

УДК [621.39+ 004.77]

## ГИГАБИТНЫЕ ПАССИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ С РАСШИРЕННОЙ ЗОНОЙ ДОСЯГАЕМОСТИ



**А.Д. Тусупов**  
PhD докторант  
специальности  
Информационные  
системы, Евразийского  
национального  
университета им.  
Л.Н.Гумилева



**Н.И. Листонад**  
Доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
Информационных  
радиотехнологий Белорусского  
Государственного Университета  
Информатики и  
Радиоэлектроники



**А.Т. Тохметов,**  
кандидат физико-  
математических наук,  
доцент кафедры  
Информационных систем  
Евразийского  
национального  
университета имени  
Л.Н.Гумилева

Кафедра Информационных систем Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева  
Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, г.Нур-Султан, Республика Казахстан  
E-mail: tussupov@gmail.com

### **А.Д. Тусупов**

Выпускник Технологического института Карлсруэ (г.Карлсруэ, Германия) по специальности информационная и коммуникационная инженерия. Имеет академическую степень магистра наук, PhD докторант специальности Информационные системы, Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева.

### **Н.И. Листонад**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета Информатики и Радиоэлектроники (с 2016 года по настоящее время), руководитель Офиса программы Европейской Комиссии Темпус (в настоящее время - программы - Erasmus+). Защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности «Телекоммуникационные системы и компьютерные сети» (2001 г.). Обладатель почетных грамот и почетного знака «Отличник образования Республики Беларусь».

### **А.Т. Тохметов**

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных систем Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева (с 2016 года по настоящее время). Окончил аспирантуру в Ленинградском физико-техническом институте имени А.Ф.Иоффе АН СССР – диплом кандидата физико-математических наук по специальности «01.04.07–Физика твердого тела» (1989 г.), доцент по специальности «Информатика и информационные системы» (2002 г.). Обладатель почетных грамот Министерства образования и науки Республики Казахстан.

**Аннотация.** Гигабитные пассивные оптические сети (GPON) являются наиболее передовой технологией. Скорость передачи данных составляет 2,5 Гбит/с для прямого и обратного потоков. Но данная архитектура сети имеет ограниченную физическую длину сети в 20 км. Это связано с высокими бюджетными потерями сети. Такое ограничение доступа делает сеть труднодоступной для абонентов, расположенных далеко от объектов телеком-оператора и покрытие удаленных населенных пунктов является достаточно инвестиционно-ёмким, тем самым усложняет устранение цифрового неравенства между городом, пригородом и селом. Для

решения данной проблемы предлагается использование оптических усилителей, которые расширят зону досягаемости GPON до 60 км, что является пределом для логической длины по текущим протоколам.

**Ключевые слова:** GPON, последняя миля, оптический усилитель, гибридная WDM/TDM GPON.

*Введение.* В наши дни в целях обеспечения качественной цифровой связью, а также предоставления доступа к инновационным цифровым услугам, таких как электронное правительство, цифровое телевидение, облачные решения, и развитие умных городов, образовательных, медицинских и государственных учреждений должна быть возможность к подключению высокоскоростного интернета. К сожалению, телекоммуникационные инфраструктуры и широкополосной доступ к сети Интернет труднодоступны для абонентов, расположенных далеко от объектов телеком-оператора. Покрытие удаленных населенных пунктов является достаточно инвестиционно-ёмким, тем самым усложняя устранение цифрового неравенства между городом, пригородом и селом. «Волокно до дома» FTTH (Fiber-to-the-Home) – это понятие описывает общий подход к организации кабельной инфраструктуры сети доступа, при которой от узла связи до абонента используется оптическое волокно. Это позволяет заменить существующую медно-кабельную инфраструктуру сетей абонентского доступа на оптическое волокно, с высокой пропускной способностью, многократно превышающую пропускную способность всех других систем связи и может измеряться терабитами в секунду. Одной из перспективных технологий FTTH для систем оптоволоконного доступа являются пассивные оптические сети PON (Passive Optical Network). Пассивные оптические сети (PON) могут решить проблему последней мили, в результате чего информация дойдет до пользователя со скоростью передачи данных в гигабит в секунду.

