

УДК [621.39+004.77]

А. Д. Тусупов, А. Т. Тохметов, Н. И. Листопад

ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОЕ СМЕШЕНИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ОПТИЧЕСКОМ УСИЛИТЕЛЕ ПРИ МАСШТАБИРОВАНИИ СЕТИ WDM/TDM GPON ДО 60 КМ

Предметом исследования являются нелинейные эффекты в полупроводниковых оптических усилителях, применяемых в гигабитных оптических сетях для расширения зоны действия до 60 км. Во введении описаны гигабитные пассивные оптические сети. В разделе 1 дано определение четырехволновому смешению (ЧВС). В разделе 2 представлены параметры, описывающие сигналы ЧВС. Оценена эффективность преобразования, проанализированы шумы усиленного спонтанного излучения и оптическое отношение сигнал/шум. В разделе 3 представлены результаты экспериментальных измерений сигналов ЧВС, включая описание экспериментальной установки для проведения экспериментальных исследований генерации сигналов четырехволнового смешения в нелинейной среде полупроводникового оптического усилителя на основе квантовых точек. В разделе 4 приведен анализ сигналов ЧВС при различных входных мощностях сигналов накачки и токов инжекции. Проведено сравнение устройств по таким параметрам, как эффективность преобразования и соотношение сигнал/шум. Результаты экспериментального исследования позволили выявить возможность воздействия сигналов ЧВС на полезные сигналы в каналах со спектральным уплотнением (WDM – Wavelength Division Multiplexing) в нисходящем и восходящем потоках в полупроводниковом оптическом усилителе. В заключении на основании экспериментальных результатов сделан вывод, что ЧВС не влияет на соседние каналы WDM-сигналов и не генерирует дополнительный оптический шум в виде ЧВС-сигналов при масштабировании сети WDM/TDM GPON до 60 км с использованием полупроводниковых оптических усилителей. Это можно объяснить тем, что входная мощность сигнала не превышает входную мощность насыщения полупроводниковых оптических усилителей (ППОУ) и расстройка по длине волны между двумя сигналами WDM превышает 6 нм. В случае высоких входных мощностей в полупроводниковый оптический усилитель и $\Delta\lambda$ между двумя сигналами меньше 6 нм сгенерированные сигналы ЧВС будут наложены на полезные сигналы как оптические шумы.

Ключевые слова: полупроводниковый оптический усилитель, квантовые точки, нелинейная среда, четырехволновое смешение, сигнал накачки, спектральное уплотнение.

Введение. Гигабитные пассивные оптические сети (GPON) в настоящее время являются одной из наиболее передовых технологий, скорость передачи данных которой достигает 2,5 Гбит/с для нисходящих и 1,25 Гбит/с для восходящих потоков. Однако данная архитектура сети имеет ограниченную физическую длину сети 20 км. Это связано с высокими бюджетными потерями сети. Такое ограничение доступа делает сеть труднодоступной для абонентов, расположенных далеко от объектов телеком-оператора. Покрытие удаленных населенных пунктов является достаточно инвестиционно емким, тем самым усложняя устранение цифрового неравенства между городом, пригородом и селом. Для решения данной проблемы предлагается использование оптических усилителей, которые расширят зону досягаемости сетей GPON до 60 км, что является пределом для логической длины по текущим протоколам.

В [1] впервые была продемонстрирована характеристика полупроводниковых оптических усилителей с активной областью на квантовых точках (ППОУ-КТ) для масштабирования

Тусупов Ахмет Джамалбекович, докторант Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилёва (Казахстан).

Адрес для корреспонденции: ул. Сатпаева, 2, 010008, г. Нур-Султан, Казахстан; e-mail: tussupov@gmail.com

Тохметов Акылбек Тимербекович, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. информационных систем Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилёва (Казахстан).

Адрес для корреспонденции: ул. Пушкина, 11/2, 010008, г. Нур-Султан, Казахстан; e-mail: attohmetov@mail.ru

Листопад Николай Измаилович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных радиотехнологий БГУИР (Беларусь).

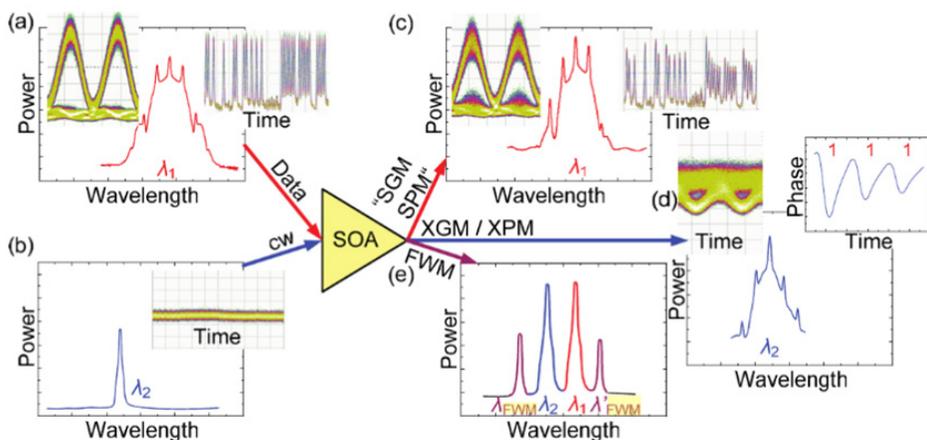
Адрес для корреспонденции: ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Беларусь; e-mail: Listopad@bsuir.by

сети оптического доступа WDM/TDM GPON до 60 км. Четыре нисходящих канала передают информацию со скоростью 2,5 Гбит/с, и в каждом канале сигнал усиливается с помощью ППОУ-КТ в диапазоне длин волн 1,5 мкм, обеспечивая при этом низкое энергопотребление. В восходящем направлении два канала передают данные со скоростью 622 Мбит/с, и каждый канал усиливает сигнал также с помощью ППОУ-КТ в диапазоне длин волн 1,3 мкм.

Основные физические эффекты, происходящие в полупроводниковом оптическом усилителе, разделяются на линейные и нелинейные. В качестве линейного эффекта было рассмотрено оптическое усиление сигналов в гигабитной пассивной оптической сети с расширением длины сети от 20 до 60 км [1].

Нелинейные эффекты низшего порядка в полупроводниковом оптическом усилителе возникают из-за восприимчивости третьего порядка при высокой мощности входного излучения, превышающей входную мощность насыщения полупроводниковых оптических усилителей (ППОУ). Таким образом, возникают эффекты так называемого самовоздействия, приводящие к изменению исходных свойств вещества под влиянием излучения.

