

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА В ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

А.Г. Глущенко¹, Е.П. Глущенко¹

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

Аннотация

В статье в геометрическом приближении показана одна из возможностей уменьшения скорости света в оптической волнонаправляющей структуре в направлении её оси за счёт использования метаматериалов в качестве элементов оптической структуры. Проводится исследование особенности распространения света в плоской модели оптической линии с оболочкой из материала с отрицательным показателем преломления. Показано, что за счёт введения метаматериала в структуре меняется характер распространения световых волн таким образом, что возможно существенное уменьшение скорости распространения света вдоль оси структуры вплоть до его остановки и изменения направления распространения света в противоположную сторону. Получены соотношения для расчёта времени прохождения луча в зависимости от геометрических и оптических параметров структуры, получены соотношения для расчёта критических параметров, условия «остановки» света.

Ключевые слова: оптический волновод, метаматериал, время задержки.

Цитирование: Глущенко, А.Г. Использование метаматериалов для управления скоростью распространения света в оптических структурах / А.Г. Глущенко, Е.П. Глущенко // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 202-207. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-202-207.

Введение

Возможность уменьшения скорости электромагнитных волн оптического диапазона в линиях передачи постоянно является предметом пристального внимания [1–2]. В настоящее время оно связано с развитием направления полностью оптических систем связи (AON) и оптических компьютеров (OC). В последнее десятилетие для «замедления» или «ускорения» света предлагались экзотические среды, такие как ультрахолодные газы и различные полимеры и кристаллы, в частности, магнитофотонные кристаллы [3–5]. Научились с высокой скоростью менять поляризацию света и снижать его скорость в десятки раз. Ожидается, что использование этого эффекта поможет в создании световых компьютеров, сверхбыстрых дисплеев и новых компьютерных сетей. Одним из самых громких достижений оптики последних лет стало замедление света на несколько порядков и «консервация» светового импульса [1, 2, 6]. Этот успех имеет огромное значение для фундаментальной науки и для наукоёмких технологий, например, для оптоэлектроники. Эти эксперименты, однако, очень непросты с технической точки зрения. Сложность заключается как в подготовке того вещества, которое будет использовано для замедления светового импульса, так и в элементах управления его замедляющими характеристиками. Авторы [5] сообщают, что групповая скорость распространения светового импульса через полимерную плёнку с высокой концентрацией белка бактериородопсина на 12 порядков меньше скорости света в вакууме.

Важным следствием этого стало исследование и разработка оптических линий задержки и устройств хранения света с использованием физических свойств сред и конструктивных решений [7]. Оптические линии задержки являются одним из базовых элементов оптических систем связи на волоконно-оптических ли-

ниях связи (ВОЛС). В данной работе рассмотрена одна из возможностей использования физических свойств оптических структур для решения задачи задержки света. Известно, что в основе работы волоконно-оптических линий связи лежит физический эффект полного внутреннего отражения [8–9]. Механизм распространения света достаточно простой. На границах раздела оптической среды в виде слоя или волокна с внешней средой, имеющей более низкий показатель преломления, луч света за счёт многократных переотражений от границ раздела сред распространяется вдоль оси структуры, которая является волноводом. В реальных системах структура поперечного сечения волновода может быть достаточно сложной, в частности, иметь неоднородное по радиусу распределение показателя преломления, имеет защитную оболочку. Наличие оболочки приводит к смещению отражённого от границы раздела сред луча в направлении оси структуры, что часто существенно влияет на характеристики оптических систем. Эффект смещения луча вдоль оси структуры наблюдается и при отсутствии специальной оболочки (эффект Гуса–Хенхена (*Goos-Hanchen-Effekt*) [10]) и может объясняться наличием переходного слоя на границе раздела сред за счёт изменения на границе сред характера атомной структуры вещества. Создание сред с отрицательным показателем преломления (метаматериалы) создало принципиально новые возможности управления светом и характеристиками оптических структур [11, 12], поскольку на границах разделов этих сред качественно меняется характер преломления электромагнитных волн (в том числе оптического диапазона) – отрицательное по знаку преломление. Поскольку распространение света в оптических структурах, в частности, в ВОЛС, основано на эффектах взаимодействия света с границами раздела сред, использование метаматериалов существенно

