

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ КАК МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ВОЛОКОННО-ЭФИРНОЙ СТРУКТУРЫ

В.А. Андреев<sup>1</sup>, В.А. Бурдин<sup>1</sup>, К.А. Волков<sup>1</sup>, В.П. Кубанов<sup>1</sup>, А.И. Тяжев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

### Аннотация

В работе рассмотрены варианты использования полупроводниковых оптических усилителей в системах волоконно-эфирной структуры. Получены теоретические оценки параметров работы оптического усилителя, модулятора и детектора, реализованных на базе полупроводникового оптического усилителя, а также оценки параметров этих устройств при использовании полупроводникового оптического усилителя в качестве единого многофункционального оптического устройства: усилитель-модулятор-детектор.

**Ключевые слова:** полупроводниковый оптический усилитель, модулятор, детектор, radio-over-fiber.

**Цитирование:** Андреев, В.А. Исследование характеристик полупроводникового оптического усилителя как многофункционального устройства волоконно-эфирной структуры / В.А. Андреев, В.А. Бурдин, К.А. Волков, В.П. Кубанов, А.И. Тяжев // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 844-849. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-844-849.

### Введение

Одной из наиболее перспективных для построения таких телекоммуникационных сетей, как сети мобильной связи, сети широкополосного доступа, является технология «radio-over-fiber» (RoF) – технология передачи данных по распределенной волоконно-эфирной структуре. Технология RoF является транспортной и представляет собой способ передачи информации по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) посредством модуляции (манипуляции) оптической несущей сверхвысокочастотным сигналом [1–3].

Сегмент сети RoF включает в себя центральную станцию (ЦС), участок волоконно-оптической линии связи, базовую станцию (БС) и абонентский терминал (АТ), как представлено на рис. 1.

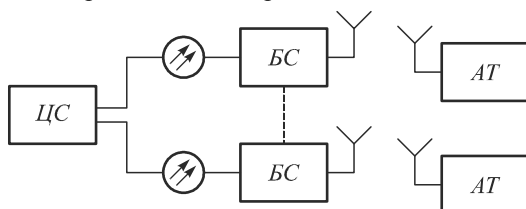


Рис. 1. Обобщенная структура сегмента сети RoF

В сети RoF на ЦС оптический передатчик модулируется на поднесущих СВЧ-диапазона цифровыми информационными сигналами со скоростями 1...10 Гбит/с. ВОЛС соединяют ЦС и БС. На базовой станции осуществляются оптико-электрическое преобразование и передача в эфир в пределах зоны покрытия. Сигналы принимаются и демодулируются АТ. Передача сигналов от абонента происходит в обратной последовательности [1–3]. Основным преимуществом технологии RoF является передача радиосигнала непосредственно из оптического канала в радиоканал без промежуточного ввода/вывода на БС информационного сигнала. Это позволяет не только существенно упростить реализацию БС и снизить ее стоимость, но и обеспечить прозрачность, что крайне важно для современных телекоммуникационных сетей.

При такой конфигурации сети существенным фактором является стоимость БС. Даже относительно не-

большое ее увеличение приводит к значительному росту затрат на построение сети в целом. Для компенсации потерь в ВОЛС при распространении и для согласования уровней передачи сигналов в системах RoF используют оптические усилители, в том числе и полупроводниковые оптические усилители (ППОУ). Как известно, ППОУ может выполнять функции не только оптического усилителя, но и детектора и модулятора. Таким образом, для получения экономического эффекта, который заключается в уменьшении стоимости подключения абонента к сети RoF за счет удешевления БС, целесообразно использовать ППОУ как единое многофункциональное устройство. Однако появляется необходимость в исследовании характеристик такого многофункционального устройства при работе в различных режимах для определения его возможной области применения, что и рассматривается в настоящей работе.