Также в ППОУ возникают следующие нелинейные эффекты: самомодуляция усиления (self-gain modulation – SGM), фазовая самомодуляция (self-phase modulation – SPM), фазовая кросс-модуляция (cross-phase modulation – XPM) и четырехволновое смешение (four wave mixing – FWM, или ЧВС). Схематическое изображение нелинейностей в ППОУ показано на рисунке 1 [2].



Пояснения: а – спектральное изображение входного сигнала, паттерн и глазковые диаграммы; б – несущий сигнал и его спектральное изображение; в – спектральное и временное изображение сигнала после воздействия самомодуляции усиления (SGM) и фазовой самомодуляции (SPM); д – спектральное и временное изображение сигнала с фазой относительно времени (с последовательностью «111») после воздействия фазовой самомодуляции (SPM) и фазовой кросс-модуляции (XPM); е – спектральное изображение четырехволнового смешения (FWM), представленное двумя входящими сигналами и генерацией двух новых сигналов.

Источник: [2].

Рисунок 1 – Схематическое изображение нелинейностей в ППОУ

В данном исследовании в качестве нелинейного эффекта рассмотрим четырехволновое смешение и оценим возможность воздействия ЧВС на WDM-каналы в нисходящих и восходящих потоках в полупроводниковом оптическом усилителе.

1. Четырёхволновое смешение. Четырёхволновое смешение (ЧВС) представляет собой эффект, который возникает в нелинейной среде с восприимчивостью третьего порядка $\chi^{(3)}$ [3–5]. Это нелинейное явление происходит тогда, когда два оптических поля на разных частотах взаимодействуют друг с другом в нелинейной среде и генерируют два новых оптических поля на комбинационных частотах (рисунок 2).

Два оптических поля на различных частотах ω_1 и ω_2 , которые также называют излучением накачки и излучением сигнала, вводятся в нелинейную среду. Из-за нелинейных эффектов

генерируются новые оптические волны – формируется так называемое четырехволновое смешение. На спектральных изображениях (рисунок 1b и c) представлены входные излучения накачки ω_1 и сигнала ω_2 в нелинейную среду и выходные излучения из нелинейной среды с генерированными оптическими полями на частотах $2\omega_1 - \omega_2$ и $2\omega_2 - \omega_1$ соответственно.

Оптические свойства описываются ускорением дипольных моментов или поляризацией $P(t)$ в среде, когда с ним взаимодействует оптическое поле $E(t)$. Степенные ряды в оптической области $E(t)$ выражаются поляризацией в виде следующего уравнения [3]:

$$P(t) = \varepsilon_0 [\chi^{(1)} E(t) + \chi^{(2)} E(t)^2 + \chi^{(3)} E(t)^3 \dots], \quad (1)$$

где $E(t)$ – электрическое поле; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Данное уравнение состоит из двух частей: линейного $P_L = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E$ с линейной диэлектрической восприимчивостью $\chi = (4\pi)^{-1}(\varepsilon - 1)$, где ε – диэлектрическая проницаемость, и нелинейного с нелинейной восприимчивостью второго $\chi^{(2)}$ и третьего порядка $\chi^{(3)}$ и т.д.

Распространение электрического поля $E(t)$ в линейной, бездисперсионной, однородной и изотропной среде с линейной восприимчивостью $\chi^{(1)}$ создает плотность поляризации $P(t)$, выраженную уравнением $P_L = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E$. Приложенное электрическое поля $E(t)$ с частотой колебания ω_1 создает колебания дипольного поля в самой среде.

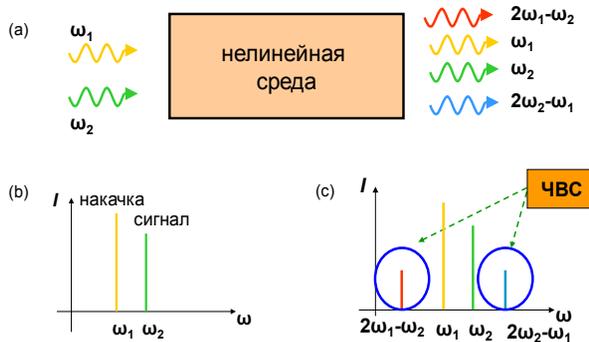


Рисунок 2 – Генерация новых оптических полей в нелинейной среде и их спектральное изображение (a): входные излучения накачки ω_1 и сигнала ω_2 в нелинейную среду (b); выходные излучения из нелинейной среды с генерированными оптическими полями на частотах $2\omega_1 - \omega_2$ и $2\omega_2 - \omega_1$ (c)

В восприимчивости второго порядка доминирует модуляция плотностей носителей для малой расстройки между излучениями накачки и сигнала с частотой биения между излучениями накачки и сигнала. Модуляция плотностей носителей при частоте биения $\Delta\omega$ между волнами накачки ω_1 и сигнала ω_2 обеспечивает необходимое усиление. При этом восприимчивость второго порядка $\chi^{(2)}$ в изотропной среде равна нулю (в дипольном приближении) [3]. По этой причине параметрические процессы второго порядка, такие как генерация второй гармоники или генерация суммарных частот, не происходят.

Восприимчивость третьего порядка приводит к появлению всех эффектов нелинейности. Вынужденная (индуцированная) нелинейная поляризация из-за $\chi^{(3)}$ выражается как [3]

$$P_{NL}^{(3)}(t) = \varepsilon_0 \chi^{(3)} E(t)^3, \quad (2)$$

где $E(t)$ – электрическое поле, которое состоит из нескольких компонент на различных частотах; $P_{NL}^{(3)}(t)$ – нестационарная вынужденная нелинейная поляризация; $\chi^{(3)}$ – восприимчивость третьего порядка.

Четырехволновое смешение становится значительным тогда, когда выполняется условие сохранения энергии и импульса (как показано на рисунке 3). Закон сохранения энергии и импульса выполняется только тогда, когда относительная фаза равна нулю $\Delta k = 0$. Для этого требуется обеспечить фазовый синхронизм. Такое согласование должно быть как частот, так и волновых векторов и может быть представлено в виде следующего уравнения [4]:

$$\begin{aligned} k_1 + k_1 - k_2 &= k_{\text{ЧВС}}, \\ E_1 + E_1 &= E_2 + E_{\text{ЧВС}}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\hbar\omega_1 + \hbar\omega_1 = \hbar\omega_2 + \hbar(2\omega_1 + \omega_2),$$

где k_i ($i = 1, 2$, ЧВС) – фазовый вектор (или волновой вектор), вектор k_i определяется следующим образом:

$$k_i = \frac{n_i \omega_i}{c}, \quad (4)$$

где n_i представляет собой показатель преломления соответствующих состояний ω_i .

