

Демонстрация и оптимизация сверхскоростного полностью оптического логического вентиля «И» с использованием четырехволнового смещения в полупроводниковом оптическом усилителе*

М.Разахи, А.Ностратпур, Н.К.Дас

Предложен полностью оптический логический вентиль «И», основанный на четырехволновом смещении в полупроводниковом оптическом усилителе (ПОУ), интегрированном с оптическим фильтром. В предлагаемой схеме предпочтительная логическая функция может выполняться без использования непрерывного сигнала. Модифицированное нелинейное уравнение Шредингера используется для моделирования распространения волны в ПОУ. Оно учитывает все нелинейные эффекты, важные для импульсов пико- и субпикосекундной длительности, и решается конечно-разностным методом решения задачи распространения пучков. Показано, что оптимальный выходной сигнал с энергией 40 фДж может быть получен при скорости передачи данных 50 Гбит/с. При оптимизации производительности системы кроме нелинейных эффектов широко исследовались интерференция распространяющихся сигналов в ПОУ и влияние скорости передачи входных сигналов.

Ключевые слова: оптический логический вентиль, полупроводниковый оптический усилитель, четырехволновое смещение, нелинейные эффекты, конечно-разностный метод решения задачи распространения пучков, интерференционный эффект, скорость передачи.

1. Введение

Высокоскоростные полностью оптические логические вентили являются ключевыми элементами оптических схем. Среди этих вентилях полностью оптический вентиль «И» – важная логическая единица для оптической связи. Полностью оптические логические вентили основаны на нелинейных эффектах в полупроводниковом оптическом усилителе (ПОУ), таких как кросс-модуляция усиления (КМУ), кросс-модуляция фазы (КМФ), четырехволновое смещение (ЧВС) и кросс-модуляция поляризации (КМП).

В последние годы были предложены разные схемы оптического вентиля «И» с различной выходной скоростью передачи данных с применением КМУ (10 Гбит/с) [1], КМП (10 Гбит/с) [2], ЧВС (5 Гбит/с) [3], ЧВС с поляризационной манипуляцией при передаче модулированных сигналов (40 Гбит/с) [4], а также ПОУ, использующих интерферометр Маха–Цендера (80 Гбит/с) [5], оптический фильтр (10 Гбит/с) [6], каскадную однопортовую связь (10 Гбит/с) [7], эффект нелинейного вращения поляризации (10 Гбит/с) [8], полупроводниковые микрорезонаторы (30 Гбит/с) [9], и каскадных ПОУ с оптическими фильтрами (40 Гбит/с) [10].

В настоящей работе впервые, насколько нам известно, исследована и оптимизирована простая схема полностью оптического логического вентиля «И», использующего

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

M.Razaghi. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Kurdistan, Iran

A.Nosratpour. Department of Electrical Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

N.K.Das. Department of Electrical and Computer Engineering, Curtin University, Perth, WA 6845, Australia

Поступила в редакцию 25 марта 2012 г., после доработки – 7 июля 2012 г.

ЧВС в ПОУ для высокоскоростных оптических систем связи (выходная скорость передачи данных 50 Гбит/с, что сравнимо с результатами предыдущих работ, например работы [5], в которой схема является очень сложной). Предлагаемая схема очень рациональна и проста в реализации. В ней в ПОУ одновременно инжектируются два потока данных, а дополнительный непрерывный сигнал не требуется. Выходной сигнал (функция «И») получается с помощью идеального фильтра с полосой пропускания 1 ТГц. В нашей схеме в ПОУ используются такие эффекты, как истощение и нагрев носителей, «выжигание» спектрального провала, дисперсия групповых скоростей, фазовая самомодуляция и двухфотонное поглощение. Модифицированное нелинейное уравнение Шредингера (МНУШ) широко применяется для моделирования распространения волн в ПОУ [11, 12]. Оно решается конечно-разностным методом распространения пучков (КР–МРП) [12, 13]. Этот метод широко используется для анализа распределения поля в оптических волноводах и распространения оптического импульса в волокнах. Метод КР–МРП обладает малым временем сходимости и высокой точностью получаемых результатов [12–15].