### Функционирование ППОУ в качестве усилителя

Конструкция и принцип действия ППОУ подробно описаны в литературе [4–7]. Как и любой оптический усилитель, используемый на волоконно-оптических линиях передачи (ВОЛП), ППОУ применяется в качестве выходного усилителя для увеличения мощности передатчика, линейного усилителя и предусилителя для повышения чувствительности приемника. В табл. 1 приведено сравнение основных характеристик ППОУ и волоконно-оптических усилителей (ВОУ), реализованных на активных волокнах, легированных ионами эрбия, и на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [8].

К основным преимуществам ППОУ, как отмечалось ранее, относятся прозрачность по скорости передачи данных и формату модуляции, двунаправленность, возможность применения в системах спектрального уплотнения, простой режим работы, низкое энергопотребление и компактность. На рис. 2 представлено конструктивное исполнение ППОУ на примере [9] (рис. 2а) и геометрические размеры его активной области (рис. 2б).

Табл. 1. Сравнение характеристик ППОУ и ВОУ

Тип оптического усилителя	ППОУ	EDFA	ВКУ
Спектральная ширина, нм	30–40	40	100
Максимальный коэффициент усиления, дБ	20–28	40	32
Шум-фактор, дБ	6–8	5,5	3
Мощность насыщения, дБм	20	30	35
Поляризационная чувствительность, дБ	<0,5	<0,5	<0,5

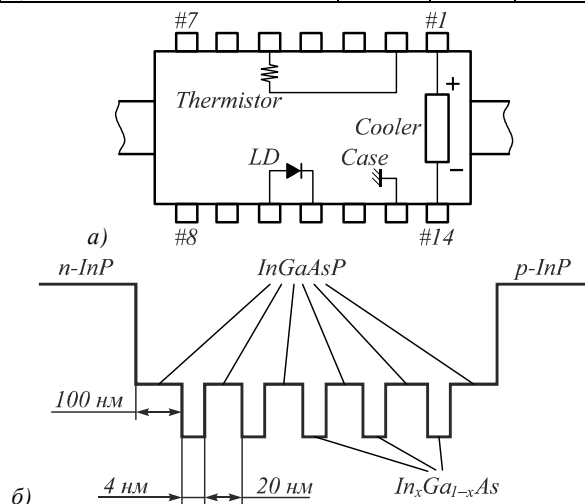


Рис. 2. Полупроводниковый оптический усилитель на примере 14-pin (а) и конструкция активной области ППОУ (б)

При работе ППОУ в качестве оптического усилителя важными характеристиками являются коэффициент усиления сигнала и величина шум-фактора, конечно же, с учетом их спектральной зависимости. Как известно, коэффициент усиления  $G$  определяется как отношение мощности  $P_{out}$  сигнала на выходе оптического усилителя к мощности  $P_{in}$  сигнала на его входе:

$$G = P_{out} / P_{in}.$$

Коэффициент усиления ППОУ зависит от мощности входного сигнала. Мощный входной сигнал уменьшает плотность носителей в активной области, что, в свою очередь, уменьшает коэффициент усиления и смещает максимум усиления в сторону больших длин волн [4, 6–7]. Насыщение коэффициента усиления записывается в виде функции выходной мощности:

$$G = G_{SS} \exp(P/P_{sat}),$$

где  $G_{SS}$  – коэффициент усиления слабого сигнала,  $P_{sat}$  – мощность насыщения.

$$P_{sat} = (h\nu A\eta) / (\tau G\alpha),$$

где  $\tau$  – время жизни носителей,  $G$  – коэффициент оптического ограничения,  $\alpha$  – дифференциальное усиление,  $A$  – площадь поперечного сечения активной полоски ППОУ,  $\eta$  – коэффициент ввода излучения.

Основной характеристикой, влияющей на качество усиливаемого сигнала, является шум-фактор. Величина шум-фактора показывает степень ухудшения оптического соотношения сигнал – шум. Основным источником шума ППОУ являются биения меж-

ду сигналом и усиленным спонтанным излучением (УСИ). На практике измерение шум-фактора производится по формуле [9]:

$$NF = (2 \cdot \rho_{ASE}) / (Gh\nu),$$

где  $\rho_{ASE}$  – спектральная плотность УСИ, определяемая из спектральной зависимости мощности шума. Для расчета характеристик  $G$  и  $NF$  использовалась математическая модель, которая подробно описана в работе [4]. Параметры ППОУ, необходимые для моделирования, брали из [4, 9]. Результаты вычислений представлены на рис. 3–4.