Мощность ЧВС-сигналов зависит от мощности сигнала накачки $P_{\text{нак}}$ с частотой ω_1 и мощности полезного сигнала $P_{\text{сиг}}$ с частотой ω_2 . Мощности ЧВС красного сигнала с частотой $2\omega_1 - \omega_2$ и ЧВС синего сигнала $2\omega_2 - \omega_1$ описаны в виде следующих уравнений [6]:

$$\begin{aligned} P_{\text{ЧВС,крс}} &\propto P_{\text{нак}}^2 P_{\text{сиг}}, \\ P_{\text{ЧВС,син}} &\propto P_{\text{нак}} P_{\text{сиг}}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

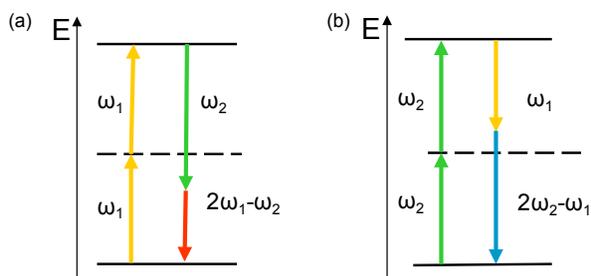


Рисунок 3 – Диаграмма энергетических уровней фотона для описания фазового синхронизма. Генерирование четырехволнового смешения $2\omega_1 - \omega_2$ (а) и $2\omega_2 - \omega_1$ (б)

Нелинейные материалы, в нашем случае полупроводниковый оптический усилитель, играют большую роль в усилении излучения сигнала накачки и полезного сигнала, а также сигналов ЧВС. ППОУ используют полупроводниковые материалы для активной среды и, как правило, выполнены на основе соединений полупроводников III–V групп с прямой запрещенной зоной.

ППОУ с активной областью на квантовых точках имеет локализацию носителей в нульмерном пространстве. КТ реализуются как когерентно напряженные бездефектные островки при самоорганизованном эпитаксиальном выращивании гетероструктур несогласованных полупроводников [7]. В общем случае в ППОУ-КТ временная характеристика может быть в 1000 раз быстрее, чем в полупроводниковом оптическом усилителе на квантовых ямах. Эта характеристика делает усилитель перспективным для использования в технологиях, обеспечивающих скорость передачи до 1 Тбит/с [7]. При этом среда усиления в КТ демонстрирует такие уникальные свойства, как сверхбыстрое восстановление усиления в порядке (~ 1 пс) [8], значительная спектральная ширина усиления (~ 120 нм) [7], высокий коэффициент усиления (>25 дБ) [9], низкий коэффициент шума (>5 дБ) [10], возможность для работы без охлаждения [11], высокий динамический диапазон для входных мощностей (ДДВМ), высокая устойчивость для пульсирующего трафика [12], относительная поляризационная нечувствительность [13; 14].

2. Параметры, описывающие сигналы ЧВС

2.1. Эффективность преобразования. Эффективность преобразования η является одним из наиболее важных параметров для описания сигналов четырехволнового смешения. Эффективность преобразования η определяется как отношение выходной мощности сигнала ЧВС к входной мощности сигнала и выражается простым соотношением в уравнении [15]

$$\begin{aligned} \eta &= 10 \log \left(\frac{P_{\text{ЧВС}}}{P_{\text{сиг}}} \right), \\ \eta &= P_{\text{ЧВС}} - P_{\text{сиг}} \text{ [дБ]}. \end{aligned} \quad (6)$$

Эффективность преобразования (6) показывает ее зависимость от начальных параметров, таких как входная мощность сигнала накачки и полезного сигнала, а также длины волны (или частоты) и параметров устройств, таких как коэффициент усиления, длина ППОУ, постоянное усиление вещества и т.п. Следует отметить, что эффективность преобразования зависит не только от уровня входной мощности накачки, входной мощности сигнала и коэффициента усиления, но также и от частотной расстройки, которая определяется как разность частот между входными излучениями сигнала накачки и полезного сигнала.

2.2. Шумы усиленного спонтанного излучения и оптическое отношение сигнал/шум.

Шумы усиленного спонтанного излучения (УСИ) являются неизбежным спонтанным процессом, происходящим в активной области ППО. Количество носителей, обеспечивающих оптическое усиление, уменьшается самим процессом спонтанного излучения фотона. При этом спонтанно излученные фотоны имеют широкий диапазон частот.

Мощность спектральной плотности мощности шума УСИ приблизительно пропорциональна коэффициенту усиления усилителя [16]. Для достижения высоких соотношений сигнал/шум сигнала ЧВС мощность сигнала накачки должна быть увеличена, а также, соответственно, мощность входного сигнала должна увеличиваться до уровня насыщенности усиления устройства.

Оптическое соотношение сигнал/шум (OSNR) является важным и часто используемым параметром для измерения уровня сигнала и шума и определяется как отношение мощности сигнала к мощности шума УСИ. Общее уравнение соотношения сигнал/шум (OSNR) является следующим [16]:

$$OSNR = P_{сиг} - P_{шум} \text{ [дБ]}, \quad (7)$$

где $P_{сиг}$ – это мощность сигнала, $P_{шум}$ – мощность шума УСИ.

3. Экспериментальное измерение сигналов ЧВС

3.1. Экспериментальная установка для анализа четырехволнового смешения.

На рисунке 4 показана экспериментальная установка для генерации и измерения сигналов четырехволнового смешения, состоящая из двух ответвлений: верхнее предназначено для генерации незатухающей гармонической волны и является излучением накачки, а нижнее применяется для генерации полезного сигнала. Оба ответвления состоят из перестраиваемого лазера, линейных усилителей, фильтров, аттенюаторов с интегрированным ваттметром и поляризационным контроллером. Две световые волны от ответвлений сигнала накачки и полезного сигнала объединяются в 3 дБ соединителе (50:50) и далее вводятся в испытуемый прибор. Выходные сигналы анализируются оптическим спектрометром.

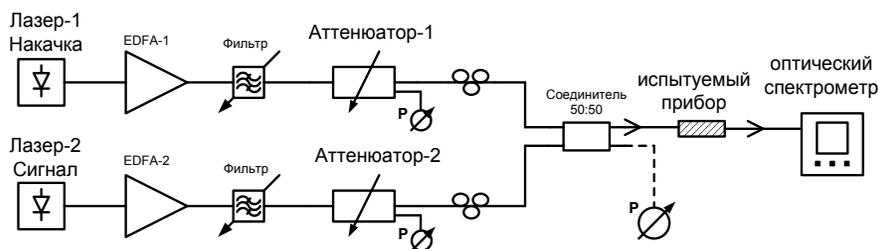


Рисунок 4 – Экспериментальная установка для измерения сигналов четырехволнового смешения

3.2. Характеристика устройств и спектр четырехволнового смешения. Эксперимент проводился на полупроводниковом оптическом усилителе на квантовых точках. В данном случае использовался оптический усилитель на соединении типа InAs/InP. Наименование образца, тип и другие основные свойства приведены в таблице 1.