*1 Архитектура и стандарты пассивной оптической сети.* Архитектура PON, изображенная на рис. 1, состоит из одного приемопередающего модуля в OLT (Optical Line Terminal), расположенного в центральном узле связи, пассивного оптического разветвителя и множества абонентских устройств ONU (Optical Network Unit) или ONT (Optical Network Terminal). ONU используется в терминологии IEEE (института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике), а ONT в терминологиях ITU-T (международного союза электросвязи), Технология PON достигает физической длины до 20 километров от узла связи до абонента и к оптическому сплиттеру (разветвителю) можно подключить от 32-128 абонентских узлов (теоретическое число абонентских узлов может быть настолько большим, насколько позволяет бюджет мощности и максимальная скорость приемопередающей аппаратуры). Передача потока информации от центрального узла OLT к абонентскому узлу ONU называется прямым (нисходящим) потоком (ПП), а потоки данных от разных абонентских узлов ONU в центральный узел OLT, называется обратным (восходящим) потоком (ОП).

PON состоит из трех основных стандартов: Broadband PON (BPON), Ethernet PON (EPON) и Gigabit PON (GPON). Эти стандарты имеют различные характеристики и их свойства перечислены в Табл. 1. Технология EPON является стандартом IEEE 802ah [1] и использует протокол Ethernet. Скорость передачи данных по прямым и обратным потокам составляют 1000 Мбит/сек. Физическая длина сети 10 км с соотношением разветвления на 1:16 или 1:32. Технология BPON является стандартом ITU-T G.983 [2] и использует протокол асинхронной передачи данных ATM (Asynchronous Transfer Mode). Скорость передачи данных по прямым потокам составляет 622 Мбит/сек и по обратным потокам 155 Мбит/сек. Физическая длина сети 20 км с соотношением разветвления 1:32. Технология GPON является стандартом ITU-T G.984 [3] и использует протоколы Ethernet или мультиплексирование с разделением времени TDM (Time Division Multiplexing). Скорость передачи данных по прямым потокам составляет 2488 Мбит/сек и по обратным потокам 1244 Мбит/сек. Физическая длина сети 20 км, с соотношением разветвления на 1:32 или 1:64.

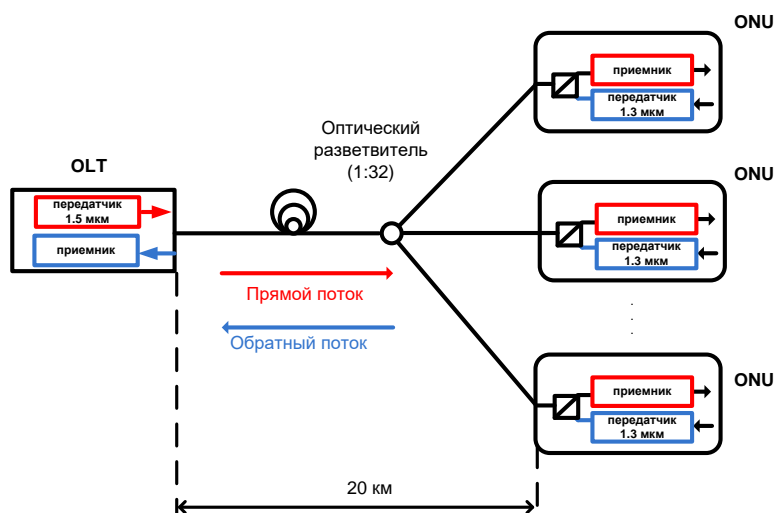


Рисунок 1. – Архитектура пассивной оптической сети PON.