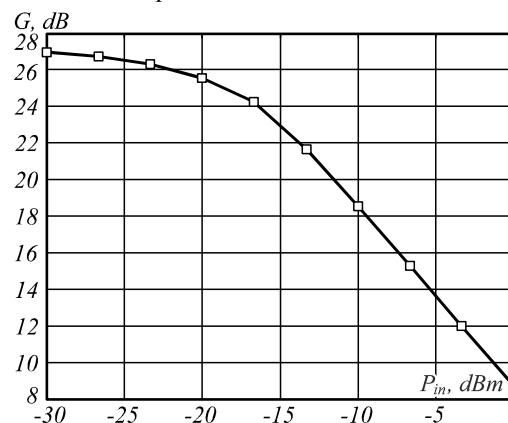


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления ППОУ от мощности входного сигнала при токе накачки 150 мА ( $\lambda = 1552,52$  нм)

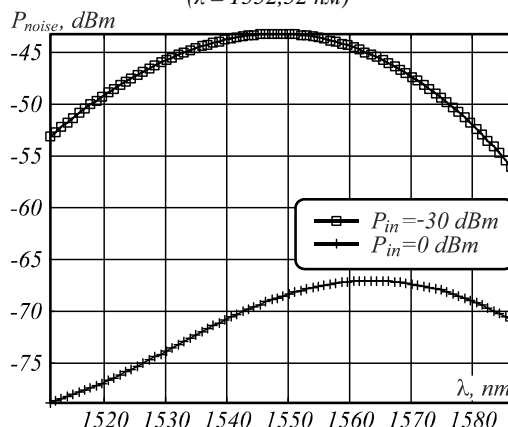


Рис. 4. Зависимость мощности шума ППОУ от мощности входного сигнала при токе накачки 150 мА ( $\lambda = 1552,52$  нм)

Как видно из рис. 3, 4, с увеличением мощности на входе ППОУ коэффициент усиления и величина шума уменьшаются.

### Функционирование ППОУ как детектора сигнала

Известно, что ППОУ может функционировать и как детектор [10–12]. Существует два способа использования ППОУ для детектирования: при отсутствии тока накачки и при его подаче на устройство [4]. В первом случае оптическое излучение при распространении по волноводу ППОУ поглощается материалом. При поглощении фотонов генерируются электронно-дырочные пары, в результате чего в нагрузку протекает ток. Во втором случае при вводе оптического излучения в ППОУ в нем в результате процесса вы-

нужденной рекомбинации генерируются дополнительные фотоны, что и приводит к изменениям тока. Наилучшие показатели достигаются при токе накачки и уровне входной мощности, близким к рабочим характеристикам ППОУ, используемого как усилитель [12]. Следует отметить, что ППОУ как детектор по своим параметрам существенно уступает фотодиодам.

Применение ППОУ как детектора может быть описано структурной схемой, представленной на рис. 5 (здесь ЛД – лазерный диод, М – модулятор).

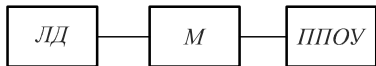


Рис. 5. Структурная схема детектора сигнала на базе ППОУ

В соответствии с рис. 5 предположим, что на вход ППОУ попадает сигнал мощностью:

$$P_{in}(t) = P_{DC} + \Delta P,$$

в этом случае величина тока детектирования может быть найдена как:

$$I_{det} = I_{DC} + \Delta I_{det},$$

где

$$\Delta I_{det} = R \cdot m \cdot (P_{DC} / a_{in}) \text{ и } R = \sqrt{\frac{2 \cdot a_{in}^2 \cdot P_{in}}{m^2 \cdot P_{DC} \cdot Z}}. \quad (1)$$

Здесь  $P_{DC}$  – постоянная составляющая оптической мощности,  $\Delta P$  – переменная составляющая оптического сигнала,  $I_{det}$  – величина детектируемого тока,  $I_{DC}$  – переменная составляющая электрического сигнала,  $\Delta I_{det}$  – переменная составляющая детектируемого тока,  $R$  – чувствительность ППОУ,  $m$  – глубина модуляции сигнала,  $a_{in}$  – величина оптических потерь в случае протяженного сегмента ВОЛП,  $Z$  – волновое сопротивление ППОУ.