2. Конфигурация оптического логического вентиля

На рис.1 показана схема логического вентиля «И», работающего с двумя периодическими оптическими с возвратом к нулю входными сигналами 1 и 2, являющимися

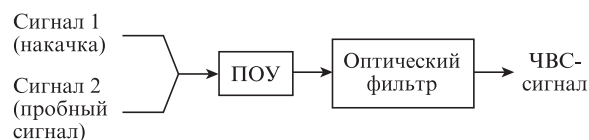


Рис.1. Принципиальная схема вентиля «И».

входными сигналами накачки и зондирования соответственно. Когда два потока данных (входные сигналы) на разных центральных частотах f_p (накачка) и f_q (пробный импульс) инжектируются в ПОУ одновременно, в нем генерируется ЧВС-сигнал на частоте $2f_p - f_q$, что эквивалентно логической операции «И» между двумя входными сигналами.

3. Теория модели

Модель, использованная нами для исследования ПОУ, основана на МНУШ, которое описывает распространение оптического импульса в ПОУ в приближении медленно меняющейся огибающей, т. е. в предположении, что изменение комплексной огибающей функции во времени является очень медленным по сравнению с периодом оптического поля [12]:

$$\left[\frac{\partial}{\partial z} - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} + \frac{\alpha_{\text{int}}}{2} + \left(\frac{\gamma_{2p}}{2} + i b_2 \right) |A(\tau, z)|^2 \right] A(\tau, z) = \left\{ \frac{1}{2} g_N(\tau) \left[\frac{1}{f_T(\tau)} + i \alpha_N \right] + \frac{1}{2} \Delta g_T(\tau) (1 + i \alpha_T) - i \frac{1}{2} \frac{\partial g(\tau, \omega)}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0} \frac{\partial}{\partial \tau} - \frac{1}{4} \frac{\partial^2 g(\tau, \omega)}{\partial \omega^2} \Big|_{\omega_0} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \right\} A(\tau, z), \quad (1)$$

где $A(\tau, z)$ – комплексная огибающая оптического импульса; $|A(\tau, z)|^2$ – мощность оптического импульса; τ – локальное время в системе отсчета, распространяющейся с групповой скоростью v_g для центральной частоты оптического импульса. В уравнении (1) использованы следующие величины и обозначения:

$$g_N(t) = g_0 \exp \left[-\frac{1}{E_{\text{sat}}} \int_{-\infty}^{\infty} U(s) \exp \left(-\frac{s}{\tau_s} \right) I(z, t-s) ds \right]; \quad (2)$$

$$f_T(t) = 1 + \frac{1}{\tau_{\text{SHB}} P_{\text{SHB}}} \int_{-\infty}^{\infty} U(s) \exp \left(-\frac{s}{\tau_{\text{SHB}}} \right) I(z, t-s) ds; \quad (3)$$

$$\Delta g_T(t) = -h_1 \int_{-\infty}^{\infty} U(s) \exp \left(-\frac{s}{\tau_{\text{CH}}} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{s}{\tau_{\text{SHB}}} \right) \right] I(z, t-s) ds - h_2 \int_{-\infty}^{\infty} U(s) \exp \left(-\frac{s}{\tau_{\text{CH}}} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{s}{\tau_{\text{SHB}}} \right) \right] I'(z, t-s) ds; \quad (4)$$

$$\frac{\partial g(t, \omega)}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0} = A_1 + B_1 [g_0 - g(t, \omega_0)]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 g(t, \omega)}{\partial \omega^2} \Big|_{\omega_0} = A_2 + B_2 [g_0 - g(t, \omega_0)]; \quad (6)$$

$$g(t, \omega_0) = \frac{g_N(t, \omega_0)}{f_T(t)} + \Delta g_T(t, \omega_0); \quad (7)$$

β_2 – коэффициент дисперсии групповой скорости; α_{int} – коэффициент линейных потерь; γ_{2p} – коэффициент двухфотонного поглощения; b_2 – константа мгновенной фазовой самомодуляции из-за эффекта Керра; $g_N(t)$ – насыщенный за счет истощения носителей коэффициент усиления; g_0 – коэффициент линейного усиления; E_{sat} – энергия насыщения; τ_s – время жизни носителей; $f_T(t)$ и P_{SHB} – функция вы-