Таблица 1. – Основные характеристики и свойства PON [4]

Характеристика	EPON	BPON	GPON
Стандарт	IEEE 802.3ah	ITU-T G.983	ITU-T G.984
Протокол	Ethernet	ATM	Ethernet, TDM
Скорость передачи, (Мбит/сек)	1000, ПП и ОП	622 ПП, 155 ОП	2488 ПП, 1244 ОП
Длина сети (км)	10	20	20
Соотношение разветвления	16 или 32	32	32 или 64

Сравнивая вышеперечисленные стандарты пассивно оптических сетей, мы определяем, что GPON является самой передовой технологией, поскольку данная технология предоставляет высокую скорость передачи данных 2,5 Гбит/сек и 1,2 Гбит/сек для прямого и обратного потоков соответственно. GPON поддерживает различные протоколы, возможности увеличения оптического соотношения разветвления и является последним стандартом для пассивных оптических сетей.

По рекомендациям ITU-T G.984, GPON поддерживает оптический бюджет мощности в 28 дБ, что практически ограничивается фактором соотношения разветвления 1:32 и длины сети не более 20 км. Если ограничения на физическом уровне могут быть преодолены, тогда можно поддерживать логическую длину сети до 60 км и логическое разветвление до 128 абонентских узлов.

2 Гибридная WDM/TDM GPON с расширенной зоной досягаемости. Гибридная пассивная оптическая сеть TDM/WDM является эффективным решением для оптических сетей доступа. Этот метод доступа сочетает преимущества технологий временного мультиплексирования (TDM) и спектрального уплотнения (WDM), что позволяет повышения спектральной эффективности сети. Это же сочетание позволяет передавать данные, уплотненные во времени, по каждому спектрально уплотненным каналом, что приводит к

увеличению количество абонентов.

Как уже отмечалось выше, архитектура технологий GPON из-за бюджетных потерь в сети в 28 дБ имеет ограниченную физическую длину 20 км. Данное ограничение длины сети обуславливается трудностью обслуживания абонентов, расположенных далеко от центрального узла связи. Но бюджет мощность сети может быть увеличен путем добавления в сеть оптических усилителей. В таком случае, логическая длина сети GPON может достичь длины более 60 км. Рис. 2 иллюстрирует расширенную зону досягаемости гибридной сети WDM/TDM GPON с использованием встроенного оптического усилителя до логической длины, превышающей 60 км.

Расширения зоны досягаемости гибридной WDM/TDM GPON сети имеет свои преимущества:

- 1) Увеличенная длина сети:
  - а) объединяет тысячи центральных узлов связи в несколько городских узлов связи;
  - б) достигает абонентов, которые расположены далеко от центрального узла связи и неравномерно распределены по географическим зонам;
  - в) инфраструктура, сокращенных местных и региональных центральных узлов связи, может быть предназначена для установки оптических усилителей;
  - г) значительная экономия капитальных и эксплуатационных расходов [5];
- 2) В гибридной WDM/TDM GPON архитектуре количество пользователей может превышать более 1000 пользователей на OLT порт [6];
- 3) Высокая скорость прямого и обратного потоков трафика и имеется возможность легкого усовершенствования до 40 Гбит/сек;
- 4) Высокая пропускная способность для каждого пользователя;
- 5) Единый интерфейс для оптоволоконна;
- 6) Простая масштабируемость и возможность модернизации;
- 7) Мульти-эксплуатация (оптоволоконная инфраструктура, эксплуатируемая несколькими операторами);
- 8) Централизованное управление и мониторинг;
- 9) Отказоустойчивость и балансировки трафика.

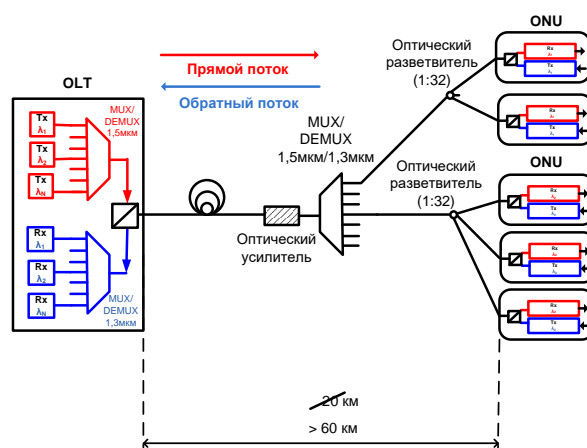


Рисунок 2. – Гибридная WDM/TDM GPON с использованием встроенного оптического усилителя с расширенной зоной досягаемости, с логической длиной выше чем 60 км