При расчетах величины детектируемого значения использовали параметры ППОУ из [4, 9], учитывали (1) и допускали отсутствие оптических потерь  $a_{in}$ . Результаты вычислений представлены на рис. 6.

### Функционирование ППОУ как модулятора

Применение ППОУ перспективно в качестве внешнего модулятора, работа которого базируется на том, что изменения тока накачки приводят к изменениям коэффициента усиления и, соответственно, к модуляции выходной мощности оптического излучения. Оптимальным является выбор в качестве рабочего линейного участка ватт-амперной характеристики перед областью насыщения. Именно на этом участке достигаются наименьшие нелинейные искажения и максимальная глубина модуляции.

На рис. 7–8 представлены результаты моделирования зависимости коэффициента усиления и мощности шума ППОУ от величины тока накачки для разных значений входной мощности сигнала для режимов функционирования ППОУ как модулятора и как оптического усилителя.

Как видно из рис. 7, 8, линейные участки зависимости коэффициента усиления от величины тока

накачки ППОУ совпадают, но наименьший шум наблюдается для более мощного входного сигнала.

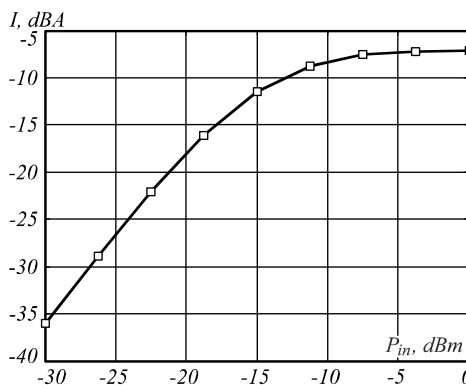


Рис. 6. Зависимость тока детектирования ППОУ от мощности входного сигнала при токе накачки 200 мА

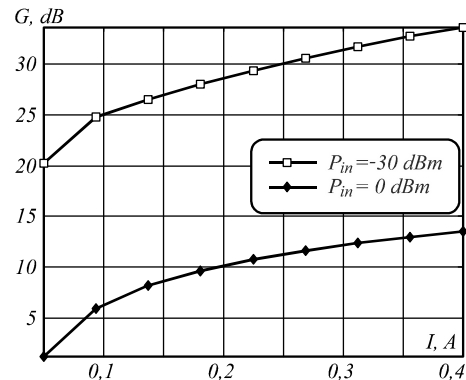


Рис. 7. Зависимость коэффициента ППОУ от величины тока накачки при мощности входного сигнала 0 дБм и -30 дБм.

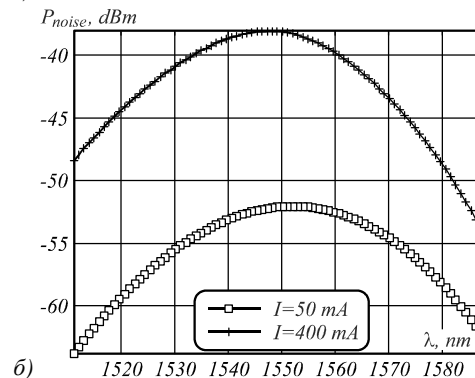
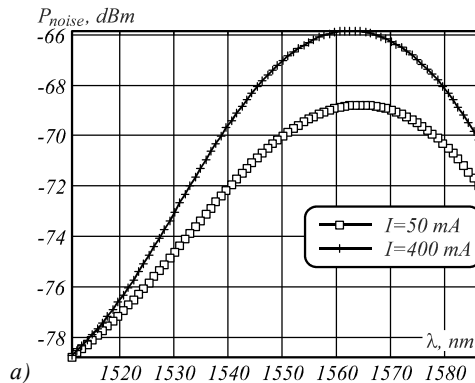


Рис. 8. Зависимость мощности шума ППОУ от тока накачки при мощности входного сигнала 0 дБм (а) и -30 дБм (б)

Использование ППОУ в качестве внешнего модулятора является не единственным его применением в устройствах формирования сигнала. Как было показано, к примеру, в [13], имеется возможность реализации сигналов более сложной формы.