меняет характер распространения света в оптических структурах и, как следствие, приводит к изменению физических свойств и параметров этих структур различных конфигураций. К метаматериалам относят сравнительно недавно искусственно созданные материалы, которые за счёт отрицательного значения величины показателя преломления обладают необычными электромагнитными свойствами, не наблюдаемыми в природе: отрицательное лучепреломление, обращенные эффекты Доплера и Вавилова–Черенкова и др. [11–13]. Метаматериалы, хотя и ограниченно, уже находят применение в микроволновых и оптических устройствах, в частности, в устройствах с субволновым разрешением, в создании неотражающих покрытий, обеспечивающих невидимость, и их свойства позволяют существенно расширить возможности оптических систем [14–18]. Электродинамический расчёт волноводных структур с метаматериалами, проведённый различными авторами в оптическом [19–21] и микроволновом [22] диапазонах, не даёт наглядной картины протекающих процессов и связан с необходимостью экспериментальных исследований из-за ряда результатов, по крайней мере, непривычных для сложившейся теории волновых процессов. В настоящей работе показано, что простая и наглядная модель позволяет получить ряд важных теоретических соотношений и рассмотреть полезные для практики оптических линий передачи физические свойства волноводящих структур с оптически отрицательными средами.

Моделирование

Плоская оптическая структура и ход лучей в волнонаправляющей слоистой структуре (слое и оболочке) показаны на рис. 1 для случаев: $n_2 > 0$ – «оболочка – оптически положительная среда» (рис. 1а), $n_2 < 0$ «оболочка – оптически отрицательная среда» [12] (рис. 1б, в).

Рассмотрим эффект смещения оптического луча вдоль оси волнонаправляющей структуры, возникающий за счёт нанесения на поверхность оптического слоя оболочки (плёнки): 1) обычного оптического материала с малым показателем преломления и 2) слоя метаматериала с отрицательным показателем преломления. Для наглядности, следуя основополагающей работе [12], удобно использовать геометрическую модель распространения света.

При каждом отражении волн от границ раздела сред (рис. 1а) наблюдается смещение отражённого луча на расстояние 2Δ . Величина смещения луча зависит от угла ввода излучения и параметров граничащих сред. Рассмотрим величину этого смещения для оптически положительной среды оболочки $n_2 > 0$ (рис. 1а). При прохождении первой границы раздела сред (волновод–оболочка) угол падения и преломления связаны известным соотношением:

$$\sin \theta / \sin \phi = n_2 / n_1. \tag{1}$$

На второй границе раздела сред оболочка–внешняя среда (воздух) выполняется условие:

$$\sin \phi / \sin \eta = 1 / n_2. \tag{2}$$

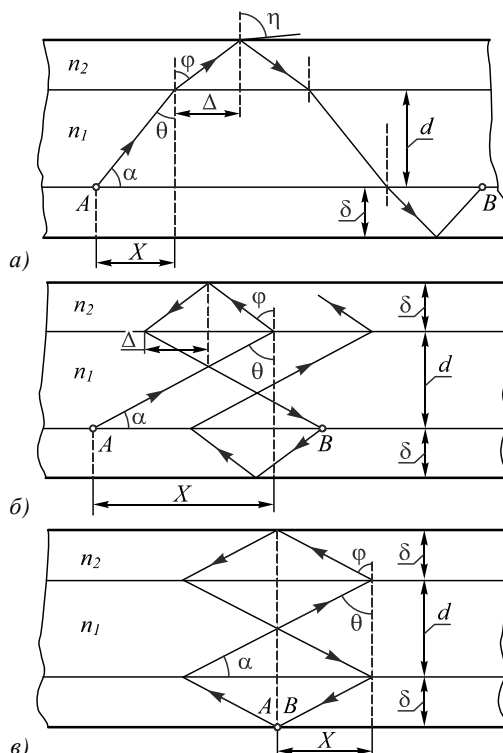


Рис. 1. Ход лучей в структуре оптического волновода с оболочкой оптической среды с положительным показателем преломления (а), метаматериала с отрицательным показателем преломления (б), метаматериала с отрицательным показателем преломления в режиме остановки движения светового луча в продольном направлении (в)

Произведение соотношений (1) и (2) приводит к уравнению:

$$\sin \theta / \sin \eta = 1 / n_1,$$

которое показывает, что выполнение условия полного внутреннего отражения ($\eta \rightarrow \pi/2$) зависит только от параметров центрального слоя и от параметров внешней среды $\theta_{cr} = \arcsin 1/n_1$. Для канализации луча в области волновода необходимо обеспечить ввод излучения в волновод под углом $\alpha < \arccos(1/n_1)$ к оси волновода (рис. 1а).

Основные результаты

Смещение луча вдоль оси волновода за счёт оболочки на поверхности волновода при $n_2 > 0$ определяется соотношением Δ/δ (рис. 1а). Откуда

$$\Delta = \delta \cos \alpha / \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \cos^2 \alpha}, \tag{3}$$

где угол падения луча относительно оси волновода $\alpha < \alpha_{cr} = \arccos(1/n_1)$. Зависимость параметра смещения луча Δ/δ вдоль оси волновода (нормированного на толщину плёнки) от угла падения на границу раздела сред для различных соотношений показателей преломления сред n_1/n_2 ($n_2 > 0$) показана на рис. 2. Относительная величина смещения луча по отношению к толщине слоя метаматериала Δ/δ резко возрастает при приближении угла падения к углу полного внутреннего отражения на границе раздела волновода и оболочки. Для угла между

лучом и осью структуры условие полного внутреннего отражения принимает вид: $\cos \alpha = n_1/n_2$.

