

Исследование прохождения модовых импульсов в волноводе с одномерной решеткой

С.В. Краснов¹, С.И. Харитонов^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В данной статье проведено моделирование прохождения модовых импульсов в волноводе с одномерной решеткой. Исследуется дифракция непрерывного излучения и короткого импульса на решетке с периодом порядка длины волны в волноводе с отражающими стенками. Показана возможность дифференцирования отраженного короткого Гауссова импульса. Приводятся результаты моделирования для косинусного сигнала с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD) в свободно распространяемом программном обеспечении МЕЕР.

1. Введение

В последнее время актуальна проблема реализации базовых операций преобразования оптических сигналов с использованием оптической элементной базы. Несмотря на огромные возможности цифровой техники, полностью оптическая обработка сигналов обеспечивает высокую скорость и эффективность [1, 2]. Различные операции, включая сложение, дифференцирование, интегрирование, усиление, замедление, фильтрацию, переключение, обнаружение и др. можно выполнить оптически с помощью кольцевых резонаторов [3-9], фотонных кристаллов [10-16], решеток [17-21], слоистых пленок [22-25] и волноводов [26-35].

В данной работе проведено моделирование прохождения косинусного сигнала в качестве непрерывного излучения и короткого импульса в волноводе с одномерной субволновой решеткой с использованием метода FDTD. Исследована возможность дифференцирования короткого гауссова импульса.

2. Моделирование

Моделирование прохождения косинусного сигнала в волноводе с отражающими стенками с дифракции на решетке с периодом порядка длины волны выполнено с использованием метода FDTD в программном обеспечении МЕЕР. В свободно распространяемом программном обеспечении МЕЕР используется система единиц, в которой скорость света, электрическая и магнитная постоянная принимаются за единицу. Это означает, что за единицу времени свет проходит в вакууме единицу расстояния. Выбор единиц измерения определяется тем, как мы интерпретируем один из параметров. Например, если мы ставим в соответствие единице расстояния линейный размер в 1 мкм, то единица времени в стандартных величинах составляет примерно $3.3 \cdot 10^{-15} \text{ s} = 3.3 \text{ fs}$.

2.1. Распространение косинусного сигнала в волноводе

Рассмотрим волновод с большим показателем преломления у стенок, которые будут в этом случае действовать как отражающие. Будем использовать длину волны равную 0,8 мкм. Ширина резонатора составляет $h=10$ длин волн, т.е. $h=8$ мкм. Длина импульса: 3,3 фс.

Сигнал имеет косинусную форму: $\cos(2\pi nx/h)$.

На рисунках 1-3 представлены результаты моделирования распространения косинусного сигнала в волноводе при различных параметрах n в разные моменты времени.

Как видно из результатов, приведенных на рисунках 1-3, короткий импульс при распространении в волноводе не только уширяется, но и преобразуется. Причем моды большего порядка претерпевают большие изменения, чем моды меньшего порядка (см. для сравнения рис. 1 и 2). Заметим, что не модовый импульс ($n=1.4$ – не целое, рис. 3) при малом n также довольно устойчив.

