou Q., Beling A., Campbell J. / J. Lightw. Technol. 2014. Vol. 32. № 21. P. 3585–3590.
5. Xie X., Li K., Shen Y., Zang J., Beling A., Campbell J. / J. Lightw. Technol. 2015. Vol. 33. № 18. P. 3808–3814.
6. Konkol M., Ross D., Shi S., Harrity C., Wright A., Schuetz C., Prather D. / J. Lightw. Technol. 2017. Vol. 35. № 10. P. 2010–2016.
7. Ito H., Kodama S., Muramoto Y., Futura T., Nagatsuma T., Ishibashi T. / IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2004. Vol. 10. № 4. P. 709–727.
8. Malyshev S., Chizh A., Vasileusli Yu. / J. Lightw. Technol. 2008. Vol. 26. № 15. P. 2732–2739.
9. Li Z., Fu Y., Piels M., Pan H., Beling A., Bowers J., Campbell J. / Opt. Express. 2011. Vol. 19. № 26. P. B385–B390.
10. Zhou Q., Cross A., Beling A., Fu Y., Lu Z., Campbell J. / IEEE Photon. Technol. Lett. 2013. Vol. 25. № 10. P. 907–909.
11. Чиж А. Л., Микитчук К. Б., Журавлев К. С., Дмитриев Д. В., Торопов А. И., Валишева Н. А., Аксенов М. С., Гилинский А. М., Чистохин И. Б. / Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. Вып. 14. С. 52–54.

PACS: 85.60.Gz

High-power photodetector module for 0–16 GHz frequency range

*V. S. Arykov^{1,2}, I. V. Yunusov², M. V. Stepanenko², K. S. Zhuravlev³,
A. M. Gilinsky³, I. B. Chistokhin³, M. S. Aksenov³ and D. V. Dmitriev³*

¹ Company “AI EM TECH”

Bd. 5, 51a Kirova Ave., Tomsk, 634041, Russia

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

40 Lenina prospect, Tomsk, 634050, Russia

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

³ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics

13 Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

Received 8.12.2022; revised 24.12.2022; accepted 30.12.2022

The paper presents the development of a high-power microwave photodetector module for use in radio-over-fiber systems. The module supports both the 1.31 and 1.55 μm optical wavelengths. The photodetector module has a hermetic sealed housing. The operating frequency

range of the device is from 0 to 16 GHz. A high-power indium phosphide photodiode was used to manufacture the module. The photodiode provides a maximum input optical power of more than 60 mW at a sensitivity of 0.8 A/W.

Keywords: high-power photodetector, photodiode, indium phosphide.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-38-43

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. Tulchinsky D., Boos J., Park D., Goetz P., Rabinovich W. and Williams K., J. Lightw. Technol. **26** (4), 408–416 (2008).
4. Xie X., Li K., Zhou Q., Beling A. and Campbell J., J. Lightw. Technol. **32** (21), 3585–3590 (2014).
5. Xie X., Li K., Shen Y., Zang J., Beling A. and Campbell J., J. Lightw. Technol. **33** (18), 3808–3814 (2015).
6. Konkol M., Ross D., Shi S., Harrity C., Wright A., Schuetz C. and Prather D., Lightw. Technol. **35** (10), 2010–2016 (2017).
7. Ito H., Kodama S., Muramoto Y., Futura T., Nagatsuma T. and Ishibashi T., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron **10** (4), 709–727 (2004).
8. Malyshev S., Chizh A. and Vasileusli Yu., J. Lightw. Technol. **26** (15), 2732–2739 (2008).
9. Li Z., Fu Y., Piels M., Pan H., Beling A., Bowers J. and Campbell J., Opt. Express **19** (26), B385–B390 (2011).
10. Zhou Q., Cross A., Beling A., Fu Y., Lu Z. and Campbell J., IEEE Photon. Technol. Lett. **25** (10), 907–909 (2013).
11. Chizh A., Mikitchuk K., Zhuravlev K., Dmitriev D., Toropov A., Valisheva N., Aksenov M., Gilinsky A. and Chistokhin I., Letters in JTF **45** (14), 52–54 (2019).