3 Требования к оптическим усилителям для GPON с расширенной зоной досягаемости. Для расширения зоны досягаемости сети WDM/TDM GPON требуются использование оптических усилителей. Существуют различные типы оптических усилителей, которые

показывают высокий потенциал в качестве линейных усилителей:

- Оптоволоконные усилители легированные редкоземельными элементами такие, как: эрбий (Er); неодим (Nd); иттербий (Yb); тулий (Tm); празеодим (Pr);
- Полупроводниковые оптические усилители (ППОУ): объемные ППОУ и ППОУ с наноразмерной гетероструктурой такие, как ППОУ на квантовых ямах (Quantum Well - QW), ППОУ на квантовых точках (Quantum Dots - QD);
- Рамановский усилитель.

Чтобы выбрать лучшие оптические усилители для расширения зоны досягаемости сети eGPON, в первую очередь, усилители должны выполнять требования PON и соответствовать стандартам GPON ITU-T. Усилители должны быть дешевые по цене, поскольку стоимость оптического усилителя делиться между всеми абонентов сети PON. А также оптические усилители должны быть приспособлены к приложениям используемые в будущем.

Требования к оптическим усилителям для прямого потока (Таблица 2):

- Функционирование в диапазоне длин волн 1,5 мкм;
- Передача данных со скоростью выше 2,5 Гбит / с;
- Усиление всех спектрально уплотненных каналов на одинаковом уровне и с низкими межканальными перекрестными помехами.

Для передачи сигнала по обратному потоку требования гораздо выше. Потери перед усилителем намного выше, чем по прямому потоку в основном из-за оптического разветвления. Также абоненты сети географически распределены так, что расстояние до усилителя сильно варьируется.

Требования к оптическим усилителям для обратного потока (Таблица 2):

- Функционирование в диапазоне длин волн 1,3 мкм;
- Высокий коэффициент усиления для компенсации больших потерь;
- Высокий динамический диапазон для входных мощностей (ДДВМ) необходимые для покрытия вариаций уровней мощностей от расстояния абонентов;
- Высокая устойчивость для режима пульсирующего трафика, которая является необходимым условием для связи с разным уровнем мощности сигнала.

Основные требования к усилителям для гибридной WDM/TDM GPON с расширенной зоной досягаемости приведены в Таблице 2 в сравнительной форме.

Таблица 2. – Требования к расширителям досягаемости (усилителям) GPON, разделенные для прямого и обратного потока

Прямой поток	Обратный поток
Скорость передачи данных: сегодня - 2.5 Гбит/сек; в будущем – выше 40 Гбит/сек	Высокий динамический диапазон для входных мощностей (ДДВМ)
Технологии CWDM/DWDM	Высокая устойчивость для режима пульсирующего трафика
Плоский коэффициент усиления спектрально уплотненных каналов	Высокий коэффициент усиления
	Низкие межканальные перекрестные помехи

4 Проекты по GPON с расширенной зоной досягаемости. В настоящее время ведутся активные разработки для расширение зоны досягаемости пассивных оптических сетей. Рассмотрим основные исследования в этой области, исследующие эффективность различных технологий оптических усилителей.