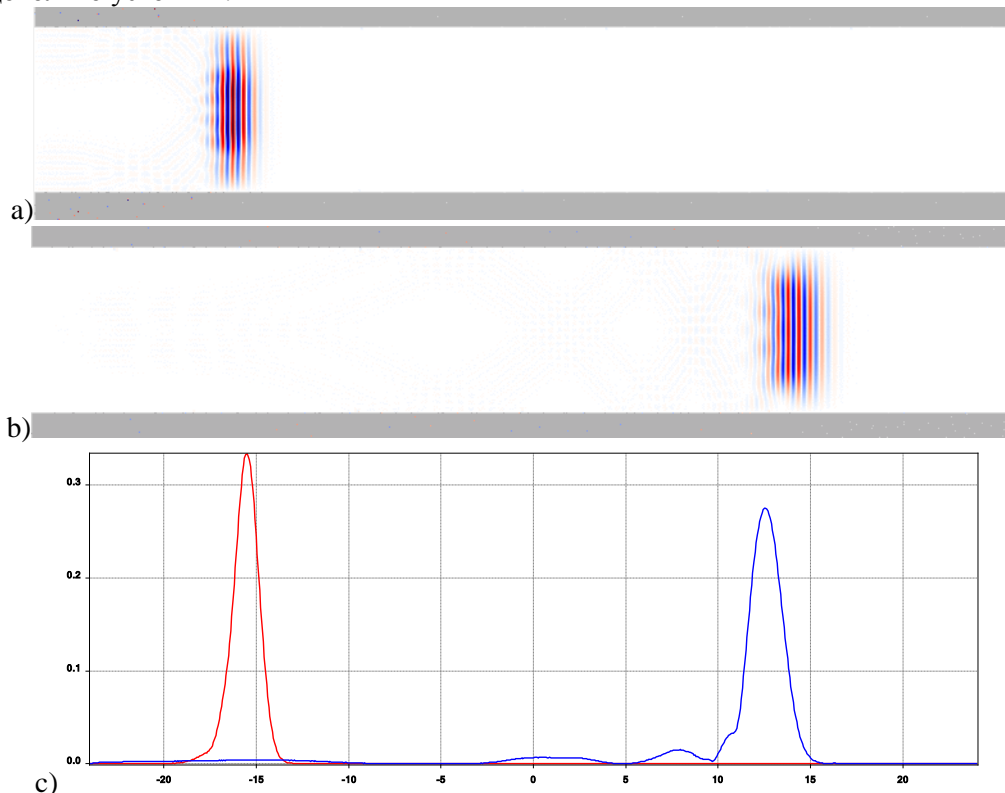


Рисунок 1. Прохождение импульса в волноводе при $n=1$: а) $t=50$ фс, б) $t=200$ фс, с) продольное сечение: $t=50$ фс (красный цвет), $t=200$ фс (синий цвет).

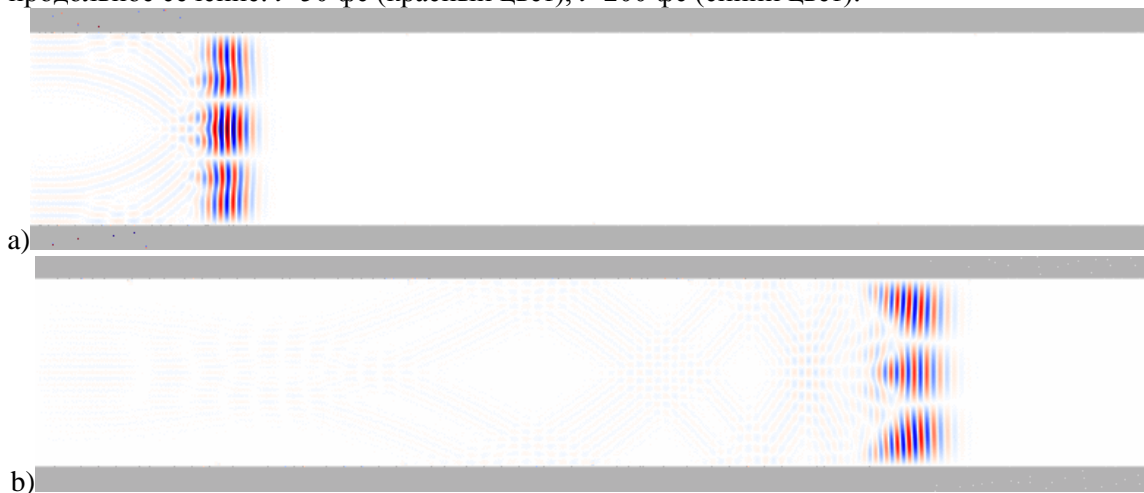


Рисунок 2. Прохождение импульса в волноводе при $n=3$: а) $t=50$ фс б) $t=200$ фс.

2.2. Прохождение сигнала через различные решетки в волноводе

Рассмотрим прохождение косинусного сигнала $\cos(2\pi nx/h)$, $n=1$ различной длительности в волноводе через дифракционные решетки с различным периодом.