жигания спектрального провала и соответствующая мощность насыщения; τ_{SHB} – время релаксации выжженной спектральной дыры; α_N и α_T – факторы увеличения ширины линии, обусловленного изменением коэффициента усиления из-за истощения и нагрева носителей соответственно; $\Delta g_T(t)$ – результирующее изменение коэффициента усиления из-за нагрева носителей и двухфотонного поглощения; $U(s)$ – функция Хевисайда; τ_{CH} – время релаксации при нагреве носителей; h_1 – вклад вынужденного испускания и поглощения свободных носителей в снижение коэффициента усиления за счет их нагрева; h_2 – вклад двухфотонного поглощения; A_1 и A_2 – наклон и кривизна линейного усиления на частоте ω_0 соответственно, в то время как B_1 и B_2 – константы, описывающие изменения этих величин при насыщении [12–15].

Для решения уравнения (1) резонатор ПОУ делится на M равных отрезков. При использовании центрально-разностной аппроксимации во временной области и трапецидального интегрирования по пространственным отрезкам с применением итерационной процедуры уравнение (1) может быть решено с высокой точностью за несколько секунд [12, 13].

4. Результаты и их обсуждение

Параметры, использованные при моделировании, приведены в табл.1 [12]. Огибающая входных импульсов соответствовала функции $\text{sech}^2 x$. Длительность по полувы-

Табл.1. Параметры, использованные при моделировании [12].

Название параметра	Параметр	Значение
Длина ПОУ	L	500 мкм
Эффективная площадь	A_T	5 мкм ²
Центральная частота импульса	f_0	349 ТГц
Энергия насыщения	E_{sat}	80 пДж
Коэффициент линейного усиления	g_0	92 см ⁻¹
Коэффициент дисперсии групповой скорости	β_2	0.05 пс ² ·см ⁻¹
Фактор увеличения ширины линии вследствие истощения носителей	α_N	3.1
Фактор увеличения ширины линии вследствие нагрева носителей	α_{CH}	2.0
Вклад вынужденного испускания и поглощения свободных носителей в снижение коэффициента усиления за счет разогрева носителей	h_1	0.13 см ⁻¹ ·пДж ⁻¹
Вклад двухфотонного поглощения	h_2	126 фс·см ⁻¹ ·пДж ⁻²
Время жизни носителей	τ_s	200 пс
Время остывания носителей	τ_{CH}	700 фс
Время релаксации выжженной спектральной дыры	τ_{SHB}	60 фс
Мощность насыщения при выжигании спектральной дыры	P_{SHB}	28.3 Вт
Линейные потери	α_{int}	11.5 см ⁻¹
Мгновенный нелинейный коэффициент Керра	n_2	-0.70 см ² ·ТВТ ⁻¹
Коэффициент двухфотонного поглощения	γ_{2p}	1.1 см ⁻¹ ·Вт ⁻¹
Параметры, описывающие разложение в ряд Тейлора до второго порядка спектра динамического коэффициента усиления	A_1 B_1 A_2 B_2	0.15 фс·мкм ⁻¹ -80 фс -60 фс ² ·мкм ⁻¹ 0 фс ²

соте составляла 3.4 пс. Центральная частота импульса накачки была равна 349 ТГц, отстройка частоты пробного излучения от частоты накачки $\Delta f = 1$ ТГц. Поэтому для выделения генерируемого ЧВС-сигнала мы используем диапазон спектра выходного сигнала $-500...+500$ ТГц вблизи центральной частоты 349 ТГц (которая является центральной частотой сигнала ЧВС) и выполняем обратное преобразование Фурье от соответствующих компонент. В нашем случае энергии импульса накачки и пробного импульса одинаковы. Интерференционный эффект определяется как отношение максимальной (P_{max}) и минимальной (P_{min}) пиковых мощностей генерируемого ЧВС-сигнала [16]:

$$PE = 10 \lg(P_{max}/P_{min}). \tag{8}$$

Эволюция цуга импульсов генерируемого ЧВС-сигнала показана на рис.2. Из-за восстановления коэффициента усиления в ПОУ пиковая мощность первоначально генерируемого ЧВС-сигнала уменьшается со временем. Если используется длинная битовая последовательность логических «1» (рис.2,а), коэффициент усиления ПОУ не может восстановиться до своего начального значения и остается постоянным для последующих битов, поэтому пиковая мощность ЧВС-сигнала не меняется. На рис.2,б показана индикаторная диаграмма, соответствующая генерируемому ЧВС-сигналу, приведенному на рис.2,а.