#### 4.1 Оптические усилители EDFA (Проект PIEMAN)

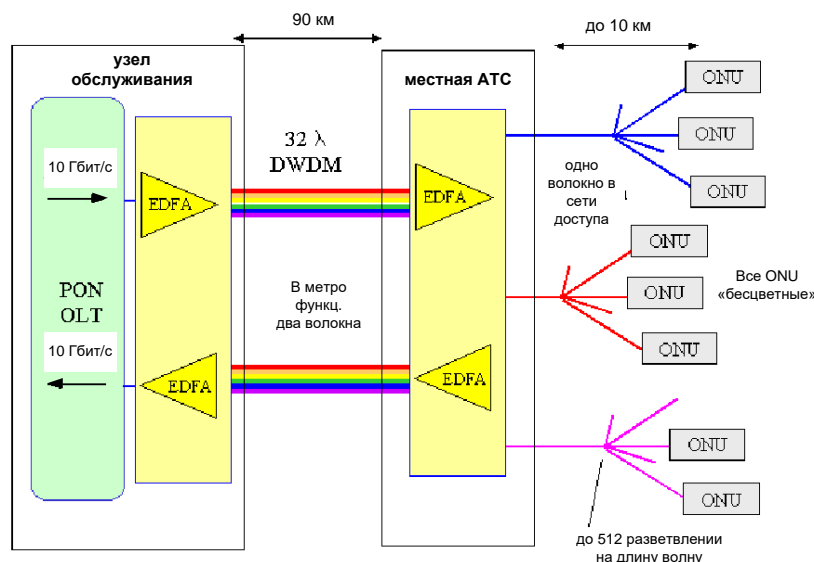


Рисунок 3. – Архитектура сети проекта PIEMAN [7]

Проект будущего широкополосного оптического доступа PIEMAN (Photonic Integrated Extended Metro and Access Network) является проектом Европейского Союза (ЕС) с общей стоимостью в € 3,9 млн. [7].

Проект PIEMAN выполняет исследования на физическом уровне для нового поколения PON с использованием спектрального уплотнения DWDM на 32 канала, где каждый канал имеет пропускную способность в 10 Гбит/с прямого и обратного потоков до каждого абонента. Каждый канал на определенной длине волны разветвляется на 512 абонентов. Проект имеет гибридную WDM/TDM структуру длиной в 100 км и использует усилители EDFA для прямого и обратного потоков. Архитектура сети проекта PIEMAN показана на рисунке 3.

Обратный поток в проекте PIEMAN не соответствует требованиям PON ITU-T. Волоконные оптические усилители, особенно для диапазона 1,3 мкм, являются очень дорогими и неразвитыми технологиями. Обратный поток находится в режиме пульсирующего трафика и требует принятия дополнительных мер к использованию волоконных усилителей. Из-за неполного подавления шумов в диапазоне возникают перекрестные помехи и, поэтому могут накладываться существенные ограничения на фактор разветвления [8].

4.2 Рамановский усилитель. Iannone и др. [9] экспериментально использовали четыре общепринятых TDM PON приема-передатчика с симметричными трафиками в 2,5 Гбит/с с использованием гибридного ППОУ-рамановского усилителя, для достижения расширенной зоной досягаемости в 60 км с общей инфраструктурой для обслуживания 128 абонентов.

Экспериментальная установка показана на рисунке 4.

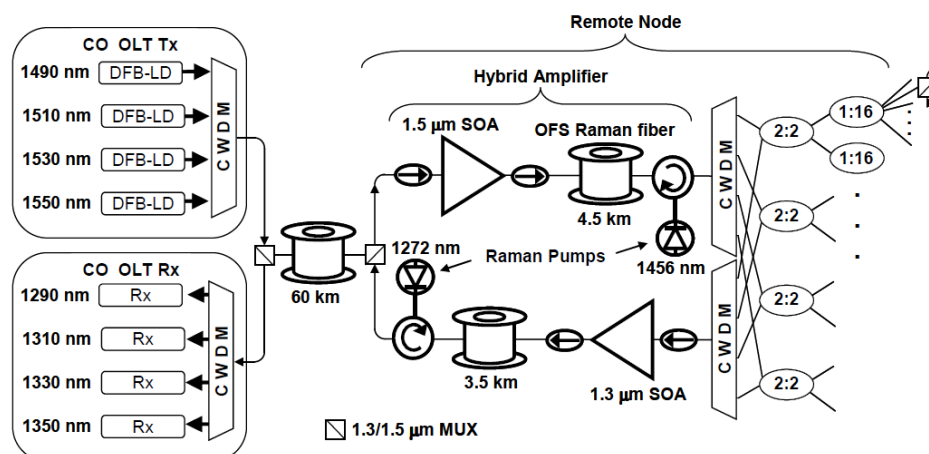


Рисунок 4. – Экспериментальная установка расширенной PON с гибридным ППОУ-рамановским усилителем