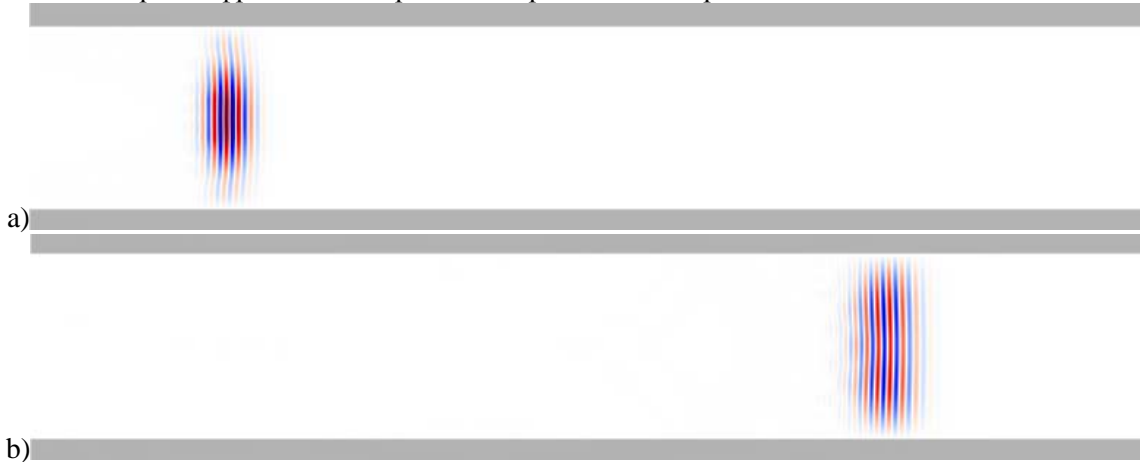


Рисунок 3. Прохождение импульса в волноводе при $n=1,4$: а) $t=50$ фс б) $t=200$ фс.

На рисунках 4-6 представлены результаты моделирования прохождения сигнала через решетки с периодом в $T=2\lambda$, λ , $\lambda/2$.



Рисунок 4. Прохождение импульса через решетку при $T = 2\lambda$: а) $t=50$ фс б) $t=200$ фс.

Как видно из полученных результатов, при $T=2\lambda$ (рис. 4) сигнал делится поровну на отраженный и прошедший. При меньших (субволновых) периодах (рис. 5, 6) происходят более сложные преобразования. Непрерывный сигнал в основном отражается, а энергия короткого импульса проходит через субволновую решетку в большей степени, так как короткий импульс содержит также высокочастотные составляющие.

На рисунке 7 показано продольное сечение амплитуды импульсов проходящих через 3 дифракционных решетки с различными периодами в момент времени $t=200$ фс. По рисунку 7 можно заключить, что решетка с периодом в половину длины волны рассеивает падающее излучение.

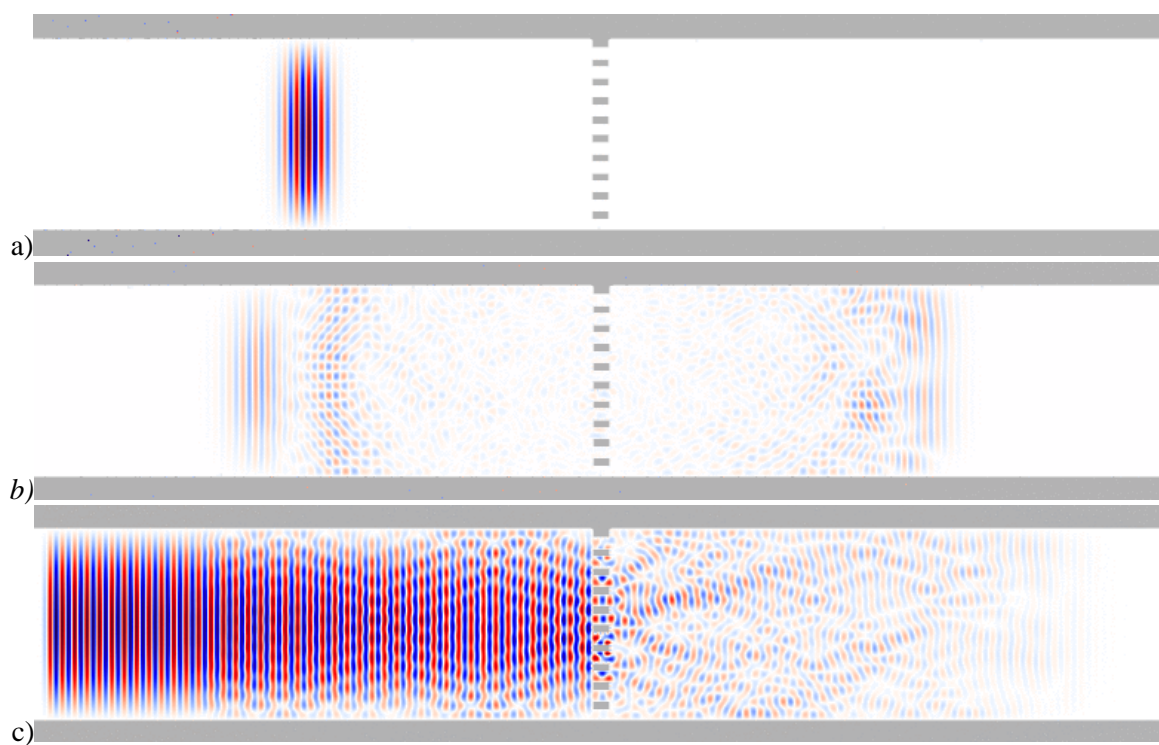


Рисунок 5. Прохождение импульса через решетку при $T = \lambda$: а) $t=50$ фс; б) $t=200$ фс; в) непрерывное излучение.

