

Нелинейные искажения как нелинейный шум в когерентных волоконно-оптических линиях связи

А.Е.Жителев, В.А.Коньшев, С.Н.Лукиных, О.Е.Наний, В.Н.Трещиков,
Р.Р.Убайдуллаев

Исследована феноменологическая модель, описывающая нелинейные искажения в когерентных волоконно-оптических линиях связи, позволяющая расширить область применимости модели нелинейного шума по сравнению с известной GN-моделью. Описан метод экспериментального измерения основных параметров предложенной модели и обсуждены причины возникновения погрешностей.

Ключевые слова: DWDM, нелинейность, GN-модель, когерентные системы связи.

В связи с постоянным ростом объема трафика (по разным оценкам – на 30%–60% в год) необходимо соответствующее увеличение пропускной способности транспортных сетей. В настоящее время оптические линии связи с каналами 100G (со скоростью передачи данных 100 Гбит/с) и более скоростными каналами (100+G) без аппаратной компенсации дисперсии стали основой магистральных транспортных сетей. Исследованиям этих линий посвящено множество работ [1–6]. В то же время в эксплуатации находится большое количество гетерогенных линий, в которых когерентные каналы (100G и 100+G) соседствуют с каналами с амплитудной модуляцией (2.5G, 10G). В таких линиях используются аппаратные компенсаторы дисперсии. Наиболее сложной задачей при проектировании когерентных линий связи является расчет нелинейных искажений для многопролетной линии. Несмотря на существование модели для расчета нелинейного шума в случае многопролетной линии без компенсации дисперсии (основанной на теории сверхлинейного сложения шумов от отдельных пролетов), для расчета гетерогенных линий со сложным дисперсионным планом единой модели до сих пор нет. Основная цель настоящей работы – построение модели для расчета нелинейных искажений в гетерогенных линиях с любой схемой компенсации дисперсии.

А.Е.Жителев, Р.Р.Убайдуллаев. Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1, оф. 826; e-mail: rustam2@mail.ru

В.А.Коньшев. Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1, оф. 826; Институт истории естествознания и техники им. С.И.Вавилова РАН, Россия, 109012 Москва, Старопанский пер., 1/5

О.Е.Наний, С.Н.Лукиных. Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1, оф. 826; Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

В.Н.Трещиков. Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1, оф. 826; Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1

Можно выделить четыре основные причины появления ошибок в магистральных оптических линиях связи: 1) неоптимальная мощность на оптическом приемнике – слишком высокая, вызывающая перегрузку приемника, или слишком низкая, при которой становятся существенными собственные шумы приемника; 2) хроматическая и поляризационная модовая дисперсии; 3) шумы усиленного спонтанного излучения (ASE), внесенные в линию эрбиевыми оптическими усилителями (EDFA) (сюда также могут быть отнесены шумы спонтанного комбинационного рассеяния, возникающие при наличии рамановской накачки); 4) нелинейные искажения. Первые две причины при правильном проектировании линии могут быть устранены полностью (в дальнейшем считаем, что так и сделано, и исключаем их из рассмотрения). Шум ASE и нелинейные искажения на современном уровне развития технологий (в первую очередь цифровых сигнальных процессоров) полностью устранены быть не могут и приводят к появлению ошибок в линии. Для проектирования линии и оценки (мониторинга) запаса надежности работающего канала необходимо уметь рассчитывать их влияние. Если учет влияния шума ASE – расчет и/или измерение $OSNR_{ASE}^*$ канала – обычно не представляет существенных проблем, то оценка влияния нелинейных искажений на работу когерентного канала – сложная задача. Некоторые поставщики обходят данную проблему, проектируя линию для линейного режима. Это облегчает проектирование, но полученное решение менее универсально. При переходе на транспондеры с многоуровневыми форматами модуляции данный подход еще менее эффективен и, скорее всего, неприменим из-за недопустимо большого снижения дальности работы систем связи.

Таким образом, необходим метод оценки качества работы когерентного канала, учитывающий совместное действие линейных (шум ASE) и нелинейных искажений. Показано, что классический метод оценки нелинейных искажений, разработанный для каналов с амплитудной модуляцией (модуляцией мощности сигнала без управления фазой) и основанный на вычислении величины нели-

нейного фазового набега, неприменим для когерентных каналов. Для этого была предложена модель, рассматривающая нелинейные искажения как нелинейный интерференционный гауссов шум (GN-модель [1]). Данная модель малоприменяема для расчета реальных линий вследствие ее чрезвычайной сложности и ограниченной области применимости – только для длинных многопролетных линий связи без компенсации дисперсии.