Важным параметром, характеризующим эффективность полупроводниковых оптических усилителей, является коэффициент усиления и коэффициент усиленного спонтанного излучения. На рисунке 5 показаны характеристика коэффициента усиления и коэффициент усиленного спонтанного излучения для ППОУ на квантовых точках с рабочим диапазоном длин волн 1,5 мкм. Входные мощности измерялись непосредственно при входе в испытуемое устройство.

Таблица 1 – Важные параметры оптического усилителя для эксперимента

Наименование образца	Alcatel	Длина волны пика квантового шума [нм]	1525
Тип активного слоя	Квантовые точки	Коэффициент усиления в режиме малого сигнала [дБ]	20
Рабочий диапазон длин волн	1550 нм	Коэффициент шума [дБ]	10
Угол наклона волновода [°]	7	$P_{\text{вх.насыщ}}$ на длине волны накачки [дБм]	-12
Ширина [мкм]	1,5	Поляризационная зависимость [дБ]	2–5
Длина [мм]	2	Длина волны пика квантового шума [нм]	1525

Температура образца задана 20 °С, инжекция тока в ППОУ-КТ составила 200 мА. На рисунке 5а видно, что коэффициент усиления достаточно высокий при низких уровнях входных мощностей. При входной мощности -20 дБм коэффициент усиления (коэффициент усиления в режиме малого сигнала) для ППОУ на основе квантовых точек составляет от 17–20 дБ. При увеличении уровней входных мощностей коэффициент усиления уменьшается и составляет 8 дБ при входной мощности 0 дБ. Это связано тем, что при высоких уровнях входных мощностей истощаются носители вынужденного излучения, тем самым уменьшая концентрацию электронов в зоне проводимости. Малая концентрация электронов для вынужденного излучения и есть основная причина низкого коэффициента усиления.

Зависимость коэффициента усиления от длины волны показывает, что при коротких длинах волн коэффициент усиления больше, чем при длинных. При длине волны 1540 нм коэффициент усиления составляет 20 дБ, а при длине волны 1560 нм коэффициент усиления ППОУ-КТ равен 17 дБ при 3 дБ входной мощности насыщения в -12 дБм.

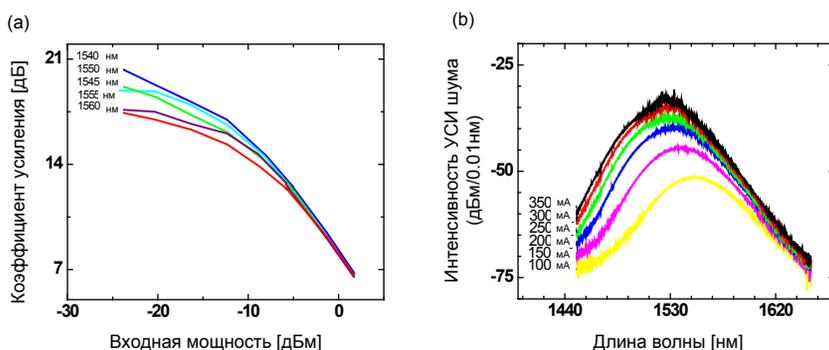


Рисунок 5 – (а) Зависимость коэффициента усиления ППОУ-КТ от входных мощностей при разных рабочих длинах волн в диапазоне 1,55 мкм. 3 дБ входная мощность насыщения составляет -12 дБ. Ток инжекции в образец 200 мА. Спектр шума усилителей измерен в диапазоне длин волн между 1450 и 1650 нм. (б) Зависимость шума усиленного спонтанного излучения ППОУ-КТ от длины волны при разных значениях тока инжекции для рабочей длины волны 1,55 мкм. Ток инжекции в образец в интервале 100–250 мА. Температура образца 20 °С

На рисунке 5б показано, что ППОУ-КТ имеет минимальную интенсивность шума УСИ -52 дБ при длине волны 1550 нм и при подаваемом токе инжекции 100 мА. При увеличении подаваемого тока инжекции до 200 мА интенсивность шума УСИ повышается до -25 дБ при длине волны 1520 нм. При увеличении тока инжекции интенсивность шума УСИ повышается, а экстремум кривой интенсивности шума при каждом уровне тока инжекции смещается по длине волны – от длинных длин волн к коротким длинам волн.

Кривые шума УСИ описывают коэффициент усиления усилителя. Коэффициент шума ППОУ-КТ составляет 10 дБ, поляризационная зависимость – 2–5 дБ.

3.3. Спектр сигналов ЧВС. На рисунке 6 показано спектральное изображение сигналов ЧВС, которые генерируются излучениями сигналов накачки и полезного сигнала. Обозначим сигналы ЧВС как ЧВС (левый) для высоких частот (или коротких длин волн) и ЧВС (правый) для низких частот (или длинных длин волн).

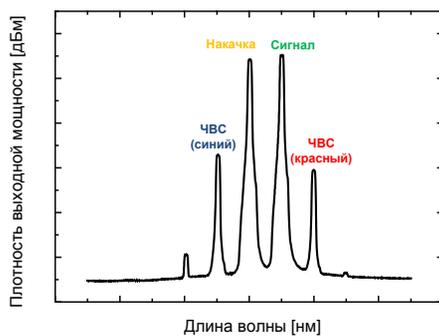


Рисунок 6 – Спектральное изображение сигналов ЧВС

3.4. Результаты измерения сигналов ЧВС в полупроводниковом оптическом усилителе на квантовых точках. Плотность выходной мощности, эффективность преобразования и OSNR при различных входных мощностях сигналов накачки. На рисунке 7а показана зависимость выходных мощностей сигналов накачки, полезного сигнала, сигналов ЧВС и шумов УСИ от входных мощностей сигналов накачки. Кривые плотностей выходных мощностей получены при диапазоне входных мощностей сигналов накачки от -10 до $+8$ дБм с длиной волны $1550,0$ нм и при входной мощности полезного сигнала -1 дБм с длиной волны $1550,5$ нм. Ток инжекции составляет 200 мА, температура образца -20 °С.