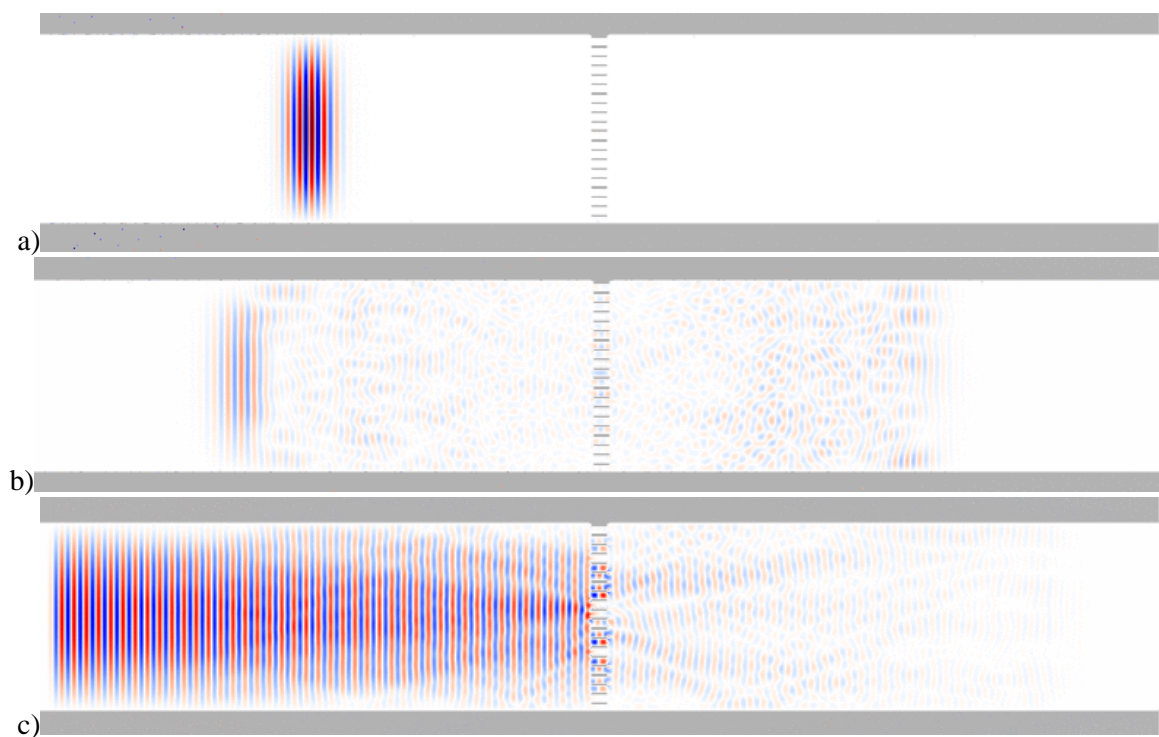


Рисунок 6. Прохождение импульса через решетку при $T = \frac{\lambda}{2}$: а) $t=50$ фс б) $t=200$ фс в) непрерывное излучение.

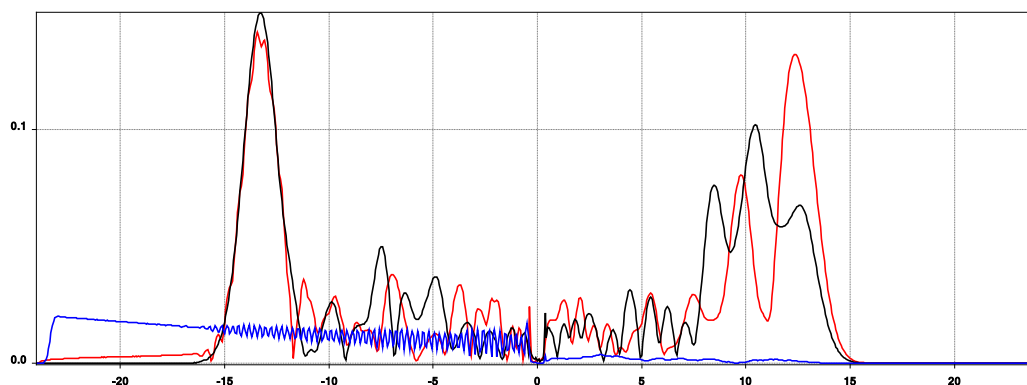


Рисунок 7. Прохождение импульса через решетку: красный – $T = 2\lambda$; черный – $T = \lambda$; синий – $T = \frac{\lambda}{2}$.