В то же время в ряде экспериментальных работ было показано, что модель нелинейного шума можно применять для расчета нелинейных искажений в однопролетных линиях связи [7–9].

В работе [10] предложена феноменологическая модель для описания нелинейных искажений как нелинейного шума (базирующаяся на основных постулатах классической GN-модели), в которой нелинейные коэффициенты определяются экспериментально. В настоящей работе были исследованы экспериментальные условия, которые позволяют добиться корректных результатов при измерении.

Перечислим основные положения анализируемой модели:

1. Нелинейные искажения в когерентных оптических каналах можно трактовать как нелинейный интерференционный гауссов шум. Его мощность P_{NL} в рассматриваемом диапазоне пропорциональна кубу мощности сигнала P_S :

$$P_{NL} = \eta P_S^3. \tag{1}$$

Влияние нелинейных искажений (нелинейного шума) можно оценивать величиной нелинейного OSNR:

$$OSNR_{NL} = \frac{P_S}{P_{NL}} = \eta P_S^2, \tag{2}$$

где η – коэффициент нелинейности.

2. Шум ASE (влияние которого характеризуется классическим $OSNR_{ASE} = P_S/P_{ASE}$) и нелинейный шум складываются аддитивно. На число ошибок (величину pre-FEC BER) влияет отношение мощности сигнала к сумме мощностей линейного и нелинейного шумов – полный обратный OSNR_{BER}:

$$\frac{1}{OSNR_{BER}} = \frac{P_{ASE} + P_{NL}}{P_S} = \frac{1}{OSNR_{ASE}} + \frac{1}{OSNR_{NL}}. \tag{3}$$

В связи с этим первой задачей является измерение коэффициента нелинейности η .

Схема эксперимента приведена на рис.1. Сигнал с когерентного транспондера 100G сначала поступает на мультиплексор (MUX), далее на блок внесения дисперсии (набор катушек с волокном и эрбиевых усилителей, работающих в линейном по мощности режиме) и затем на основной усилитель мощности. Далее сигнал разделяется ответвителем – основная часть поступает в исследуемое стандартное одномодовое волокно (F.U.T.), в котором и возникают нелинейные эффекты. Дополнительно малая часть сигнала с выхода ответвителя поступает через демультиплексор (DEMUX) на измеритель оптической мощности (PM), вводимой в исследуемое волокно (калибровка проводится на этапе наладки установки). После прохождения через исследуемое волокно сигнал усиливается предусилителем и через демультиплексор поступает на линейный приемник транспондера. OSNR_{ASE} измеряется спектроанализатором (OSA), подключенным к мониторинговому выходу предусилителя.

Суть эксперимента состоит в следующем: в исследуемом волокне возникают нелинейные искажения, зависящие от величины вводимой в волокно мощности. Кроме них в схеме присутствует шум ASE. Оба эффекта приводят к появлению ошибок при приеме сигнала, т.е. определяют величину pre-FEC BER. Вклад шума ASE (OSNR_{ASE}) измеряется спектроанализатором напрямую. Для определения величины нелинейных искажений необходимо знать связь между величиной pre-FEC BER и полным OSNR_{BER}, т.е. калибровочную функцию транспондера. Таким образом, эксперимент проводится в два этапа.

На первом этапе измеряется калибровочная функция транспондера. Если ввести в исследуемое волокно сигнал малой мощности, нелинейные эффекты не возникнут, и вся линия будет работать в линейном режиме. В этом случае шум ASE является единственной причиной ошибок. Будем изменять величину OSNR_{ASE} линии (например, путем добавления шума ASE от генератора в конец линии, перед предусилителем; возможны и другие способы), соответственно будет изменяться pre-FEC BER (рис.2). Поскольку нелинейные эффекты отсутствуют, обратный нелинейный OSNR равен нулю, и полный обратный OSNR равен обратному OSNR шума ASE.

