



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.7>

УДК: 621.383

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕДАЮЩИЕ И ПРИЕМНЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ СВЧ-ДИАПАЗОНА

М.А. Ладугин, А.В. Иванов, В.А. Симаков, Н.В. Гультиков, Н.Н. Брагин,  
А.С. Дудин, А.А. Мармалюк, Ю.Л. Рябоштан, В.Н. Светогоров, Ю.В. Курнявко,  
А.И. Данилов, К.В. Курносков, Р.В. Чернов, В.В. Шишков

Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха  
117342, г. Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1

Статья поступила в редакцию 2 декабря 2025 г.

**Аннотация.** Настоящая работа посвящена разработке приемного оптоэлектронного модуля с рабочей частотой до 12 ГГц и принимаемой мощностью до 50-60 мВт на основе однозарядного фотодиода, а также разработке модуля на основе мощного (выше 100 мВт) одночастотного лазера с распределенной обратной связью на длине волны 1,55 мкм.

**Ключевые слова:** приемный оптоэлектронный модуль, однозарядный фотодиод, мощный лазерный диод с распределенной обратной связью, передающий оптоэлектронный модуль

**Автор для переписки:** Гультиков Никита Владимирович,  
[nikita.gultickov@yandex.ru](mailto:nikita.gultickov@yandex.ru)

### Введение

Одним из ключевых элементов волоконно-оптической линии связи является радиофотонный тракт, который обычно содержит в себе такие компоненты, как лазерный диод, электрооптический модулятор, оптоволоконный тракт и быстродействующий фотодиод. В настоящий момент данные компоненты

реализуются в виде герметизированных модулей с коаксиальными и оптическими входами/выходами.

При оценке эффективности фотодиода (ФД) основными показателями всегда были быстродействие и квантовая эффективность. В дополнение к этим характеристикам одним из важнейших параметров теперь становится эффективность ФД при большом уровне оптического сигнала (десятки и сотни милливатт). Это связано с тем, что фотоприемник, состоящий из оптического предварительного усилителя и высокоомощного ФД может дать лучшие результаты, чем обычный фотоприемник с электрическим пост-усилителем. Традиционно для приема оптического сигнала используются PiN фотодиоды. Среди преимуществ PiN фотодиодов можно выделить простоту конструкции гетероструктуры и высокую чувствительность. Недостатки этих фотодиодов заключаются в ограничении полосы пропускания за счет времени пролета дырок. Так же из-за низкого легирования поглощающей области PiN фотодиода прикладываемое к нему обратное напряжение смещения создаёт внутри ФД «экранирующее поле», что препятствует прохождению новых носителей через гетероструктуру [1]. Эти недостатки приводят к относительно быстрому насыщению PiN ФД, особенно для высокочастотных применений. Так, PiN ФД с диаметром фоточувствительной площадки в районе 40 мкм испытывает насыщение при уровне оптической мощности 10 мВт (приложенное обратное напряжение 5 В, частота  $8 \div 12$  ГГц, длина волны 1.55 мкм) [1,2,3]. Одной из причин быстрого насыщения является вклад «медленных» дырок в скорость пролета носителей через структуру ФД. Потребность в ФД, способных принять мощный оптический сигнал (на уровне 40-70 мВт) привела к появлению фотоприемников на основе однозарядных ФД (ОзФД).

Однозарядные фотодиоды отличаются от традиционных PiN ФД разделением поглощающего слоя и слоя сбора носителей (рис. 1). Поглощающий слой (p-InGaAs) легирован p-типом примеси, соседствует с нелегированным или низколегированным собирающим слоем (i-InP). Слой p-InGaAs поглощает излучение с последующей генерацией электронно-дырочных пары носителей,

которые впоследствии разделяются внешним электрическим полем. Барьер для носителей (p-InP) в зоне проводимости предотвращает диффузию электронов к р-контакту, в то время как уширение в валентной зоне на границе собирающего и поглощающего слоев подавляет диффузию дырок в собирающий слой (i-InP). В результате только электроны инжектируются в собирающий слой и ускоряются под действием внешнего электрического поля, а дырки быстро достигают р-контакта. Конфигурация ОзФД, реализуемая в InGaAs/InP-системах с помощью МОС-гидридной эпитаксии, обеспечивает доминирующий вклад исключительно быстрых электронов в транспорт носителей, минимизируя влияние медленных дырок [2]. Таким образом, если стоит задача принять мощный оптический сигнал в ближнем ИК-диапазоне, однозарядные фотодиоды на основе InGaAs выглядят перспективным решением.