В ППОУ-КТ (рисунок 7а) выходная мощность сигнала накачки увеличивается экспоненциально с увеличением входной мощности сигнала накачки, а выходная мощность полезного сигнала, наоборот, уменьшается. При входной мощности сигнала накачки ($\lambda_{нак} = 1550,0$ нм) -10 дБм выходная мощность сигнала накачки увеличилась до -2 дБм, т.е. коэффициент усиления составил 7 дБ. При этом входной сигнал ($\lambda_{сиг} = 1550,5$ нм) с постоянной мощностью -1 дБм усиливается до $+9$ дБм, что составляет коэффициент усиления 10 дБ. Коэффициент усиления длины волны 1550 нм составляет при входной мощности -10 дБм $G = 15$ дБ и при -1 дБм $G = 9$ дБ (рисунок 7а). При увеличении входной мощности накачки до $+8$ дБм выходная мощность накачки усилилась до $+10$ дБм, т.е. коэффициент усиления был равен 2 дБ. При увеличении входной мощности сигнала накачки выходная мощность полезного сигнала уменьшается до $+1$ дБм, увеличение коэффициента усиления составляет 2 дБ. Также кривые выходных мощностей сигнала накачки и полезного сигнала пересекаются и составляют $+6$ дБм при 0 дБм входной мощности сигнала накачки, т.е. когда мощности сигналов накачки и полезного сигнала примерно равны.

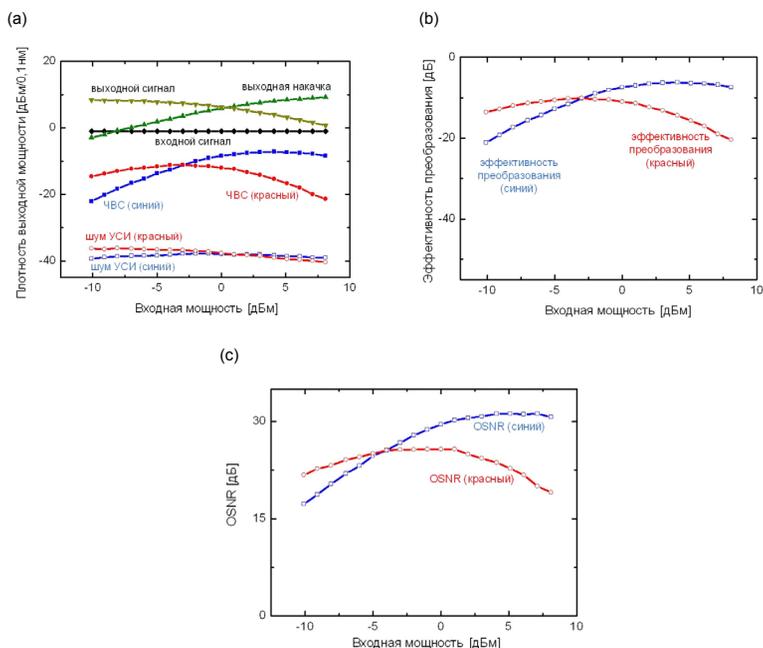
Излучение сигнала накачки и полезного сигнала в ППОУ-КТ генерируют сигналы ЧВС, смещенные на частоты $2\omega_1 - \omega_2$ и $2\omega_2 - \omega_1$. Изменения сигналов ЧВС зависят от изменения уровней мощностей сигнала накачки. При входных мощностях сигнала накачки -10 дБм и полезного сигнала -1 дБм мощности сигналов ЧВС составляют для ЧВС (синий) -22 дБм и ЧВС (красный) -14 дБм. При увеличении входной мощности сигнала накачки мощность сигнала ЧВС (синий) увеличивается и достигает своего максимума около -7 дБм при отрезке входной мощности сигнала накачки от 0 до $+7$ дБм. При дальнейшем увеличении входной мощности сигнала накачки мощность сигнала ЧВС (синий) постепенно уменьшается и достигает -8 дБм при мощности сигнала накачки в $+8$ дБм (рисунок 7а). При увеличении входной мощности сигнала накачки мощность сигнала ЧВС (красный) увеличивается и достигает своего максимума около -12 дБм при отрезке входной мощности сигнала накачки от -7 до -1 дБм. При дальнейшем увеличении входной мощности сигнала накачки мощность сигнала ЧВС (красный) постепенно уменьшается и достигает -21 дБм при мощности сигнала накачки в $+8$ дБм (рисунок 7а).

Шумы УСИ, искажающие сигналы ЧВС, имеют мощность шума около -28 дБм.

Из полученных кривых сигналов ЧВС был рассчитан параметр эффективности преобразования ЧВС. Было проведено сравнение экспериментальных результатов сигналов ЧВС с входным сигналом. Значения, представленные в экспериментальных графиках, были вычислены с помощью уравнения (6).

При входных мощностях сигнала накачки -10 дБм и сигнала -1 дБм эффективность преобразования сигнала ЧВС (синий) составляет -21 дБ и эффективность преобразования сигнала ЧВС (красный) -12 дБ. При увеличении входной мощности сигнала накачки эффективность преобразования сигнала ЧВС (синий) увеличивается и достигает своего максимума около -6 дБ при отрезке входной мощности сигнала накачки от 0 до $+7$ дБм. При дальнейшем увеличении входной мощности сигнала накачки эффективность преобразования сигнала ЧВС (синий) постепенно уменьшается и достигает -7 дБ при мощности сигнала накачки в $+8$ дБм.

При увеличении входной мощности сигнала накачки эффективность преобразования сигнала ЧВС (красный) увеличивается и достигает своего максимума около -10 дБ при отрезке входной мощности сигнала накачки от -7 до -1 дБм. При дальнейшем увеличении входной мощности сигнала накачки эффективность преобразования сигнала ЧВС (красный) постепенно уменьшается и достигает -20 дБ при мощности сигнала накачки $+8$ дБм.



Пояснения: входная мощность сигнала накачки изменяется в диапазоне от -10 до $+8$ дБм и имеет длину волны $1550,5$ нм. Входная мощность полезного сигнала -1 дБм при длине волны $1550,5$ нм.

Рисунок 7 – (а) Зависимость выходных мощностей сигнала накачки, полезного сигнала, сигналов ЧВС и шумов УСИ от входных мощностей сигналов накачки в ППОУ-КТ с рабочим диапазоном длин волн $1,5$ мкм. (б) Зависимость эффективности преобразования от входных мощностей сигналов накачки. (с) Зависимость оптического соотношения сигнал/шум (OSNR) от входных мощностей сигнала накачки

На рисунке 7с показано оптическое соотношение сигнал/шум от входных мощностей сигнала накачки. При входных мощностях сигнала накачки в -10 дБм и полезного сигнала -1 дБм OSNR сигнала ЧВС (синий) составляет 17 дБ и OSNR сигнала ЧВС (красный) составляет 22 дБ. При увеличении входной мощности сигнала накачки OSNR сигнала ЧВС (синий) увеличивается и достигает своего максимума около 21 дБ при отрезке входной мощности сигнала накачки от $+2$ до $+7$ дБм. При дальнейшем увеличении входной мощности сигнала накачки OSNR сигнала ЧВС (синий) постепенно уменьшается и достигает 20 дБ при мощности сигнала накачки в $+8$ дБм. При увеличении входной мощности сигнала накачки OSNR сигнала ЧВС (красный) увеличивается и достигает своего максимума около 26 дБ при отрезке входной мощности сигнала накачки от -4 до $+1$ дБм. При дальнейшем увеличении входной мощности сигнала накачки OSNR сигнала ЧВС (красный) постепенно уменьшается и достигает 19 дБ при мощности сигнала накачки $+8$ дБм.