На втором этапе измеряется коэффициент нелинейности. При отключенном дополнительном источнике шума увеличиваем входную мощность, вводимую в исследуемое волокно. Для каждого ее значения измеряем значения pre-FEC BER и OSNR_{ASE}. С помощью найденной калибровочной функции определяем полный OSNR_{BER} по значению pre-FEC BER. Далее строим зависимость $OSNR_{NL}^{-1} = OSNR_{BER}^{-1} - OSNR_{ASE}^{-1}$ от квадрата входной

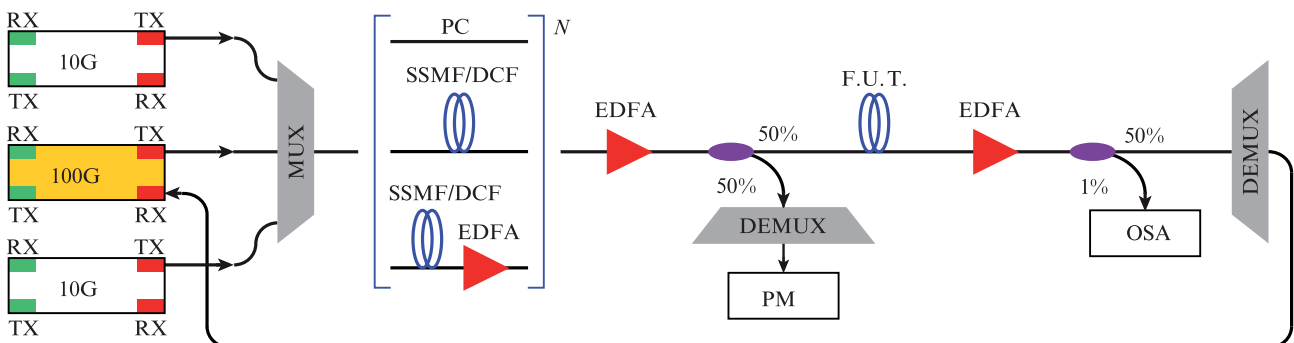


Рис.1. Схема эксперимента по измерению коэффициента нелинейности (PC – оптический соединительный шнур, N – число пролетов).

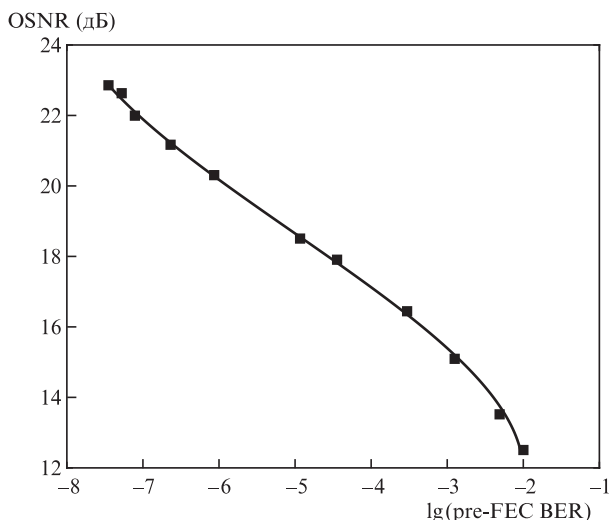


Рис.2. Калибровочная функция транспондера.

мощности P_S^2 (рис.3). Коэффициент нелинейности η находим как тангенс угла наклона проходящей через нуль аппроксимирующей прямой (см. формулу (2)).

Основными причинами погрешностей в данном эксперименте являются следующие:

1. Систематическая погрешность при измерении введенной в волокно мощности. Любое отличие реально введенной в исследуемое волокно мощности от ее расчетного значения приводит к наклону аппроксимирующей прямой (рис.4).

2. Неверный выбор диапазона измерений. Канал в реальной линии связи оптимизируется по одной из методик, например по максимуму запаса по OSNR. В общем случае чем больше вводимая в пролет мощность, тем больше OSNR_{ASE} на выходе из пролета (и линии в целом), но и тем сильнее влияние нелинейных искажений в начале данного пролета. И наоборот, уменьшение вводимой в волокно мощности уменьшает влияние нелинейных искажений, но увеличивает влияние шума ASE, вносимого последующими усилителями. Максимальный запас по OSNR достигается при заданном соотношении между мощностями линейного и нелинейного шумов в линии (вследствие кубической зависимости мощности нелиней-