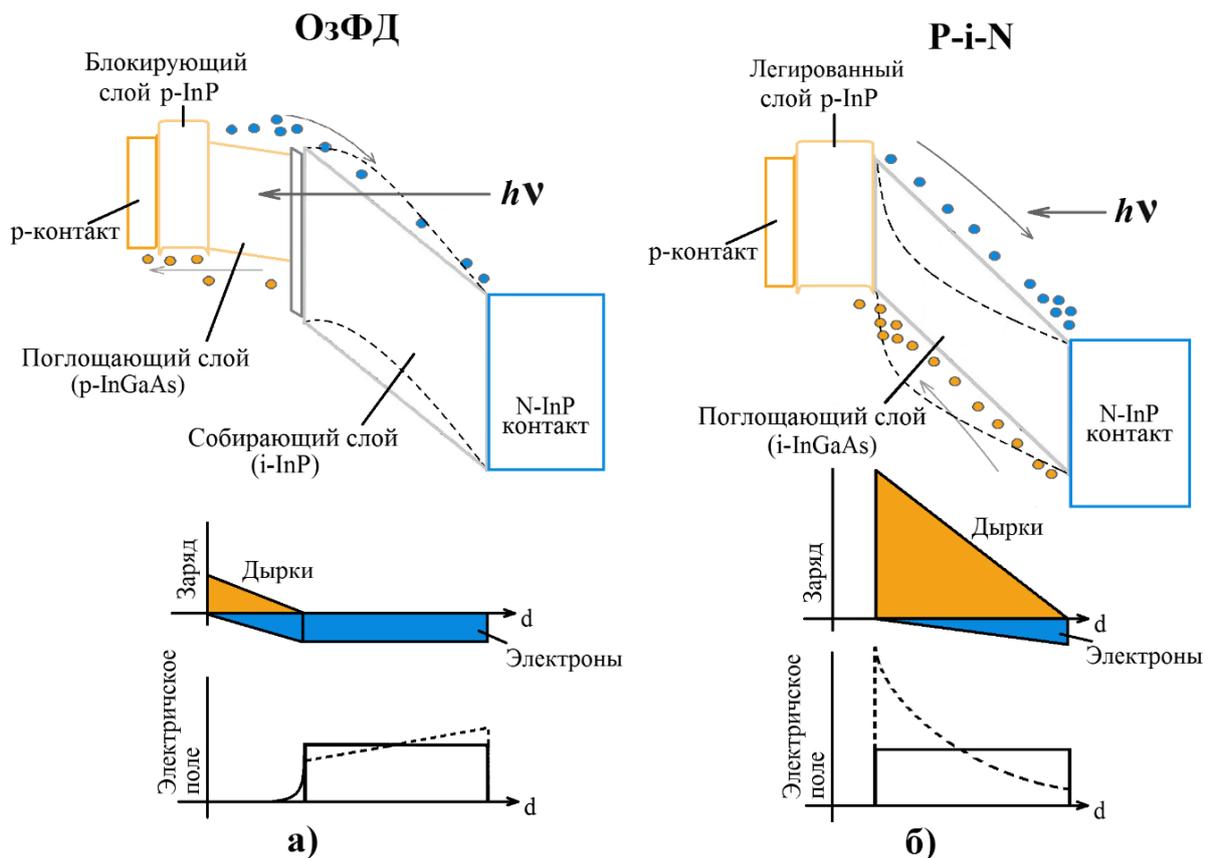


Рис. 1. Зонная диаграмма, распределение носителей заряда при воздействии света на поглощающий слой и распределение электрического поля для ОзФД (а) и P-i-N фотодиода (б). Распределение энергетических зон и электрического поля при низком уровне входного излучения указано сплошными линиями, при высоком – прерывистыми.