Особый интерес для систем распределенной волоконно-эфирной структуры представляет модуляция оптической несущей с одной боковой полосой [14]. Пример такого модулятора на основе ППОУ приведен на рис. 9.

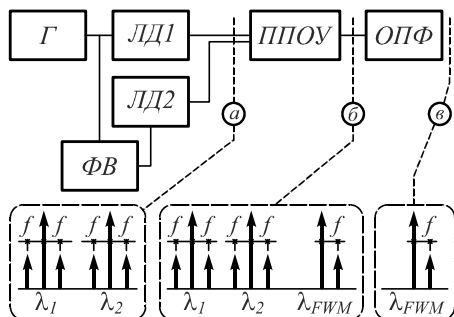


Рис. 9. Модуляция с одной боковой полосой с применением ППОУ

Здесь ЛД – лазерный диод, Г – генератор, ОПФ – оптический полосовой фильтр. Радиосигналом модулируют оптическое излучение ЛД1 с длиной волны  $\lambda_1$ , и этим же радиосигналом, но сдвинутым по фазе, модулируют оптическое излучение ЛД2 с длиной волны  $\lambda_2$ . В ППОУ за счёт нелинейности образуются продукты четырехволнового смешения на длине волны  $\lambda_{FWM}$ . За счёт выбора сдвига фазы, уровней мощности оптического излучения лазерных диодов и тока накачки в ППОУ одну боковую полосу продукта четырехволнового смешения подавляют и с помощью фильтра из оптического сигнала на выходе ППОУ выделяют другую.

### Заключение

Способность ППОУ выполнять функции усилителя, модулятора и детектора позволяет создать универсальное устройство, выполняющее все эти функции. Однако, поскольку оптимальные режимы ППОУ для усиления, модуляции и детектирования отличаются, приходится искать компромиссы. Сопоставляя результаты численного моделирования многофункционального устройства на базе ППОУ с характеристиками оптического усилителя, детектора и модулятора, можно говорить о возможности использования многофункционального устройства на базе ППОУ в распределительных системах волоконно-эфирной структуры (RoF), но при определенных ограничениях в характеристиках. ППОУ может использоваться как приемлемый фотодетектор и модулятор, но при этом как посредственный оптический усилитель. И, соответственно, как хороший оптический усилитель, приемлемый модулятор, но посредственный детектор сигнала.