Если выходной ЧВС-сигнал ПОУ становится равным логическому «0», ПОУ может иметь достаточно времени для возврата к своему начальному состоянию (по сравнению с обратной частотой повторения входной битовой последовательности и временем жизни носителей в ПОУ), как показано на рис.3. Видно, что для двух входных битовых последовательностей «1111101» и «11111001» логическая операция «И» дает последовательность «11111001», при этом пиковая мощность генерируемого ЧВС-сигнала быстро снижается за счет восстановления коэффициента усиления.

На рис.4 показан интерференционный эффект в ПОУ для генерируемого ЧВС-сигнала при различных энергиях накачки и пробного импульса. Видно, что PE растет при

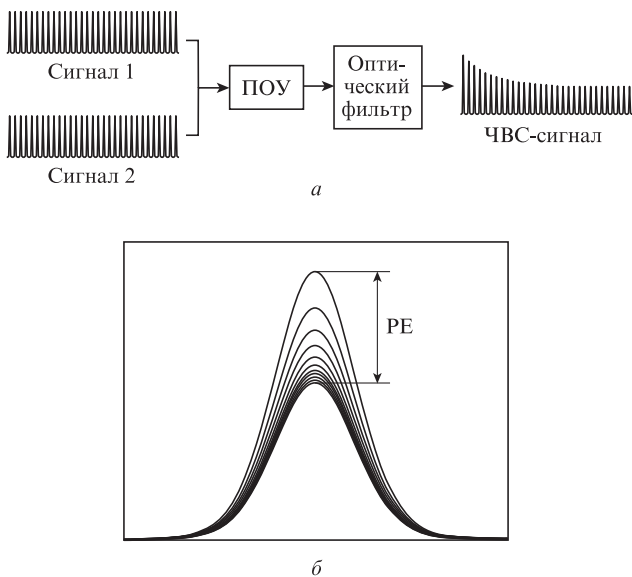


Рис.2. Выходной ЧВС-сигнал ПОУ при длинной последовательности логических «1» (а) и индикаторная диаграмма, соответствующая генерируемому ЧВС-сигналу, показанному на рис.2,а (б).

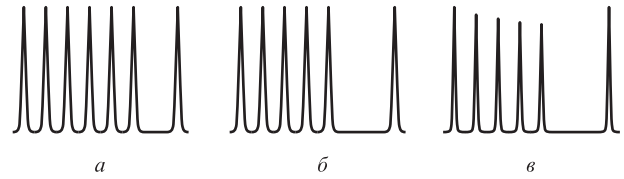


Рис.3. Иллюстрации восстановления коэффициента усиления ПОУ и демонстрация интерференционного эффекта: сигналы 1 (а) и 2 (б), а также ЧВС-сигнал (в).

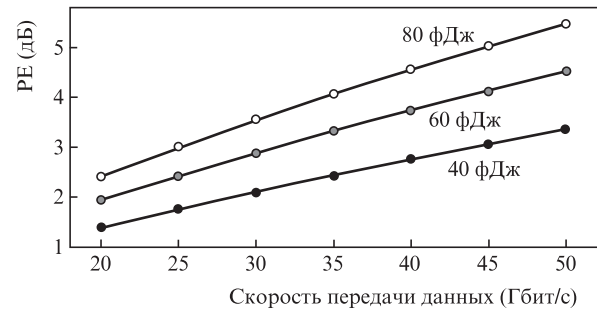


Рис.4. Интерференционный эффект в ПОУ для генерируемого ЧВС-сигнала в зависимости от скорости передачи данных для различных энергий накачки и пробного сигнала.

высоких скоростях передачи данных, что связано с увеличением частоты входного сигнала и с тем, что ПОУ не имеет достаточно времени, чтобы восстановить начальный коэффициент усиления до исходного значения. Более того, если энергии входных сигналов растут, эффект истощения носителей становится более существенным и требуется больше времени для восстановления инверсии населенности в ПОУ, поэтому PE увеличивается.

Скорость передачи данных в нашей схеме составляет 50 Гбит/с, что делает ее приемлемой для высокоскоростных оптических систем коммуникаций.