Что касается другого компонента радиифотонного тракта – лазерного диода (ЛД), то для уменьшения влияния дисперсии на передачу в волокне информационных сигналов необходимо использовать одночастотные ЛД с интегральной распределенной обратной связью (РОС-лазеры). Ключевыми эксплуатационными преимуществами РОС-лазеров, вытекающими непосредственно из их физического устройства, являются одночастотный характер излучения и высокая линейность ватт-амперной характеристики. В отличие от многомодовых лазеров с резонатором Фабри-Перо, где конкуренция мод приводит к нелинейностям и флуктуациям выходной мощности, распределенная обратная связь обеспечивает стабильную генерацию единственной моды. Это фундаментальное свойство напрямую ведет к снижению шумов в линиях передачи. Как следствие, системы связи на основе РОС-лазеров демонстрируют значительное улучшение таких критических параметров, как отношение сигнал/шум и динамический диапазон [4-7].

Физический принцип работы РОС-лазера основан на явлении брэгговской дифракции. В соответствии с условием Брэгга, обратное рассеяние происходит эффективно только для определенной длины волны, определяемой периодом решетки. Это отражение является распределенным по всей длине резонатора, в отличие от дискретных зеркал в резонаторах Фабри-Перо, формируемых сколом кристалла. В результате такого распределенного взаимодействия в структуре устанавливается стоячая волна, а обратная связь, необходимая для генерации, обеспечивается непрерывно по всей активной области. Периодическая структура создает встречные волны, обеспечивая двунаправленную распределенную обратную связь, что и лежит в основе высокоселективных одночастотных характеристик данного типа лазеров [8-9]. Реализация же мощных РОС-лазеров предъявляет исключительные требования к используемым гетероструктурам. Необходимо одновременно добиться низких оптических потерь, высокой внутренней квантовой эффективности и высокой теплопроводности. Поскольку эти требования зачастую конфликтуют, важным этапом становится оптимизация геометрии всей гетероструктуры с учетом особенностей активной области.

Технология создания брэгговских дифракционных решеток для РОС-лазеров предъявляет исключительные требования к точности. Расчетный период такой решетки, определяемый условием Брэгга для целевой длины волны и эффективным показателем преломления активных и волноведущих слоев структуры, обычно составляет величину порядка 230-250 нм. Следовательно, при стандартном соотношении штрихов 1:1, ширина отдельного выступа (или впадины) рельефа достигает всего 115-125 нм.

В связи с этим, целью настоящей работы была разработка приемного модуля на основе мощного однозарядного фотодиода, а также мощного РОС-лазера и передающего оптического модуля на его основе.

### **Результаты и обсуждение**

На основе однозарядных фотодиодов на основе системы материалов InGaAs/InP были созданы приемные оптоэлектронные модули. Они предназначены для преобразования входного СВЧ-модулированного оптического сигнала диапазона 0,1-12 ГГц в выходной СВЧ-модулированный электрический сигнал в волоконно-оптических линиях связи. Основная отличительная особенность разработанных модулей – высокий выходной фототок насыщения [3]. При принимаемой мощности излучения до 50 мВт на длине волны 1,55 мкм сохраняется рабочий диапазон частот 0,1-12 ГГц (рис. 2 и 3). Спектральная чувствительность составляет не менее 0,7 А/Вт для диапазона длин волн 1,5-1,6 мкм. А выходной фототок при 1дБ компрессии – не менее 26 мА. Коэффициент передачи совместно с передающим оптическим модулем – не менее минус 32 дБ при частоте модуляции 5 ГГц. На рисунке 4 представлено исполнение.