4. Сравнение плотностей выходных мощностей сигналов ЧВС, эффективности преобразования и OSNR от расстройки длины волны накачки и сигнала. На рисунке 8а

показана зависимость сигналов ЧВС от расстройки длины волны накачки и сигнала. Положительная расстройка длины волны – это перестройка длины волны входящего сигнала в возрастающем направлении длины волны относительно длины волны входящего излучения накачки. Отрицательная расстройка длины волны – это перестройка длины волны входящего сигнала в убывающем направлении длины волны относительно длины волны входящего излучения накачки.

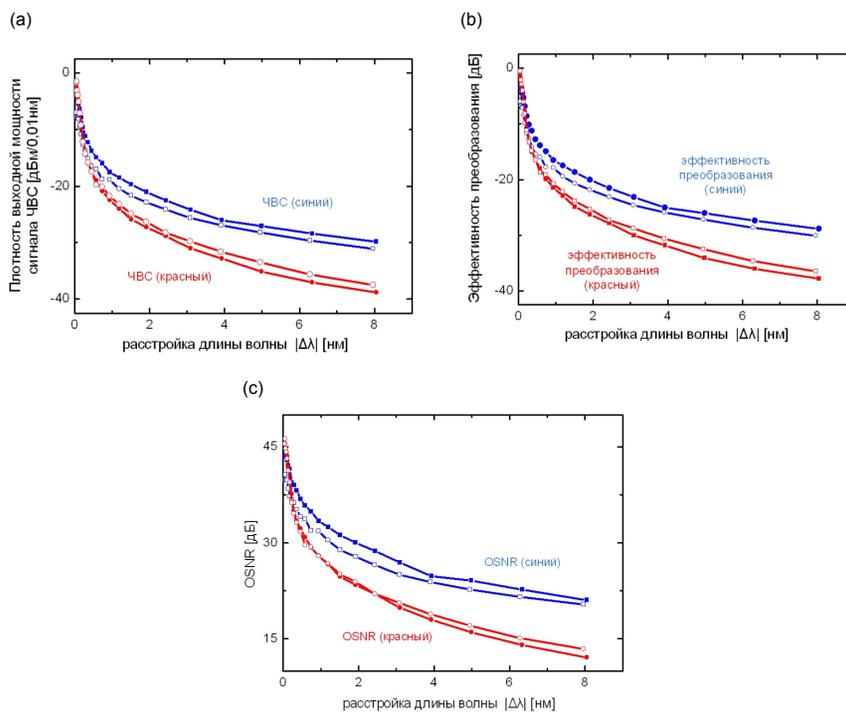
Параметры ППОУ на основе квантовых точек (рисунок 8а), входная мощность накачки 0 дБм и входная мощность сигнала –1 дБм. Интервал расстройки длины волны – от ~0 до 8 нм. Ток инжекции в образец составляет 200 мА, температура образца – 20 °С. Определены значения кривых зависимости сигналов ЧВС от расстройки длины волны для ППОУ на основе квантовых точек. При положительной расстройке ~0 нм мощность сигнала ЧВС (синий) составляет –4 дБм. При увеличении расстройки до 1 нм мощность сигнала ЧВС (синий) понижается быстро и составляет –17 дБм. При дальнейшем увеличении расстройки до 8 нм мощность сигнала ЧВС (синий) понижается и составляет –20 дБм. При отрицательной расстройке ~0 нм мощность сигнала ЧВС (синий) составляет –7 дБм. При увеличении расстройки до 1 нм мощность сигнала ЧВС (синий) понижается быстро и составляет –19 дБм. При дальнейшем увеличении расстройки до 8 нм мощность сигнала ЧВС (синий) понижается и составляет –21 дБм.

При положительной расстройке ~0 нм мощность сигнала ЧВС (красный) составляет –2 дБм. При увеличении расстройки до 1 нм мощность сигнала ЧВС (красный) понижается быстро и составляет –22 дБм. При дальнейшем увеличении расстройки до 8 нм мощность сигнала ЧВС (красный) понижается и составляет –29 дБм. При отрицательной расстройке ~0 нм мощность сигнала ЧВС (красный) составляет –1,2 дБм. При увеличении расстройки до 1 нм мощность сигнала ЧВС (красный) понижается быстро и составляет –22 дБм. При дальнейшем увеличении расстройки до 8 нм мощность сигнала ЧВС (красный) понижается и составляет –27 дБм.

На рисунке 8б показана зависимость эффективности преобразования сигналов ЧВС от расстройки длины волны накачки и сигнала. Определены значения кривых зависимости эффективности преобразования сигналов ЧВС от расстройки длины волны для ППОУ на основе квантовых точек. При положительной расстройке ~0 нм эффективность преобразования сигнала ЧВС (синий) составляет –2 дБ. При увеличении расстройки до 1 нм эффективность преобразования сигнала ЧВС (синий) понижается быстро и составляет –16 дБ. При дальнейшем увеличении расстройки до 8 нм эффективность преобразования сигнала ЧВС (синий) понижается и составляет –29 дБ. При отрицательной расстройке ~0 нм эффективность преобразования сигнала ЧВС (синий) составляет –6 дБ. При увеличении расстройки до 1 нм эффективность преобразования сигнала ЧВС (синий) понижается быстро и составляет –18 дБ. При дальнейшем увеличении расстройки до 8 нм эффективность преобразования сигнала ЧВС (синий) понижается и составляет –20 дБ.

При положительной расстройке ~0 нм эффективность преобразования сигнала ЧВС (красный) составляет –1 дБ. При увеличении расстройки до 1 нм эффективность преобразования сигнала ЧВС (красный) понижается быстро и составляет –22 дБ. При дальнейшем увеличении расстройки до 8 нм эффективность преобразования сигнала ЧВС (красный) понижается и составляет –28 дБ. При отрицательной расстройке ~0 нм эффективность преобразования сигнала ЧВС (красный) составляет –0,2 дБ. При увеличении расстройки до 1 нм эффективность преобразования сигнала ЧВС (красный) понижается быстро и составляет –21 дБ. При дальнейшем увеличении расстройки до 8 нм эффективность преобразования сигнала ЧВС (синий) также снижается и составляет –26 дБ.