### Литература

1. **Cooper, A.J.** 'Fibre/Radio' for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network / A.J. Cooper // *Electronics letters*. – 1990. – Vol. 26, Issue 24. – P. 2054-2056. – DOI: 10.1049/el:19901325.
2. **Gomes, N.J.** Radio-over-fiber transport for the support of wireless broadband services / N.J. Gomes, M. Morant, A. Alphones, B. Cabon, J.E. Mitchell, C. Lethien, M. Csörnyei, A. Stöhr, S. Iezekiel // *Journal of Optical Networking*. – 2009. – Vol. 8, Issue 2. – P. 156-178. – DOI: 10.1364/JON.8.000156.
3. **Zhensheng, J.** Key Enabling Technologies for Optical-Wireless Networks: Optical Millimeter-Wave Generation, Wavelength Reuse, and Architecture / J. Zhensheng, Y. Jianjun, E. Georgios, C. Gee-Kung // *Journal of Lightwave Technology*. – 2007. – Vol. 25, Issue 11. – P. 3452-3471. – DOI: 10.1109/JLT.2007.909201.
4. **Connelly, M.J.** Wideband Semiconductor Optical Amplifier Steady-State Numerical Model / M.J. Connelly // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2001. – Vol. 37, Issue 3. – P. 439-447. – DOI: 10.1109/3.910455.
5. **O'Mahoney, M.J.** Semiconductor Laser Optical Amplifier for use in Fiber Systems / M.J. O'Mahoney // *Journal of Lightwave Technology*. – 1988. – Vol. 6, Issue 4. – P. 531-544. – DOI: 10.1109/50.4035.
6. **Kaminow, I.** Optical Fiber Telecommunications: Systems and Networks. / I. Kaminow, T. Li, A.E Willner. – 6<sup>th</sup> Ed. – Vol. VIA. – Waltham, USA: Academic Press, 2013. – P. 944. – ISBN: 978-0-12-396958-3.
7. **Kaminow, I.** Optical Fiber Telecommunications: Systems and Networks. / I. Kaminow, T. Li, A.E Willner. – 6<sup>th</sup> Ed. – Vol. VIB. – San Diego, USA: Academic Press; 2013. – P. 1148. – ISBN: 978-0-12-396960-6.
8. **Дураев, В.П.** Полупроводниковые оптические усилители в диапазоне длин волн 840–1550 нм / В.П. Дураев, С.В. Медведев // *Научное приборостроение*. – 2012. – Т. 22, № 3. – С. 53-57.
9. **Udvary E.** Multifunctional SOAs in optical communication systems / E. Udvary, T. Berceci // *ICTON '09, 11th International Conference on Transparent Optical Networks*. – 2009. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/ICTON.2009.5185045.
10. **Udvary E.** Semiconductor optical amplifier for detection function in radio over fiber systems / E. Udvary, T. Berceci // *Journal of Lightwave Technology*. – 2008. – Vol. 26, Issue 15. – P. 2563-2570. – DOI: 10.1109/JLT.2008.927187.
11. **Андреев, В.А.** Применение полупроводниковых оптических усилителей в системах «Radio-over-Fiber» телекоммуникационных сетей / В.А. Андреев, А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, М.И. Нарышкин // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2015. – № 11. – С. 14-18.
12. **Xiangfei, C.** Photonic generation of microwave signal using a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser / C. Xiangfei, D. Zhichao, Y. Jianping // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2006. – Vol. 54, Issue 2. – P. 804-809. – DOI: 10.1109/TMTT.2005.863064.
13. **Insua, G.I.** Simple remote heterodyne radio-over-fiber system for gigabit per second wireless access / I.G. Insua, D. Plettemeier, Ch.G. Schäffer // *Journal of Lightwave Technology*. – 2010. – Vol. 28, Issue 16. – P. 2289-2295. – DOI: 10.1109/JLT.2010.2042426.

### Сведения об авторах

**Андреев Владимир Александрович**, 1951 года рождения, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, в 1974 году окончил с отличием Куйбышевский электротехнический институт связи

(КЭИС) по специальности «Многоканальная электросвязь», работает заведующим кафедрой линий связи и измерений в технике связи в Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Область научных интересов: линии связи и электромагнитная совместимость систем телекоммуникаций, волоконно-оптические линии передачи, эффективные технологии строительства и технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений оптических линий передачи сетей связи. E-mail: [andreev@psati.ru](mailto:andreev@psati.ru).

**Бурдин Владимир Александрович**, 1953 года рождения, доктор технических наук, профессор, в 1975 году окончил с отличием Куйбышевский электротехнический институт связи по специальности «Многоканальная электросвязь», работает проректором по науке и инновациям в ПГУТИ. Область научных интересов: волоконно-оптические линии передачи, эффективные технологии строительства и технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений оптических линий передачи сетей связи, управление солитонами в волоконных световодах, маломодовые технологии волоконной оптики и их приложения на сетях связи. E-mail: [burdin@psati.ru](mailto:burdin@psati.ru).

**Волков Кирилл Александрович**, 1986 года рождения, кандидат технических наук, в 2008 году окончил с отличием Поволжскую государственную академию телекоммуникаций и информатики по специальности «Сети связи и системы коммутации», работает доцентом на кафедре линий связи и измерений в технике связи ПГУТИ. Область научных интересов: волоконная оптика, телекоммуникационные системы, оптические солитоны, сверхширокополосные системы передачи. E-mail: [volkov\\_ka\\_lsits@mail.ru](mailto:volkov_ka_lsits@mail.ru).