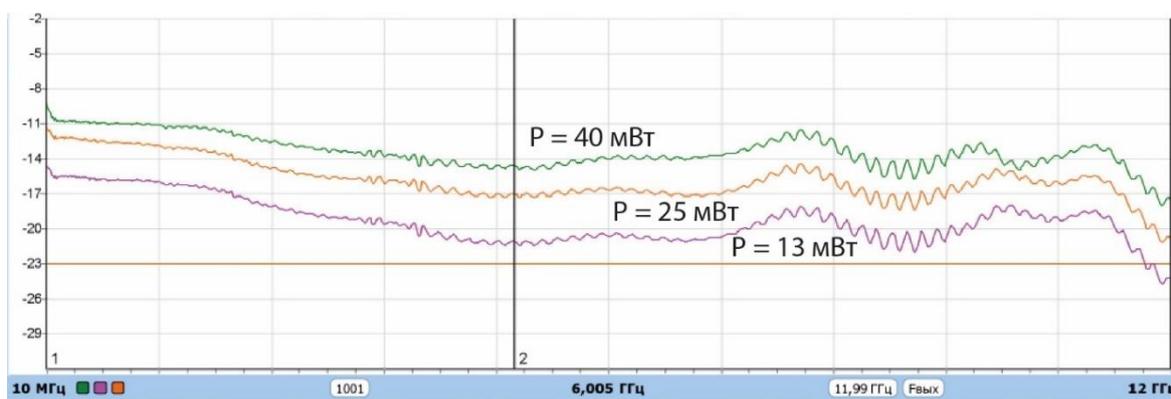


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика приемного модуля при различной входной мощности: 13 мВт, 25 мВт, 40 мВт.

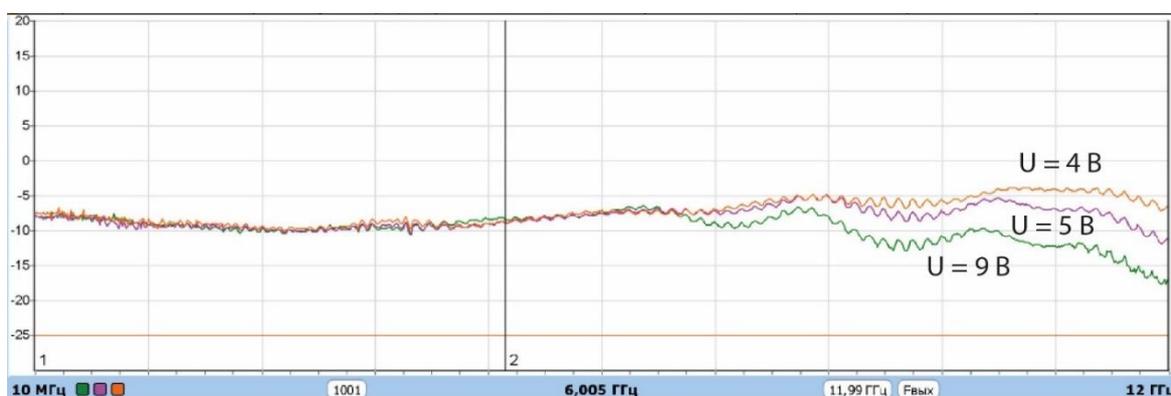


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика приемного модуля при рабочем напряжении 4В, 5В и 9В при принимаемой мощности 50 мВт.

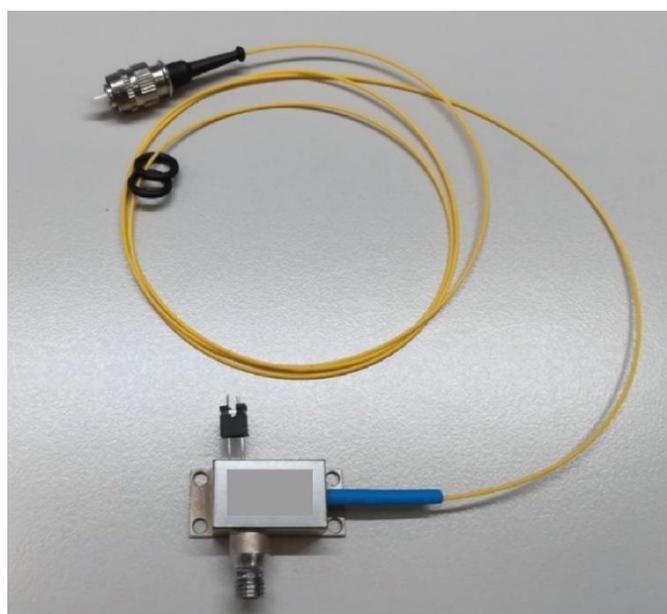


Рис. 4. Волоконно-оптический приемный модуль для широкополосных систем передачи СВЧ-диапазона.