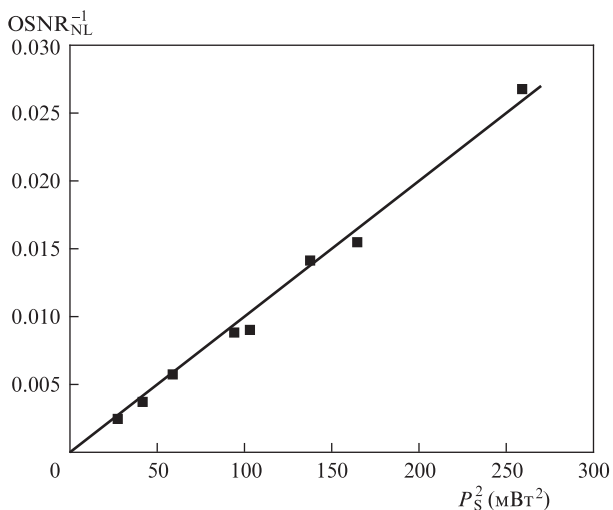


Рис.3. Зависимость обратного нелинейного $OSNR_{NL}$ от квадрата входной мощности.

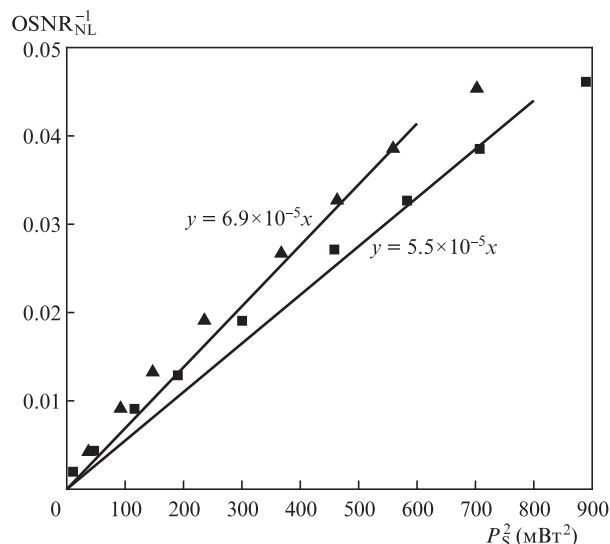


Рис.4. Влияние систематической ошибки измерения введенной в волокно мощности; \blacktriangle – экспериментальные значения, \blacksquare – расчетные значения с учетом изменения входной мощности на +0.5 дБ.

ного шума от мощности сигнала мощности ASE-шума и нелинейного шума соотносятся как 2:1). Поэтому для расчета линий важно измерение нелинейных коэффициентов в заданном рабочем диапазоне мощностей/OSNR канала (хотя с точки зрения экспериментатора привлекательным кажется измерение в режиме сильной нелинейности для уменьшения погрешности, возникающей при дифференциальном измерении). Выход за оптимальные значения рабочего диапазона приводит к появлению систематической ошибки, связанной с неточностью GN-модели (рис.5).

3. Колебания мощности сигнала на линейном приемнике – для когерентных форматов с многоуровневой модуляцией.

4. Влияние частично поляризованного ASE-шума. При использовании частично поляризованного источника ASE-шума наблюдаются сильные колебания величины pre-FEC BER при постоянном значении OSNR_{ASE} даже в линейном режиме. Поскольку применяются обычные оптические соединительные шнуры (с волокном, не поддер-

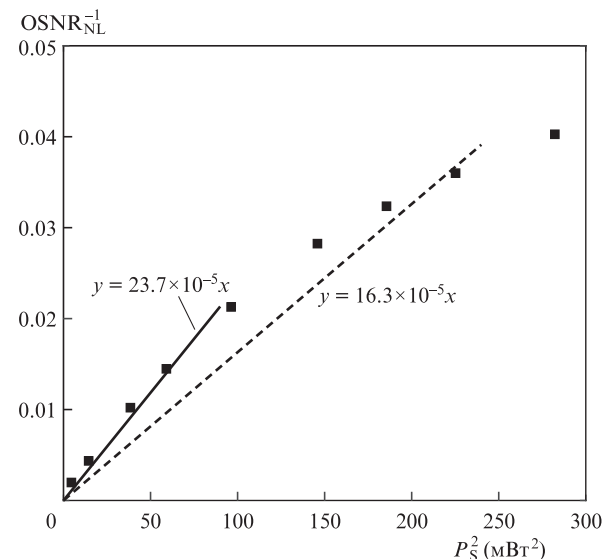


Рис.5. К вопросу о правильном выборе диапазона измерений.