2.3. Дифференцирование оптического сигнала

В работах [18-20] рассматривается построение дифракционной решетки для выполнения операции дифференцирования оптического сигнала, как в пропускании, так и в отражении.

Проведем моделирование прохождения модовых импульсов в волноводесодной решеткой, используя параметры решетки, полученные в статьях [18-20].

На рисунке 8(a) показана геометрия дифференцирующей решетки, с параметрами: $d=1010$ нм, $h_1=620$ нм, $r=530$ нм, $h_2=0$, $\epsilon_{gr}=5,5$, $\epsilon_{sub}=2,1$, а на рисунке 8(b) показан вид дифференцирующей решетки, полученной в МЕЕР.

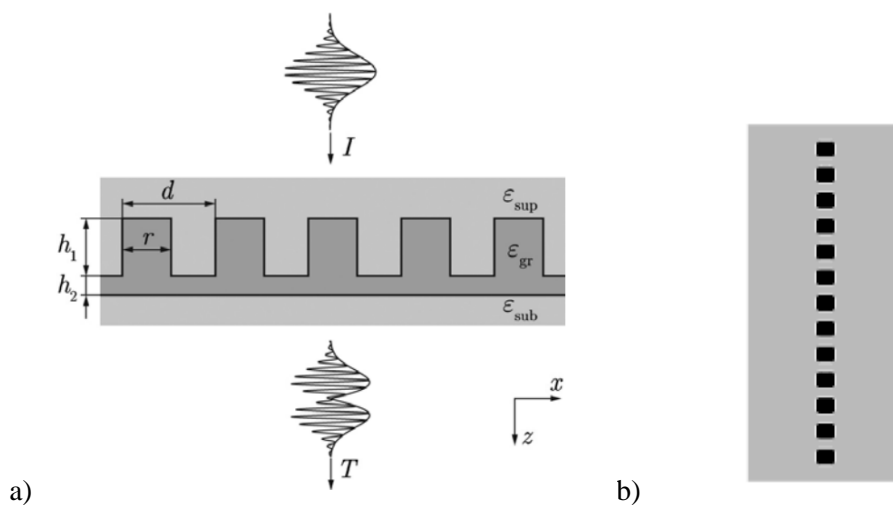


Рисунок 8. Геометрия дифференцирующей решетки.

На рисунке 9(a-c) представлено прохождение импульса в волноводе шириной $h=8$ мкм с данной решеткой в центре в различные моменты времени. На рисунке 9(a) и 9(b) дифракционная решетка находится в центре волновода. На рисунке 9(c) решетка находится в левой части волновода.

На рисунке 10 показано продольное сечение амплитуды импульса в разные моменты времени. Рисунок 10(a) соответствует рисунку 9(b) при $t=150$ фс. Рисунок 10(b) соответствует рисунку 9(c) при $t=165$ фс.

Как следует из приведенных результатов моделирования, четкое дифференцирование происходит только в отраженном сигнале. Прошедшая часть сигнала искажается и смешивается с высокочастотными компонентами.