Разработанные РОС-лазеры были изготовлены на основе квантово-размерной гетероструктуры в системе материалов AlInGaAs/InP. Данная система материалов

выбрана для возможности точной настройки ширины запрещенной зоны и согласования с подложкой. Конструкция активного элемента такого лазера включает узкий меза-полосок и брэгговскую решетку, что способствует эффективному ограничению моды, подавлению мод высшего порядка и теплоотводу. На рисунке 5 представлен активный элемент РОС-лазера.

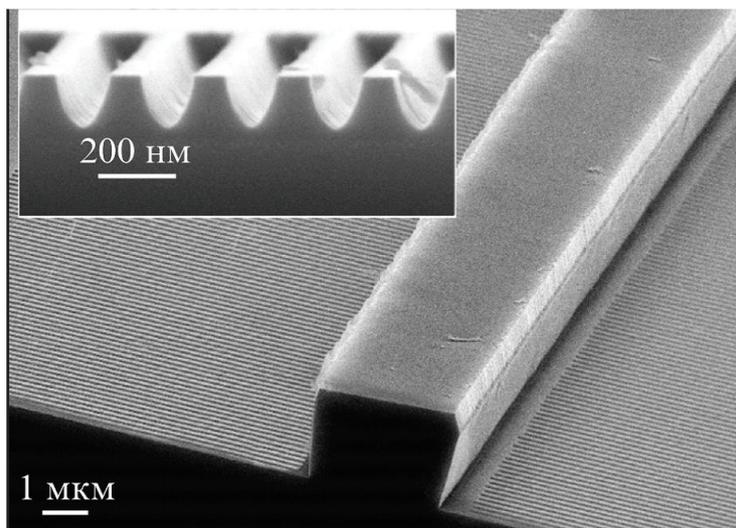


Рис. 5. Активный элемент РОС-лазера с боковой брэгговской решеткой.

РОС-лазеры обеспечивают высокую выходную оптическую мощность излучения более 120 мВт (рис. 6). Важнейшим показателем качества одночастотной генерации является подавление боковых мод, которое для данных приборов превышает 55 дБ [4]. Ширина линии генерации лежит в диапазоне 200-300 кГц.

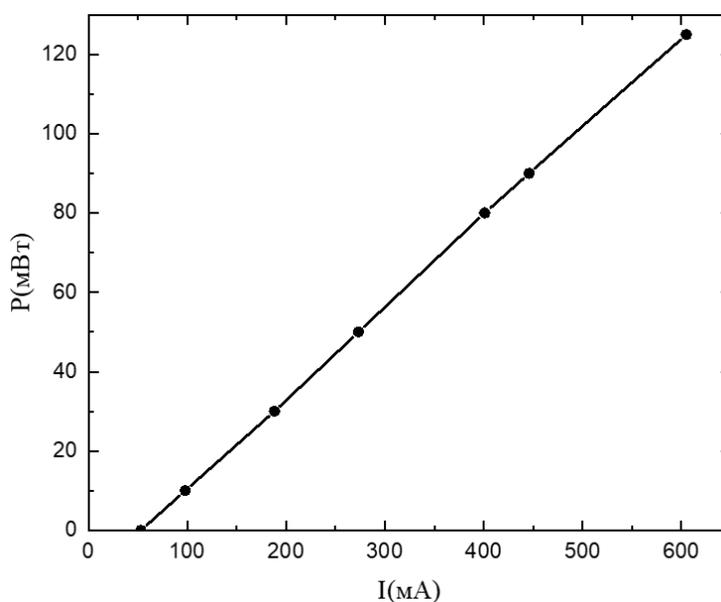


Рис. 6. Ватт-амперная характеристика.