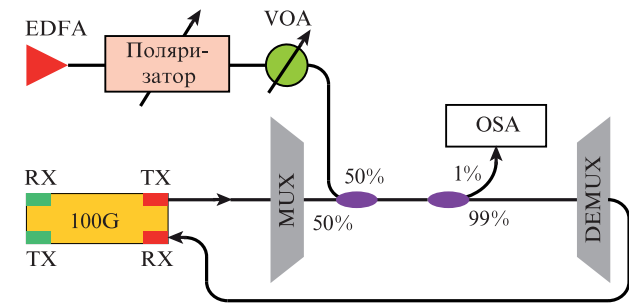


Рис.6. Схема установки для определения влияния частично поляризованного ASE-шума (VOA – переменный оптический аттенюатор).

живающим поляризацию), то при любом их смещении происходит поворот плоскости поляризации шума относительно плоскостей поляризации сигнала (формат модуляции DP *n*QAM), что приводит к изменению отношения сигнал/шум для данной поляризации и, следовательно, к изменению числа ошибок. Для определения величины эффекта был проведен дополнительный эксперимент по измерению зависимости pre-FEC BER от угла поворота анализатора (рис.6 и 7). Для получения удовлетворительных результатов необходим деполаризованный источник ASE-шума.

Таким образом, найден фундаментальный коэффициент нелинейности η (в дальнейшем – $\eta_{100-100,\infty}$), определяющий самовоздействие когерентного (например 100G) канала в случае, когда нелинейный интерференционный шум успел сформироваться – при большой входной дисперсии. Для расчета реальных линий этого недостаточно.

Необходимо дополнительно учесть, что при малой величине накопленной дисперсии нелинейный коэффициент существенно меньше по величине и зависит от дисперсии [10]. Экспериментально измеренная зависимость η от накопленной дисперсии приведена на рис.8.

Анализ взаимовлияния соседних каналов показал, что уровень формирующегося нелинейного шума существенно зависит от формата модуляции. Поэтому в феномено-

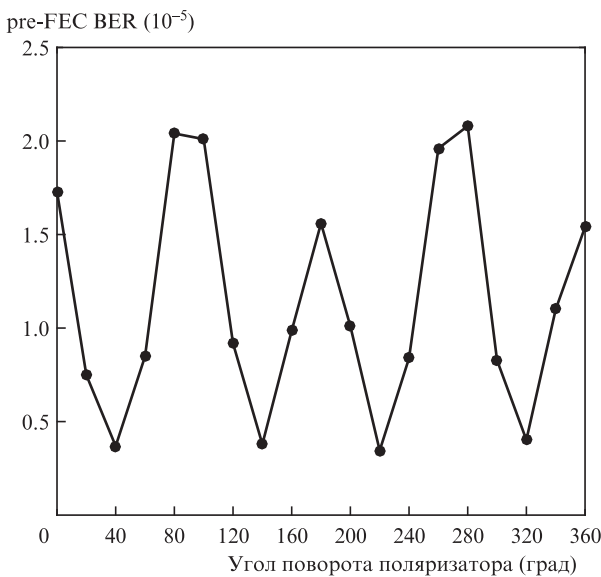


Рис.7. Зависимость pre-FEC BER от угла поворота поляризатора (эксперимент с подмешиванием частично поляризованного ASE-шума).

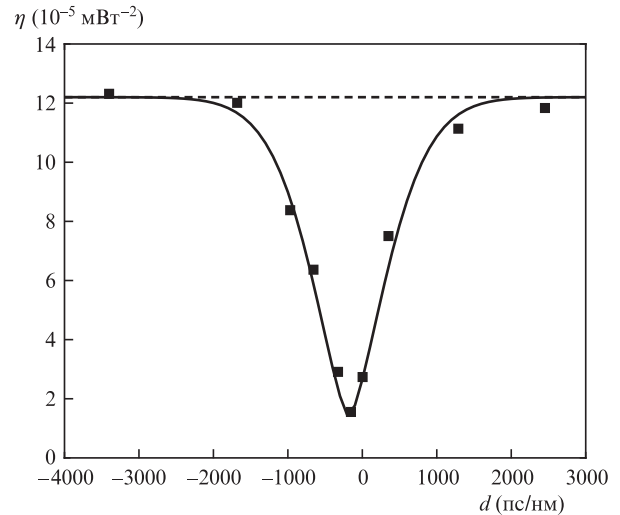


Рис.8. Зависимость коэффициента нелинейности η от дисперсии d .