На рисунке 8с показана зависимость OSNR сигналов ЧВС от расстройки длины волны накачки и сигнала. Определены значения кривых зависимости OSNR сигналов ЧВС от расстройки длины волны для ППОУ на основе квантовых пунктов. При положительной расстройке ~0 нм OSNR сигнала ЧВС (синий) составляет 42 дБ. При увеличении расстройки до 1 нм OSNR сигнала ЧВС (синий) понижается быстро и составляет 22 дБ. При дальнейшем увеличении расстройки до 8 нм OSNR сигнала ЧВС (синий) понижается и составляет 21 дБ. При отрицательной расстройке ~0 нм OSNR сигнала ЧВС (синий) составляет 40 дБ. При увеличении расстройки до 1 нм OSNR сигнала ЧВС (синий) понижается быстро и составляет 22 дБ. При дальнейшем увеличении расстройки до 8 нм OSNR сигнала ЧВС (синий) понижается и составляет 20 дБ.



Пояснения: —■—, —●— — положительная расстройка длины волны; —□—, —○— — отрицательная расстройка длины волны. Интервал расстройки длины волны от 0 до 8 нм. Входная мощность накачки 0 дБм, входная мощность сигнала –1 дБм.

Рисунок 8 – Зависимость сигналов ЧВС от расстройки длины волны (а). Зависимость эффективности преобразования сигналов ЧВС от расстройки длины волны (б). Зависимость OSNR сигналов ЧВС от расстройки длины волны (с)

При положительной расстройке ~ 0 нм OSNR сигнала ЧВС (красный) составляет 44 дБ. При увеличении расстройки до 1 нм OSNR сигнала ЧВС (красный) понижается быстро и составляет 27 дБ. При дальнейшем увеличении расстройки до 8 нм OSNR сигнала ЧВС (красный) понижается и составляет 12 дБ. При отрицательной расстройке ~ 0 нм OSNR сигнала ЧВС (красный) составляет 45 дБ. При увеличении расстройки до 1 нм OSNR сигнала ЧВС (красный) понижается быстро и составляет 28 дБ. При дальнейшем увеличении расстройки до 8 нм OSNR сигнала ЧВС (красный) понижается и составляет 12 дБ.

Закключение. Во введении рассматриваются основные задачи исследования с целью усиления оптических сигналов в полупроводниковых оптических усилителях с активной областью на квантовых точках для расширения зоны досягаемости сетей WDM/TDM GPON до 60 км и связанные с ними нелинейные физические эффекты. В основной части изложена теоретическая часть четырехволнового смешения, где ЧВС представляет собой эффект, который происходит в нелинейной среде с восприимчивостью третьего порядка $\chi^{(3)}$. Рассмотрены основные параметры описания сигналов ЧВС, такие как эффективность преобразования, шумы усиленного спонтанного излучения и оптическое отношение сигнал/шум. Представлены экспериментальная установка с характеристиками образцов для исследования и экспериментальные измерения сигналов ЧВС. Экспериментальные исследования нелинейного эффекта ЧВС изучены для ППОУ на основе квантовых точек. Проведен анализ экспериментальных результатов на основе распространения стационарных сигналов в инфракрасном диапазоне. Изучены такие параметры, как выходная мощность сигналов ЧВС, эффективность преобразования и оптическое соотношение сигнал/шум. Определены зависимости этих параметров от входных мощностей сигналов накачки, входных мощностей полезного сигнала, токов инжекции и частотной расстройки между сигналами накачки и полезным сигналом.

Проведено сравнение устройств по таким параметрам, как эффективность преобразования и соотношение сигнал/шум. На основании экспериментальных результатов было установлено, что ЧВС

не влияет на соседние каналы спектрально уплотненных сигналов и не генерирует дополнительный оптический шум в виде ЧВС-сигналов при масштабировании сети WDM/TDM GPON до 60 км с использованием полупроводникового оптического усилителя. Это можно объяснить тем, что входная мощность сигнала не превышает входную мощность насыщения ППОУ и расстройка по длине волны между двумя сигналами WDM превышает 6 нм. В случае высоких входных мощностей в полупроводниковом оптическом усилителе и $\Delta\lambda$ между двумя сигналами меньше 6 нм сгенерированные сигналы ЧВС будут наложены на полезные сигналы как оптические шумы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 1.3 / 1.5 μm QD-SOAs for WDM/TDM GPON with Extended Reach and Large Upstream / Downstream Dynamic Range / R. Bonk [et al.] // Optical Fiber Communication Conference, San Diego, California, March 22–26, 2009 / Optical Society of America ; Ed. by E. B. Basch. – San Diego : IEEE, 2009. – P. 215–234.
2. Bonk, R. Linear and Nonlinear Semiconductor Optical Amplifiers for Next-Generation Optical Networks / R. Bonk // Karlsruhe Series in Photonics & Communications. – 2013. – Vol. 8. – P. 354.
3. Бломбергсен, Н. Нелинейная оптика / Н. Бломбергсен ; пер с англ. – М. : Мир, 1966. – 424 с.
4. Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика / Г. Агравал ; пер с англ. – М. : Мир, 1996. – 323 с.
5. Connelly, M. Semiconductor Optical Amplifiers / M. Connelly. – Berlin : Springer, 2002. – 1st ed. – 283 p.
6. Bhattacharya, P. Special Issue on Optoelectronic Devices Based on Quantum Dots / P. Bhattacharya [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2007. – Vol. 95, No. 9. – P. 1718–1722.
7. Vallaitis, T. Slow and fast dynamics of gain and phase in a quantum dot semiconductor optical amplifier / T. Vallaitis [et al.] // Optics Express. – 2008. – Vol. 16, No. 1. – P. 170–178.
8. Brenot, R. Quantum Dots Semiconductor Optical Amplifier with a-3dB Bandwidth of up to 120 nm in Semi-Cooled Operation / R. Brenot [et al.] // 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego, Febr. 24–28, 2008 / Optical Society of America ; Ed. by E. B. Basch. – San Diego : IEEE, 2008. – P. 123–126.
9. Akiyama, T. Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers / T. Akiyama [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2007. – Vol. 95, issue 9. – P. 1757–1766.
10. Bimberg, D. Quantum dot based nanophotonics and nanoelectronics / D. Bimberg // Electronics Letters. – 2008. – Vol. 44, issue 3. – P. 168–171.
11. Wang, H. Temperature Independent Optical Amplification in Uncooled Quantum Dot Optical Amplifiers / H. Wang [et al.] // 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego, Febr. 24–28, 2008 / Optical Society of America ; Ed. by E. B. Basch. – San Diego : IEEE, 2008. – P. 1–3.
12. Bonk, R. Single and Multiple Channel Operation Dynamics of Linear Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifier / R. Bonk [et al.] // 34th European Conference on Optical Communication, Brussels, Sept. 21–25, 2008 / ECOC ; Ed. by P. Van Daele. – Brussels : IEEE, 2008. – P. 1–2.
13. Yasuoka, N. Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers With Polarization-Independent Gains in 1.5 μm Wavelength Bands / N. Yasuoka [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 2008. – Vol. 20, No. 23. – P. 1908–1910.
14. Zhou, J. Efficiency of Broadband Four-Wave Mixing Wavelength Conversion Using Semiconductor Traveling-Wave Amplifiers / J. Zhou [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 1994. – Vol. 6, No. 1. – P. 50–52.
15. Henry, C. Theory of spontaneous emission noise in open resonators and its application to lasers and optical amplifiers / C. Henry // Journal of Lightwave Technology. – 1986. – Vol. 3. – P. 288–297.