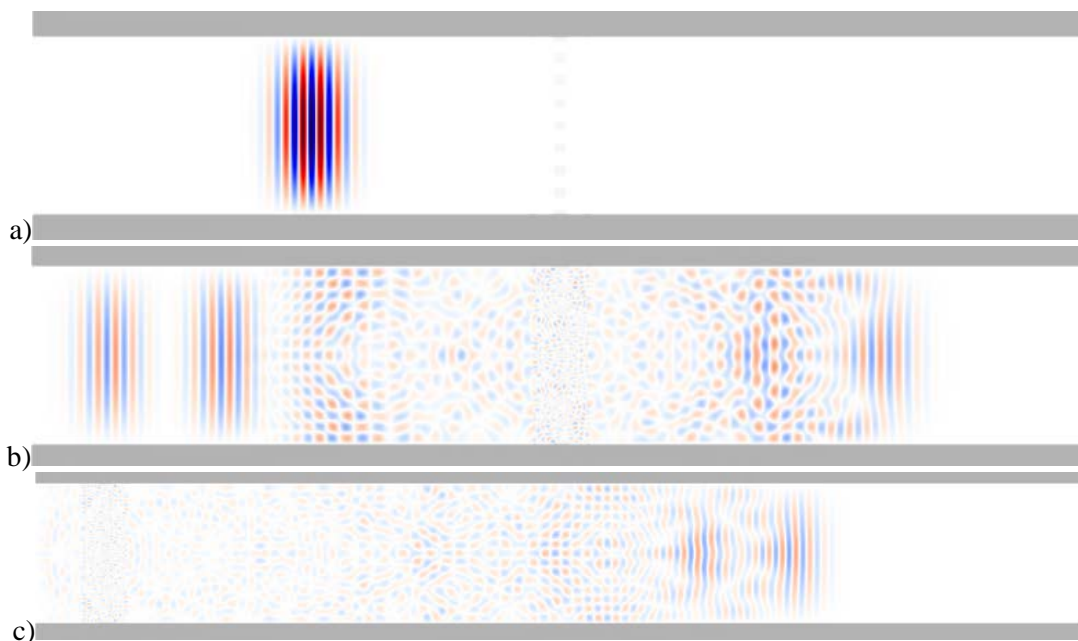


Рисунок 9. Прохождение импульса в волноводе: а) $t=50 \text{ фс}$ б) $t=150 \text{ фс}$ в) $t=165 \text{ фс}$.

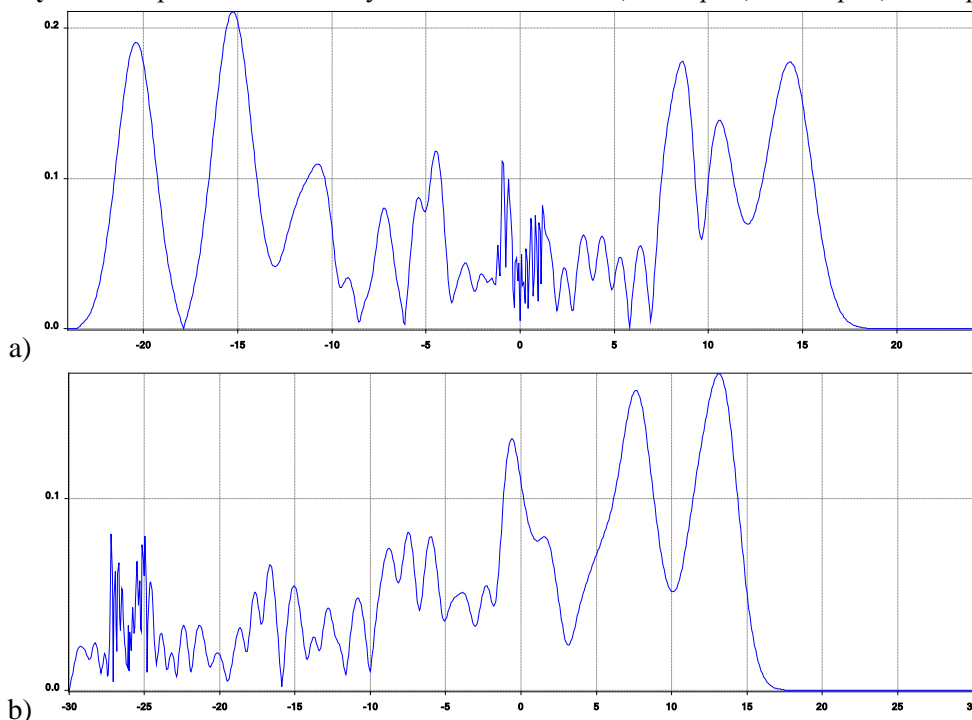


Рисунок 10. Прохождение импульса в волноводе: а) $t=150 \text{ фс}$ б) $t=165 \text{ фс}$.

3. Заключение

В настоящей работе проведено моделирование прохождения модовых импульсов в волноводе с одномерной решеткой с использованием метода FDTD, реализованного в свободно распространяемом программном обеспечении MEEP. Показано, что моды высокого порядка претерпевают большие изменения, чем моды меньшего порядка. Показано что характер прохождения импульса через решетку усложняется с уменьшением периода решетки. Исследование применения дифференцирующей решетки в волноводе показало, что явное дифференцирование происходит только в отраженном сигнале, в то время как прошедшая часть сигнала искажается и смешивается с высокочастотными компонентами.

4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26).