Гибридный ППОУ-рамановский усилитель обеспечивает широкую ширину спектра усиления в 150 нм, но эта технология очень дорога по цене. Рамановский усилитель неэффективен (требует мощный лазер накачки) и показывает низкий ДДВМ для обратного потока.

**4.3 Полупроводниковый оптический усилитель.** Nasset и др. [10] разработали ППОУ на длине волны 1,3 мкм для достижения расширения GPON. ППОУ показывает высокий коэффициент усиления (30 дБ) и умеренный коэффициент шума (7 дБ). Они экспериментально продемонстрировали GPON с расширенной зоной досягаемости с одним каналом для прямого и обратного потоков с оптическим разветвлением 1:32 и длиной сети в 60 км. Разработанный ППОУ имеет медленный эффект усиления, которые ограничивают ДДВМ.

**4.4 Полупроводниковые оптические усилители на квантовых точках.** Мы [11] экспериментально продемонстрировали расширение зоны досягаемости сети WDM/TDM GPON до 60 км с использованием полупроводникового оптического усилителя на квантовых точках. Все полученные сигналы не превышали ошибочный порог.

ППОУ с активной областью на квантовых точках (ППОУ-КТ) имеют локализацию носителей в нульмерном пространстве. КТ реализуются как когерентно напряженные, бездефектные островки при самоорганизованном эпитаксиальном выращивании гетероструктур несогласованных полупроводников [12]. В принципе, в ППОУ-КТ временная характеристика может быть 1000 раз быстрее, чем у ППОУ-КЯ. Это делает усилитель перспективным для использования в технологиях со скоростью 1 Тбит/сек [12]. Среда усиления в КТ показывает уникальные свойства, как сверхбыстрое восстановление усиления в порядке (~ 1 пс) [13], значительно широкую спектральную ширину усиления (~120 нм) [14], высокий коэффициент усиления (> 25 дБ) [15], низкий коэффициент шума (> 5 дБ) [16], возможность для неохлажденной работы [17], высокий динамический диапазон для входных мощностей (ДДВМ), высокая устойчивость для пульсирующего трафика [18], и поляризационную нечувствительность [19].

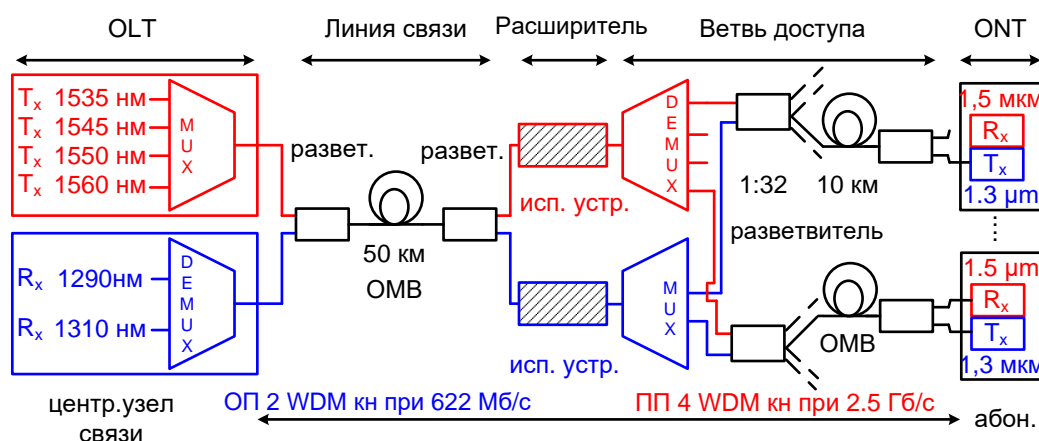


Рисунок 5. – Испытательный стенд расширенной WDM/TDM GPON с четырьмя каналами прямого потока и с двумя каналами обратного потока, где каждый канал обслуживает 32 абонента и с длиной сети в 60 км используя оптические усилители для двунаправленного усиления