Интерференционный эффект в ПОУ в зависимости от энергий накачки и пробного сигнала иллюстрирует рис.5. При вариации входных сигналов с низкой энергией происходит сильное изменение величины PE, но при вариации входных сигналов с высокой энергией (более 200 фДж) она насыщается и существенно не меняется. Следует отметить, что, хотя для оптимального функционирования логического вентиля с высокой скоростью передачи данных PE должно быть как можно более малым, энергия входных сигналов также должна быть выбрана такой, чтобы выходной ЧВС-сигнал имел необходимую энергию.

На рис.6 показано изменение коэффициента усиления ПОУ в зависимости от энергии входного сигнала. В этом случае мы полагали, что в ПОУ вводятся две последова-

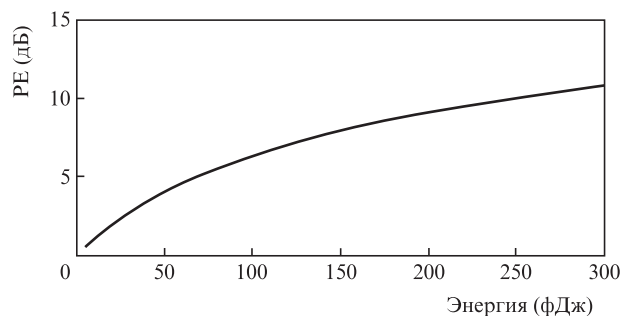


Рис.5. Зависимость PE от энергий накачки и пробного сигнала.

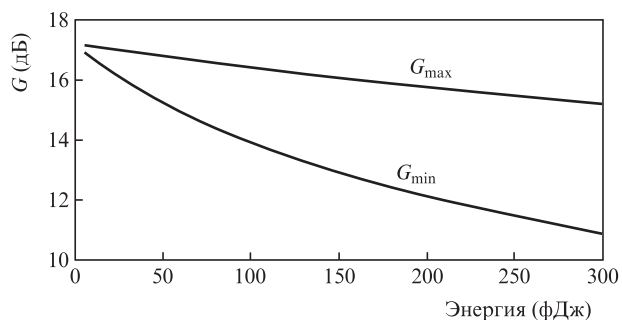


Рис.6. Коэффициент усиления ПОУ в зависимости от энергий накачки и пробного сигнала.

тельности входных данных с длинной серией логических битов «1». Видно, что коэффициент усиления ПОУ для первого бита G_{max} уменьшается с ростом энергий входных импульсов. Это связано с влиянием нелинейных эффектов, приводящим к насыщению коэффициента усиления ПОУ. Величина G_{min} соответствует коэффициенту усиления ПОУ после длинной последовательности логических битов «1». Видно, что коэффициент усиления не может быть восстановлен до первоначального значения, поэтому он постепенно уменьшается.

Для того чтобы получить оптимальные пиковую мощность и энергию генерируемого ЧВС-сигнала на выходе ПОУ для логической «1», мы должны аккуратно проана-