5. Литература

- [1] Tucker, R.S. The role of optics and electronics in high-capacity routers / R.S. Tucker // *J. Lightwave Technol.* – 2006. – Vol. 24. – P. 4655-4673.
- [2] Гаврилов, А.В. Перспективы создания оптических аналоговых вычислительных машин / А.В. Гаврилов, В.А. Сойфер // *Компьютерная оптика.* – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 140-150.
- [3] Little, B.E. Microring resonator channel dropping filters / B.E. Little, S.T. Chu, H.A. Haus, J. Foresi, J.P. Laine // *Journal of lightwave technology.* – 1997. – Vol. 15(6). – P. 998-1005.
- [4] Rabiei, P. Polymer micro-ring filters and modulators / P. Rabiei, W.H. Steier, C. Zhang, L.R. Dalton // *Journal of lightwave technology.* – 2002. – Vol. 20(11). – P. 1968.
- [5] Guarino, A. Electro-optically tunable microring resonators in lithium niobate / A. Guarino, G. Poberaj, D. Rezzonico, R. Degl'Innocenti, P. Günter // *Nature Photonics.* – 2007. – Vol. 1(7). – P. 407-410.
- [6] De Vos, K. Silicon-on-Insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing / K. De Vos, I. Bartolozzi, E. Schacht, P. Bienstman, R. Baets // *Optics Express.* – 2007. – Vol. 15(12). – P. 7610-7615.
- [7] Liu, F. Compact optical temporal differentiator based on silicon microring resonator / F. Liu, T. Wang, L. Qiang, T. Ye, Z. Zhang, M. Qiu, Y. Su // *Opt. Express.* – 2008. – Vol. 16(20). – P. 15880-15886.
- [8] De Leonardis, F. Performance of SOI Bragg grating ring resonator for nonlinear sensing applications / F. De Leonardis, C.E. Campanella, B. Troia, A.G. Perri, V. Passaro // *Sensors.* – 2014. – Vol. 14(9). – P. 16017-16034.
- [9] Degtyarev, S.A. 3D-simulation of silicon micro-ring resonator with Comsol / S.A. Degtyarev, V.V. Podlipnov, P. Verma, S.N. Khonina // *Proc. SPIE.* – 2016. – Vol. 10224. – P. 102241L-5p.
- [10] Yanik, M.F. All-optical transistor action with bistable switching in photonic crystal cross-waveguide geometry / M.F. Yanik, S. Fan, M. Soljagic, J.D. Joannopoulos // *Opt. Lett.* – 2003. – Vol. 28. – P. 2506-2508.
- [10] Lalanne, P. Photon confinement in photonic crystal nanocavities / P. Lalanne, C. Sauvan, J.P. Hugonin // *Laser & Photon.* – 2008. – Vol. 2(6). – P. 514-526.
- [11] Joannopoulos, J. Photonic Crystals – Molding the Flow of Light / J. Joannopoulos, S. Johnson, J. Winn, R. Meade // Princeton, 2008. – 305 p.
- [12] Sauvan, C. Modal-reflectivity enhancement by geometry tuning in photonic crystal microcavities / C. Sauvan, G. Lecamp, P. Lalanne, J. Hugonin // *Opt. Express.* – 2005. – Vol. 13. – P. 245-255.
- [13] Melloni, A. Tunable Delay Lines in Silicon Photonics: Coupled Resonators and Photonic Crystals, a Comparison / A. Melloni, A. Canciamilla, C. Ferrari // *IEEE Photonics Journal.* – 2010. – Vol. 2. – P. 181-194.
- [14] Казанский, Н.Л. Использование фотоннокристаллических резонаторов для дифференцирования оптических импульсов по времени / Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика.* – 2012. – Т. 36, № 4. – С. 474-478.
- [15] Kazanskiy, N.L. Use of photonic crystal cavities for temporal differentiation of optical signals / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich, S.N. Khonina // *Optics Letters.* – 2013. – Vol. 38(7). – P. 1149-1151.
- [16] Kazanskiy, N.L. Coupled-resonator optical waveguides for temporal integration of optical signals / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // *Optics Express.* – 2014. – Vol. 22(11). – P. 14004-14013.
- [17] Yoon, Y.T. Color filter incorporating a subwavelength patterned grating in poly silicon / Y.T. Yoon, H.S. Lee, S.S. Lee, S.H. Kim, K.D. Lee // *Optics Express.* – 2008. – Vol. 16(4). – P. 2374-2380.