Установка (рисунок 5) состоит из центрального узла с приемопередающим модулем OLT, 50 км оптического волокна (SMF-28), расширительной коробки для усилителей с испытываемым устройством, устройства мультиплексора/демультиплексора, пассивного оптического разветвителя 1:32 и абонентского узла ONT. OLT в центральном узле оборудован с четырьмя WDM каналами передатчиками (1535 нм, 1545 нм, 1550 нм, 1560 нм) для прямого потока со скоростью данных в 2,5 Гбит/с, и двумя WDM приемниками (1290 нм и 1310 нм). Четыре абонентских узлов ONT расположены на дистанции 10 км от расширительной коробки. Абонентские узлы ONT содержат четыре приемника, но из-за недостатка оборудования только два из четырех ONT оборудованы передатчиками, где генерируют поток для обратной связи со скоростью в 622 Мбит/с. Выпускаемая мощность передатчиков OLT и ONU составляет +5 дБм. Приемники идентичны с теми, которые использовались для измерения удлинение бюджета. Трафик в настоящем эксперименте является непрерывный. Бюджет потерь для 1,5 мкм прямого потока составляет 45 дБ и 48 дБ для 1,3 мкм обратного потока. Проблема поляризации ППОУ-КТ были учтены с помощью поляризационных контроллеров, настроенные на максимальную выходную мощность.

Отсутствие ошибочных порогов и перекрестных помех между каналами прямых и обратных потоков наблюдаются даже тогда, когда система работает со всеми каналами одновременно.