логической модели введены нелинейные коэффициенты трех типов: $\eta_{100-100}$ (самовоздействие когерентного канала 100G и влияние соседних каналов 100G), η_{100-10} (влияние соседних каналов 10G), $\eta_{100-2.5}$ (влияние соседних каналов 2.5G). Кроме того, необходимо учесть случай короткого по сравнению с нелинейной длиной пролета, в котором нелинейные искажения не успевают сформироваться полностью.

Итак, для вычисления влияния нелинейного шума было получено следующее выражение:

$$\eta(d, L, \alpha, K, \Delta f, \Delta f_p) = \eta_{\infty} F(d) F(L, \alpha) F(K, \Delta f, \Delta f_p), \quad (4)$$

где η_{∞} – фундаментальный коэффициент нелинейности для заданной скорости канала и типа волокна (SSMF или DCF); $F(d)$ – функция, описывающая зависимость от дисперсии d ; $F(L, \alpha)$ – функция, описывающая зависимость от длины пролета L и затухания в волокне α ; $F(K, \Delta f, \Delta f_p)$ – функция, описывающая зависимость от числа воздействующих каналов K , частотного плана Δf и защитного интервала Δf_p между исследуемым каналом 100G и группой воздействующих каналов.

Точность расчета OSNR с использованием предложенной феноменологической модели была оценена экспериментально. Показано, что в области изменений параметров, характерной для реальных линий связи, отклонение расчетных значений от экспериментально измеренных не превышает 1.5 дБ.

Таким образом, в настоящей работе предложена феноменологическая модель, в которой нелинейные искажения рассматриваются как нелинейный шум, возникающий в результате самовоздействия канала и перекрестного взаимодействия каналов. Предложенная модель расширяет область применимости известной модели нелинейного шума (GN-модель) и позволяет рассчитывать уровень нелинейного шума в линиях связи с малой накопленной дисперсией (в том числе в линиях связи с компенсацией дисперсии) и в гетерогенных DWDM-линиях связи, в которых по разным спектральным каналам для передачи информации используются разные скорости (100 Гбит/с, 10 Гбит/с и 2.5 Гбит/с) передачи и разные форматы модуляции (DP 16QAM, DP QPSK, NRZ ASK). Отработана экспериментальная методика измерений параметров модели, что позволяет выполнять оценку каче-

ства работы когерентного канала в линии как на этапе проектирования, так и во время его эксплуатации. Экспериментальная верификация модели показала, что точность расчетов достаточна для ее практического использования при проектировании волоконно-оптических систем связи.

1. Poggiolini P., Bosco G., Carena A., Curri V., Jiang Y., Forghieri F. *J. Lightwave Technol.*, **32** (4), 694 (2014).
2. Carena A., Bosco G., Curri V., Jiang Y., Poggiolini P., Forghieri F. *Opt. Express*, **22**, 16335 (2014).
3. Konyshov V.A., Leonov A.V., Nanii O.E., Novikov A.G., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. *Opt. Commun.*, **349**, 19 (2015).
4. Konyshov V.A., Leonov A.V., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. *Opt. Commun.*, **355**, 279 (2015).
5. Gurkin N.V., Nanii O.E., Novikov A.G., Плаксин С.О., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. *Квантовая электроника*, **43** (6), 550 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (6), 550 (2013)].
6. Gurkin N.V., Mikhailov V., Nanii O.E., Novikov A.G., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 095103 (2014).
7. Redyuk A.A., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Mikhailov V., Fedoruk M.P. *Laser Phys. Lett.*, **12**, 025101 (2015).
8. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukin S.N., Makovejs S., Akopov S.G., Ten S.Y., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Sleptsov M. *Opt. Express*, **22**, 22308 (2014).
9. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukin S.N., Akopov S.G., Makovejs S., Ten S.Y., Nanii O.E., Treshchikov V.N. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 075107 (2013).
10. Конышев В.А., Леонов А.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. *Квантовая электроника*, **46** (12), 1121 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (12), 1121 (2016)].