- [18] Bykov, D. Temporal differentiation of optical signals using resonant gratings / D. Bykov, L. Doskolovich, V. Soifer // *Opt. Lett.* – 2011. – Vol. 36. – P. 3509-3511.
- [19] Головастиков, Н.В. Резонансные дифракционные решётки для дифференцирования оптических импульсов в отражении / Н.В. Головастиков, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович, В.А. Сойфер // *Компьютерная оптика.* – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 151-157.
- [20] Bykov, D.A. Time-domain differentiation of optical pulses in reflection and in transmission using the same resonant grating / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, N.V. Golovastikov, V.A. Soifer // *Journal of Optics.* – 2013. – Vol. 15(10). – P. 105703.
- [21] Golovastikov, N.V. Spatial optical integrator based on phase-shifted Bragg gratings / N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus // *Optics Communications.* – 2015. – Vol. 338. – P. 457-460.
- [22] Flory, F.R. Thin films for optical systems / F.R. Flory. – New York: Marcel Dekker Inc, 1995. – 215 p.
- [23] Macleod, H.A. Thin-Film Optical Filters / H.A. Macleod. – Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2001. – 667 p.
- [24] Казанский, Н.Л. Моделирование гиперспектрометра на спектральных фильтрах с линейно-изменяющимися параметрами / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина, С.Г. Вологовский, Ю.С. Стрелков // *Компьютерная оптика.* – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 256-270.
- [25] Kazanskiy, N.L. Simulation of spectral filters used in hyperspectrometer by decomposition on vector Bessel modes / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *Proc. of SPIE.* – 2015. – Vol. 9533. – P. 95330L-7.
- [26] Rivas, L.M. Experimental demonstration of ultrafast all fiber high-order photonic temporal differentiators / L. M. Rivas, S. Boudreau, Y. Park, R. Slavik, S. LaRochelle, A. Carballar, J.A. Rivas // *Opt. Letters.* – 2009. – Vol. 34(12). – P. 1792-1794.
- [27] Laine, J.P. Acceleration sensor based on high-Q optical microsphere resonator and pedestal antiresonant reflecting waveguide coupler / J.P. Laine, C. Tapalian, B. Little, H. Haus // *Sensors and Actuators A: Physical.* – 2001. – Vol. 93(1). – P. 1-7.
- [28] Baehr-Jones, T. Optical Modulation and Detection in Slotted Silicon Waveguides / T. Baehr-Jones, M. Hochberg, Guangxi Wang, R. Lawson, Y. Liao, P. A. Sullivan, L. Dalton, A. K.-Y. Jen, A. Scherer // *Opt. Express.* – 2005. – Vol. 13. – P. 5216-5226.
- [29] Казанский, Н.Л. Использование волноводного резонанса для создания нанооптических спектральных пропускающих фильтров / Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович, С.Б. Попов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика.* – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 162-168.
- [30] Kazanskiy, N.L. Harnessing the Guided-Mode Resonance to Design Nanooptical Transmission Spectral Filters / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich, S.N. Khonina // *Optical Memory and Neural Networks (Allerton Press).* – 2010. – Vol. 19(4). – P. 318-324.
- [31] Degtyarev, S.A. Modelling of TiO₂ based slot waveguides with high optical confinement in sharp bends / S.A. Degtyarev, M.A. Butt, S.N. Khonina, R.V. Skidanov // *IEEE Proceedings of International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube, 11-12 April 2016, Quetta, Pakistan).* – 2016. – P. 10-13.
- [32] Lukosz, W. Principles and Sensitivities of Integrated Optical and Surface Plasmon Sensors for Direct Affinity Sensing and Immunosensing / W. Lukosz // *Biosens Bioelectron.* – 1991. – Vol. 6(3). – P. 215-225.
- [33] Jin, W. Gas Detection with Micro- and Nano-Engineered Optical Fibers / W. Jin, H.L. Ho, Y.C. Cao, J. Ju, L.F. Qi // *Opt. Fiber Technol.* – 2013. – Vol. 19(6). – P. 741-759.
- [34] Butt, M.A. An evanescent field absorption gas sensor at mid-IR 3.39 μm wavelength / M.A. Butt, S.A. Degtyarev, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Journal of Modern Optics.* – 2017. – Vol. 64(18). – P. 1892-1897.
- [35] Butt, M.A. Silicon on silicon dioxide slot waveguide evanescent field gas absorption sensor / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Journal of Modern Optics.* – 2018. – Vol. 65. – P. 174-178.

Research of the passage of mode pulses in a waveguide with a one-dimensional diffraction grade

S.V.Krasnov¹, S.I.Kharitonov^{1,2}

¹Samara National Research University, MoskovskoeShosse 34A, Samara, Russia, 443086

² Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. In this paper, we simulate the propagation of mode pulses in a waveguide with a one-dimensional lattice. The diffraction of continuous radiation and a short pulse on a grating with a period of wave processing in a waveguide with reflecting walls is investigated. The possibility of differentiating the reflected short Gaussian pulse is reported. Simulation results for the cosine signal are presented using the FDTD method in freely distributed MEEP software.

Keywords: Pulse, Waveguide, Diffraction grating.