**Кубанов Виктор Павлович**, 1944 года рождения, доктор технических наук, профессор, в 1967 году окончил с отличием Куйбышевский электротехнический институт связи по специальности «Инженер радиосвязи и радиовещания», работает профессором кафедры электродинамики и антенн ПГУТИ. Область научных интересов: антенны и СВЧ-устройства. E-mail: [kubanov@psati.ru](mailto:kubanov@psati.ru).

**Тяжев Анатолий Иванович**, 1948 года рождения, доктор технических наук, профессор, в 1972 году окончил с отличием Куйбышевский электротехнический институт связи по специальности «Инженер радиосвязи и радиовещания», работает профессором кафедры радиосвязи, радиовещания и телевидения ПГУТИ. Область научных интересов: системы мобильной связи, системы автоматического управления, цифровая обработка сигналов. E-mail: [tyagev@psati.ru](mailto:tyagev@psati.ru).

ГРПТИ: 49.44.29

Поступила в редакцию 5 октября 2016 г. Окончательный вариант – 29 ноября 2016 г.

## INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIERS AS A MULTIFUNCTIONAL DEVICE FOR RADIO-OVER-FIBER SYSTEMS

V.A. Andreev<sup>1</sup>, V.A. Burdin<sup>1</sup>, K.A. Volkov<sup>1</sup>, V.P. Kubanov<sup>1</sup>, A.I. Tyagev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

### Abstract

The paper discusses options for using semiconductor optical amplifiers in the radio-over-fiber systems. A theoretical evaluation of parameters of the optical amplifier, modulator and detector implemented on the basis of a semiconductor optical amplifier is made. Parameters of a multifunctional optical amplifier-modulator-detector based on the semiconductor optical amplifier are also estimated.

**Keywords:** semiconductor optical amplifiers, modulator, detector, radio-over-fiber systems.

**Citation:** Andreev VA, Burdin VA, Volkov KA, Kubanov VP, Tyagev AI. Investigation of characteristics of semiconductor optical amplifiers as a multifunctional device for radio-over-fiber systems. *Computer Optics* 2016; 40(6): 844-849. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-844-849.

### References

- |   |   |
|---|---|
| <p>[1] Cooper AJ. 'Fibre/Radio' for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network. <i>Electronics Letters</i> 1990; 26(24): 2054-2056. DOI: 10.1049/el:19901325.</p> <p>[2] Gomes NJ, Morant M, Alphones A, Cabon B, Mitchell JE, Lethien C, Csörnyei M, Stöhr A, Iezekiel S. Radio-over-fiber transport for the support of wireless broadband services. <i>Journal of Optical Networking</i> 2009; 8(2): 156-178. DOI: 10.1364/JON.8.000156.</p> <p>[3] Zhensheng J, Jianjun Y, Georgios E, Gee-Kung C. Key Enabling technologies for optical-wireless networks: opti-</p> | <p>cal millimeter-wave generation, wavelength reuse, and architecture. <i>Journal of Lightwave Technology</i> 2007; 25(11): 3452-3471. DOI: 10.1109/JLT.2007.909201.</p> <p>[4] Connelly MJ. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model. <i>IEEE Journal of Quantum Electronics</i> 2001; 37(3): 439-447. DOI: 10.1109/3.910455.</p> <p>[5] O'Mahoney MJ. Semiconductor laser optical amplifier for use in fiber systems. <i>Journal of Lightwave Technology</i> 1988; 6(4): 531-544. DOI: 10.1109/50.4035.</p> <p>[6] Kaminow I, (ed.), Li T, Willner AE. <i>Optical fiber telecommunications: systems and networks</i>. 6th ed. Vol. VIA. Waltham, USA: Academic Press; 2013. ISBN: 978-0-12-396958-3.</p> |
|---|---|