На основе РОС-лазера были изготовлены передающие оптические модули. На рисунке 7 представлено исполнение данного модуля. Мощность излучения на выходе оптического соединителя лазера обеспечивается на уровне не менее 50 мВт при токе накачки порядка 300 мА, при этом подавление боковых мод составляло величину более 55 дБ [4]. Коэффициент подавления побочной моды составил 30 дБ. Относительная интенсивность шума (RIN) – не более минус 150 дБ/Гц.

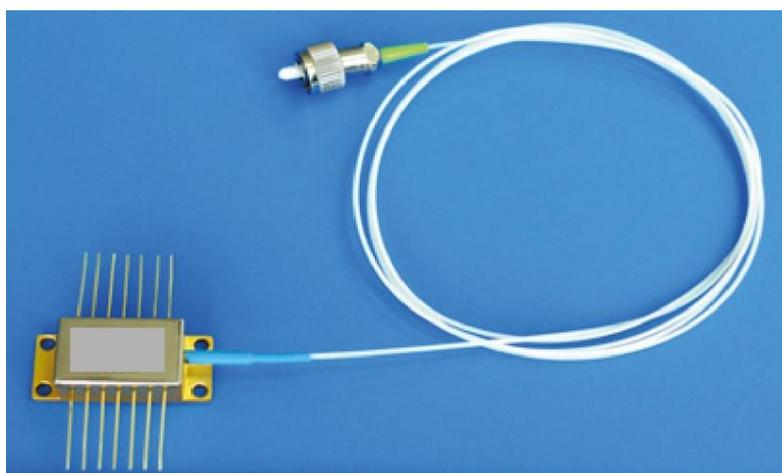


Рис. 7. Волоконно-оптический передающий модуль для широкополосных систем передачи СВЧ-диапазона.

## Заключение

Таким образом в настоящей работе представлены результаты разработки приемного модуля на основе мощного однозарядного фотодиода с рабочей частотой от 0.1 до 12 ГГц и принимаемой мощностью до 50-60 мВт, а также разработка мощного РОС-лазера с длиной волны излучения 1,55 мкм и выходной оптической мощностью более 120 мВт и передающего оптического модуля на его основе.

## Литература

1. Чистохин И. Б., Журавлев К. С. СВЧ-фотодетекторы для аналоговой оптоволоконной связи //Успехи прикладной физики. – 2015. – Т. 3. – №. 1. – С. 85-94.

2. Ishibashi T. et al. InP/InGaAs uni-traveling-carrier photodiodes //IEICE transactions on electronics. – 2000. – Т. 83. – №. 6. – С. 938-949.
3. Bragin N. N. et al. Features of High-Power Uni-Traveling-Carrier InGaAs/InP Photodiodes //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2024. – Т. 51. – №. Suppl 2. – С. S180-S184. <https://doi.org/10.3103/S1068335624600542>
4. Багаева О. О. и др. Экспериментальные исследования мощных полупроводниковых одночастотных лазеров спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм //Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50. – №. 2. – С. 143-146. <https://doi.org/10.1070/QEL17183>
5. Kogelnik H., Shank C. V. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers //Journal of applied physics. – 1972. – Т. 43. – №. 5. – С. 2327-2335. <https://doi.org/10.1063/1.1661499>
6. Morthier G., Vankwikelberge P. Handbook of distributed feedback laser diodes. – Artech House, 2013.
7. Yariv A. Optical electronics in modern communications //(No Title). – 1997.
8. Kogelnik H. Theory of optical waveguides //Guided-wave optoelectronics. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990. – С. 7-88. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-97074-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-97074-0_2)
9. Rosencher E., Vinter B. Optoelectronics. – Cambridge University Press, 2002.

**Для цитирования:**

Ладугин М.А., Иванов А.В., Симаков В.А. и др. Волоконно-оптические передающие и приемные оптоэлектронные модули для широкополосных систем передачи СВЧ-диапазона. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.7>