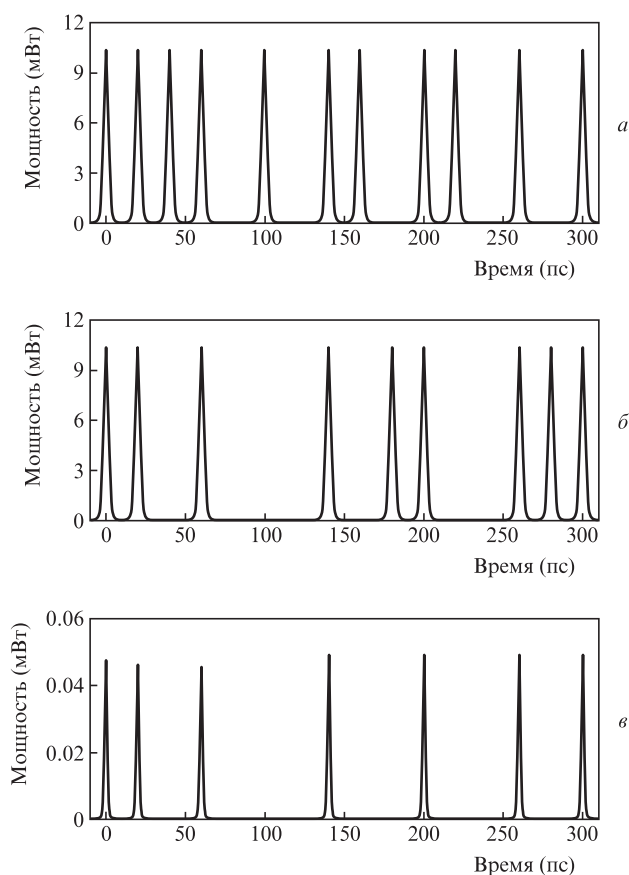


Рис.7. Входные потоки данных сигналов 1 (а) и 2 (б), а также выходного ЧВС-сигнала (в).

лизировать интерференционный эффект и усиление ПОУ. В соответствии с данными рис.5 и 6 для получения разумных значений РЕ и коэффициента усиления ПОУ желательны входные энергии менее 50 фДж. Поэтому мы выбираем для накачки и пробного сигнала энергию 40 фДж при скорости передачи данных 50 Гбит/с.

На рис.7 приведены результаты моделирования предлагаемого нами полностью оптического логического вентиля «И». На рис.7,а и б показаны потоки данных информационных сигналов 1 и 2 с последовательностями битов «1110101110101011» и «1010001011001110» соответственно. Демодулированная последовательность битов «1010001001001010» на рис.7,в отвечает логической операции «И» между двумя входными потоками данных.

5. Заключение

Таким образом, методом КР–МРП проведено численное моделирование полностью оптического логического вентиля «И», использующего ЧВС в ПОУ. При его реализации учтены основные нелинейные эффекты. Показано, что восстановление коэффициента усиления играет важную роль при оптимизации интерференционного эффекта на потоках ЧВС-битов. Более того, хотя энергия выходного ЧВС-сигнала пропорциональна энергиям накачки и пробного излучения, для оптимального функционирования оптического вентиля энергии входных сигналов должны быть выбраны такими, чтобы интерференционный эффект был минимальным. Следовательно, для энергии входных импульсов 40 фДж пиковая мощность выходного ЧВС-сигнала остается примерно неизменной (0.045 мВт) при работе оптического логического вентиля «И» со скоростью передачи данных 50 Гбит/с.

1. Kim S.H. et al. *Proc. 6th Int. Conf. on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices 2006 (NUSOD'06)* (Singapore, 2006, pp 91,92).
2. Han Liu-Yan, Wen He, Jiang Huan, Guo Yi-Li, Zhang Han-Yi. *Chin. Phys. Lett.*, **25** (11), 3901 (2008).
3. Kumar S., Willner A.E. *Opt. Express*, **14** (12), 5092 (2006).
4. Pei-li Li, De-xiu Huang, Xin-liang Zhang, Guang-xi Zhu. *Opt. Express*, **14** (24), 11839 (2006).
5. Dong H., Sun H., Wang Q., Dutta N.K., Jaques J. *Opt. Commun.*, **265** (1), 79 (2006).
6. Li Z. et al. *Electron. Lett.*, **41** (25), 1397 (2005).
7. Zhang X., Wang Y., Sun J., Liu D., Huang D. *Opt. Express*, **12** (3), 361 (2004).
8. Ye L., Hu W., He H. *Proc. 15th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)* (Sapporo, 2010, pp 194,195).
9. Ibrahim T.A. et al. *IEEE J. Photon. Technol. Lett.*, **15** (10), 1422 (2003).
10. Xu J., Zhang X., Dong J., Liu D., Huang D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6782**, 678209 (2007).
11. Hong M.Y., Chang Y.H., Dienes A., Heritage J.P., Delfyett P.J., Dijaili S., Peterson F.G. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2**, 523 (1996).
12. Das N.K., Yamayoshi Y., Kawaguchi H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 1184 (2000).
13. Razaghi M., Ahmadi V., Connelly M.J. *J. Lightwave Technol.*, **27** (15), 3162 (2009).
14. Hosseini S.R., Razaghi M., Das N.K. *J. Opt. Laser Technol.*, **44**, 528 (2012).
15. Razaghi M., Ahmadi V., Connelly M.J. *Opt. Quantum Electron.*, **41** (7), 513 (2009).
16. Xu J., Zhang X., Mørk J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **46** (1), 87 (2010).