### **Список литературы**

- [1] Стандарт Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике IEEE Ethernet First Mile Standards 802.3ah-2004, included in 802.3-2005
- [2] Рекомендации международного союза электросвязи ITU-T Recommendations G.983
- [3] Рекомендации международного союза электросвязи ITU-T Recommendations G.984
- [4] Белая книга: Full service broadband with GPON, 2008
- [5] Davey R., Kani J., Bourgart F. and Mccammon K. Options for future optical access networks // IEEE Commun. Mag. 44 – 2006 — Vol. 6 – P. 50–56
- [6] Lázaro J.A., Prat J., Chanclou P., Tosi Beleffi G.M., Teixeira A., Tomkos I., Soila R. and Koratzinos V Scalable Extended Reach PON // OFC/NFOEC – Feb. 2008 – paper OThL2
- [7] Photonic Integrated Extended Metro and Access Network URL: <http://www.ist-pieman.org/>
- [8] Baekelandt B., Mélange C., Ossieur P., Bauwelinck J., De Ridder T., Qiu X., Vandewege J., Smith D., Davey R. Impact of crosstalk on multi-wavelength high split PON networks // BBEurope '07 – 2007 – Antwerp, Belgium.
- [9] Iannone P.P., Lee H.H., Reichmann K.C., Zhou X., Du M., Pálsdóttir B., Feder K., Westbrook P, Brar K., Mann J. and Spiekman L. Hybrid CWDM Amplifier Shared by Multiple TDM PONs // National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC) – 2007 – paper PDP13
- [10] Nasset D., Kelly T., Appathurai S. and Davey R. Extended Reach GPON Using High Gain Semiconductor Optical Amplifiers // 33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication OFC/NFOEC – 2008
- [11] Bonk R., Brenot R., Meuer C., Vallaitis T., Tussupov A., Rode J. C., Sygletos S., Vorreau P., Lelarge F., Duan G. H., Krimmel H.-G., Pfeiffer Th., Bimberg D., Freude W., Leuthold J. 1.3/ 1.5  $\mu\text{m}$  QD-SOAs for WDM/TDM GPON with Extended Reach and Large Upstream/Downstream Dynamic Range // Proc. Opt. Fiber Communication Conf. (OFC'09), San Diego, USA; OWQ1, accepted for publication
- [12] Bhattacharya P., Bimberg D., Arakawa Y. Special Issue on Optoelectronic Devices Based on Quantum Dots // IEEE – Sep. 2007 – vol. 95 – No. 9, P.1718-1722.
- [13] Vallaitis T., Koos C., Bonk R., Freude W., Laemmlin M., Meuer C., Bimberg D., Leuthold J. Slow and fast dynamics of gain and phase in a quantum dot semiconductor optical amplifier // Opt. Express – Jan. 2008 – Vol. 16 – No. 1 – P. 170-178.
- [14] Brenot R., Lelarge F., Legouezigou O., Pommereau F., Poingt F., Legouezigou L., Derouin E., Drisse O., Rousseau B., Martin F., Duan G. H. Quantum Dots Semiconductor Optical Amplifier with a -3dB Bandwidth of up to 120 nm in Semi-Cooled Operation // The Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference – 24-28 February 2008 – San Diego, CA, USA –paper OTuC1.
- [15] Akiyama T., Sugawara M., Arakawa Y. Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers // IEEE – Sep. 2007 – vol. 95 – No. 9 – P.1757-1766.
- [16] Bimberg, D. Quantum dot based nanophotonics and nanoelectronics // Electr. Letters – 2008 – vol.44 – Issue 3 – P.168.
- [17] Wang H., Aw E.T., Xia M., Thompson M.G., Penty R.V., White I.H. Temperature Independent Optical Amplification in Uncooled Quantum Dot Optical Amplifiers // OFC, OSA Technical Digest (CD) –24-28 February 2008 – San Diego, CA, USA – paper OTuC2
- [18] Bonk R., Meuer C., Vallaitis T., Sygletos S., Vorreau P., Ben-Ezra S., Tsadka S., Kovsh A. R., Krestnikov I.L., Laemmlin M., Bimberg D., Freude W., Leuthold J. Single and Multiple Channel Operation Dynamics of Linear Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifier // ECOC'08 – Sept. 2008 – Brüssel – paper Th1.C2,
- [19] Yasuoka N., Kawaguchi K., Ebe H., Akiyama T., Ekawa M., Morito K., Sugawara M., Arakawa Y. Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers With Polarization-Independent Gains in 1.5  $\mu\text{m}$  Wavelength Bands // ECOC'08 – Sept. 2008 – Brüssel, Th1.C1

## **OPTICAL AMPLIFIERS FOR REACH EXTENSION IN GIGABIT PASSIVE OPTICAL NETWORKS**

**A. TUSSUPOV**  
*PhD student of the L.N.  
Gumilyov Eurasian  
National University*

**N.I Listopad.,**  
*Doctor of Technical Sciences  
Professor, Head of the Department  
of “Information Radio  
Technologies”, Belarusian State  
University of Informatics and Radio  
Electronics*

**A.T Tokhmetov,**  
*Ph.D., associate professor  
of the L.N. Gumilyov  
Eurasian National  
University*

*L.N.Gumilyov Eurasian National University  
Nur-Sultan, Kazakhstan  
E-mail: tussupov@gmail.com*

**Abstract.** Gigabit Passive Optical Networks (GPON) are the most advanced technology. The bit rates is 2.5 Gbps for upstream and downstream. But this network architecture has a limited physical network length of 20 km. This is due to high budget losses of the network. This restriction of access makes the network inaccessible for subscribers located far from the telecom operator’s facilities and coverage of remote settlements is quite investment-intensive, thereby complicating the elimination of the digital divide between city, suburbs and villages. To solve this problem, the use of optical amplifiers is proposed, which will expand the reach of the GPON to 60 km, which is the limit for the logical length according to current protocols.

**Keywords:** GPON, last mile, optical amplifier, hybrid WDM / TDM GPON