- [7] Kaminow I, (ed.), Li T, Willner AE. Optical Fiber Telecommunications: Systems and Networks. 6th ed. Vol. VIB. San Diego, USA: Academic Press; 2013. ISBN: 978-0-12-396960-6.
- [8] Duraev VP, Medvedev SV. Semiconductor optical amplifiers for the 840–1550 nm spectral range [In Russian]. *Nauchnoe Priborostroenie* 2012; 22(3): 53-57.
- [9] Udvary E, Bercei T. Multifunctional SOAs in optical communication systems. *ICTON '09 2009*: 1-4. DOI: 10.1109/ICTON.2009.5185045.
- [10] Udvary E, Bercei T. Semiconductor Optical Amplifier for Detection Function in Radio Over Fiber Systems. *Journal of lightwave technology* 2008; 26(15): 2563-2570. DOI: 10.1109/JLT.2008.927187.
- [11] Andreev VA, Burdin AV, Burdin VA, Naryshkin MI. Semiconductor optical amplifier for “radio-over-fiber” systems of telecommunication networks [In Russian]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki* 2015; 11: 14-18.
- [12] Xiangfei C, Zhichao D, Jianping Y. Photonic generation of microwave signal using a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 2006; 54(2): 804-809. DOI: 10.1109/TMTT.2005.863064.
- [13] Insua GI, Plettemeier D, Schäffer ChG. Simple remote heterodyne radio-over-fiber system for gigabit per second wireless access. *Journal of Lightwave Technology* 2010; 28(16): 2289-2295. DOI: 10.1109/JLT.2010.2042426.

#### Authors' information

**Vladimir Alexandrovich Andreev** (b. 1951), Doctor of Technical Science, Professor, Honored worker of science of the Russian Federation, graduated from Kuibyshev Electrotechnical Institute of Communications (KEIC, presently – Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI)) in 1974, majoring in Multichannel Electrocommunication. Currently he is the Head of Communication Lines department in PSUTI. Research interests include communication lines and electromagnetic compatibility of telecommunications systems, fiber optic transmission lines, construction of efficient technologies and the technical operation of optical transmission lines. E-mail: [andreev@psati.ru](mailto:andreev@psati.ru).

**Vladimir Alexandrovich Burdin** (b. 1953), Doctor of Technical Science, Professor, graduated from KEIC (presently – PSUTI) in 1975, majoring in Multichannel Electrocommunication. Currently he works as the Vice-Rector for Science and Innovation in PSUTI. Research interests include optical fiber transmission line, effective construction technology and technical operation of optical communication lines, application of optical solitons in dispersion managed lines, application of few-mode regime in optical communication networks. E-mail: [burdin@psati.ru](mailto:burdin@psati.ru).

**Kirill Alexandrovich Volkov** (b. 1986), Candidate of Technical Science, received Eng. Deg. in 2008 in Communication Networks and Switching Systems from Povolzhskaya State Academy of Telecommunications and Informatics (presently – PSUTI). He works as the Assistant Professor at the Communication Lines department in PSUTI. His research interests include application of optical solitons in dispersion managed lines and application of radio-over-fiber technology in communication lines. E-mail: [volkov\\_kal@mail.ru](mailto:volkov_kal@mail.ru).

**Viktor Pavlovich Kubanov** (b. 1944), Doctor of Technical Science, Professor, graduated from KEIC (presently – PSUTI) in 1967, majoring in Engineer of Radio and Broadcasting. He works as the Professor at the Electrodynamics and Antennas department in PSUTI. His research interests include antennas and microwave devices. E-mail: [kubanov@psati.ru](mailto:kubanov@psati.ru).

**Anatoly Ivanovich Tyagev** (b. 1948), Doctor of Technical Science, Professor, graduated from KEIC (presently – PSUTI) in 1972, majoring in Engineer of Radio and Broadcasting. He works as the Professor at the Radio Broadcasting and Television department in PSUTI. His research interests include mobile communication systems, automatic control systems, digital signal processing. E-mail: [tyagev@psati.ru](mailto:tyagev@psati.ru).

*Received October 5, 2016. The final version – November 29, 2016.*