Поступила в редакцию 20.04.2021.

“Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 2.
Mathematics. Physics. Informatics, Computer Technology and Control”
Vol. 11, No. 2, 2021, pp. 87–98
© Yanka Kupala State University of Grodno, 2021

Four wave mixing in a semiconductor optical amplifier for reach extended WDM/TDM GPON up to 60 km

A. D. Tussupov¹, A. T. Tokhmetov², N. I. Listopad³

¹ L. N. Gumilev Eurasian National University (Kazakhstan)
Satpaeva St., 2, 010008, Nur-Sultan, Kazakhstan; e-mail: tussupov@gmail.com

² L. N. Gumilev Eurasian National University (Kazakhstan)
Pushkin St., 11/2, 010008, Nur-Sultan, Kazakhstan; e-mail: attohmetov@mail.ru

³ Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus)
P. Brovki St., 6, 220013, Minsk, Belarus; e-mail: Listopad@bsuir.by

Abstract. The subject of research is nonlinear effects in semiconductor optical amplifiers used in gigabit optical networks to expand the coverage area up to 60 km. In this paper, experimentally study of the generation of

quarter-wavelength shift (QWS) at various input powers of the pump signals and injection currents based on quantum dots is presented. The efficiency of converting the output power of the QWS signal and the input power of the useful signal is analyzed; it is proposed to use the optical signal-to-noise ratio to measure the signal and noise level. Comparison of devices is carried out in terms of such parameters as conversion efficiency and signal-to-noise ratio. The results of the experimental study made it possible to reveal the possibility of the effect of FWM signals on useful signals in channels with wavelength division multiplexing (WDM) in the downstream and upstream flows in a semiconductor optical amplifier. Based on the experimental results, it was found that FWM does not affect adjacent WDM signal channels and does not generate additional optical noise in the form of FWM signals when the WDM/TDM GPON network is scaled up to 60 km using semiconductor optical amplifiers. This can be explained by the fact that the input signal power does not exceed the input saturation power of the POCA and the wavelength detuning between the two WDM signals exceeds 6 nm. In the case of high input powers into the semiconductor optical amplifier and the $\Delta\lambda$ between the two signals is less than 6 nm, then the generated FWM signals will be superimposed on the wanted signals as optical noise.

Keywords: semiconductor optical amplifier, quantum dots, nonlinear medium, quarter-wavelength shift, pump signal, wavelength division multiplexing.

References

1. Bonk R. [et al.]. 1.3 / 1.5 μm QD-SOAs for WDM/TDM GPON with Extended Reach and Large Upstream / Downstream Dynamic Range. *Optical Fiber Communication Conference*, San Diego, California, March 22-26, 2009; Ed. by E. B. Basch. San Diego, 2009, pp. 215-234.
2. Bonk, R. Linear and Nonlinear Semiconductor Optical Amplifiers for Next-Generation Optical Networks. Karlsruhe Series in Photonics & Communications, Vol. 8 / Karlsruhe, 2013, p. 354.
3. Blombergen N. Nonlinear optics [*Nelineinaia optika*]; transl. from Engl. Moscow, 1966, 424 p.
4. Agraval G. Nonlinear Fiber Optics [*Nelineinaia volokonnaia optika*]; transl. from Engl. Moscow, 1996, 323 p.
5. Connelly M. Semiconductor Optical Amplifiers. 1st ed. Berlin, 2002, 283 p.
6. Bhattacharya P. [et al.]. Special Issue on Optoelectronic Devices Based on Quantum Dots. *Proceedings of the IEEE*, 2007, vol. 95, No. 9, pp. 1718-1722.
7. Vallaitis T. [et al.]. Slow and fast dynamics of gain and phase in a quantum dot semiconductor optical amplifier. *Optics Express*, 2008, vol. 16, No. 1, pp. 170-178.
8. Brenot R. [et al.]. Quantum Dots Semiconductor Optical Amplifier with a-3dB Bandwidth of up to 120 nm in Semi-Cooled Operation. *2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, San Diego, Febr. 24-28, 2008; Ed. by E. B. Basch. San Diego, 2008, pp. 123-126.
9. Akiyama T. [et al.]. Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers. *Proceedings of the IEEE*, 2007, vol. 95, issue 9, pp. 1757-1766.
10. Bimberg D. Quantum dot based nanophotonics and nanoelectronics. *Electronics Letters*, 2008, vol. 44, issue 3, pp. 168-171.
11. Wang H. [et al.]. Temperature Independent Optical Amplification in Uncooled Quantum Dot Optical Amplifiers. *2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, San Diego, Febr. 24-28, 2008; Ed. by E. B. Basch. San Diego, 2008, pp. 1-3.
12. Bonk R. [et al.]. Single and Multiple Channel Operation Dynamics of Linear Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifier. *34th European Conference on Optical Communication*, Brussels, Sept. 21-25, 2008; Ed. by P. Van Daele. Brussels, 2008, pp. 1-2.
13. Yasuoka N. [et al.]. Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers With Polarization-Independent Gains in 1.5 μm Wavelength Bands. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, vol. 20, No. 23, pp. 1908-1910.
14. Zhou J. [et al.]. Efficiency of Broadband Four-Wave Mixing Wavelength Conversion Using Semiconductor Traveling-Wave Amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, vol. 6, No. 1, pp. 50-52.
15. Henry C. Theory of spontaneous emission noise in open resonators and its application to lasers and optical amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, vol. 3, pp. 288-297.