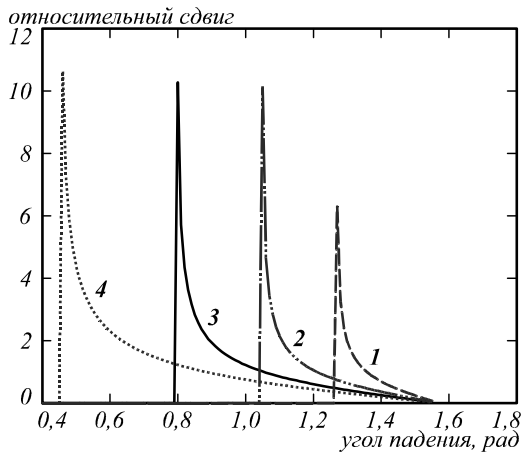


Рис. 2. Зависимость смещения луча вдоль оси волновода от угла падения для различных оболочек $n_1 = 1,5$ (кривая 1 – $n_2 = 1,1$; 2 – $n_2 = 1,2$; 3 – $n_2 = 1,3$; 4 – $n_2 = 1,4$)

Величина смещения луча Δ уменьшается при увеличении отношения показателей преломления оболочки и волновода n_1/n_2 , линейно растёт при увеличении толщины оболочки δ , зависит от угла ввода излучения в оптическое волокно и может существенно превышать толщину оболочки ($\Delta \gg \delta$). Время прохождения луча вдоль оси волновода при нанесении оболочки на поверхность волновода существенно зависит от характера преломления света на границе волновода. На рис. 1б, в показан ход лучей в структуре с отрицательным ($n_2 < 0$) показателем преломления оболочки. Время прохождения луча в волноводе на участке AB составляет $\tau_{AB} = 2\tau_x + 4\tau_\Delta$, где τ_x – время прохождения лучом расстояния x вдоль оси волновода, τ_Δ – время прохождения лучом расстояния Δ вдоль оси волновода в оболочке. Таким образом, время возрастает за счёт прохождения оболочки на $4\tau_\Delta$. Длина участка AB равна $2x + 4\Delta$, где $\Delta > 0$ при $n_2 > 0$ (оболочка – оптически положительная среда (рис. 1а)) и $\Delta < 0$ при $n_2 < 0$ (оболочка – оптически отрицательная среда). Общее время прохождения света вдоль оси волновода для произвольного участка L для волнопроводов с оболочкой оптически положительных и оптически отрицательных сред различается и определяется соотношением:

$$\tau_{\pm} = (L/(2x \pm 4\Delta))(2\tau_x + 4\tau_\Delta) = \left[Ln_1 \left(\frac{1}{\sin \alpha} + 2 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 f \right) \right] / \left(c \cdot \cos \alpha \cdot \left(\frac{1}{\sin \alpha} \pm 2f \right) \right),$$

где

$$f = \delta d^{-1} / \sqrt{(n_2 n_1^{-1})^2 - \cos^2 \alpha}.$$

Знаки плюс соответствуют оболочкам с оптически положительной средой, минус – оболочкам из метаматериалов (оптически отрицательными средами).

На рис. 3 показана зависимость времени прохождения луча от угла падения при положительном и отрицательном показателях преломления оболочки.

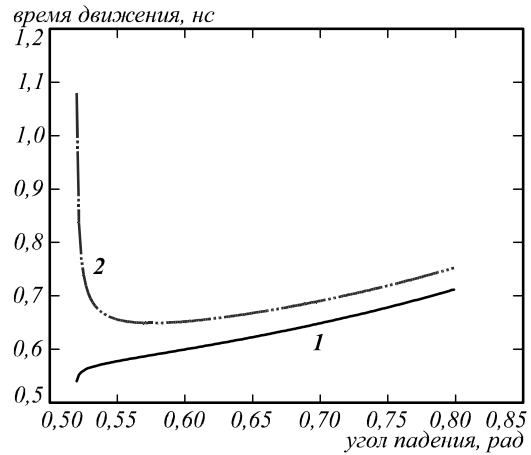


Рис. 3. Зависимость времени прохождения волны через волновод единичной длины в зависимости от угла ввода излучения в волновод для оптически положительного (1) и оптически отрицательного (2) материала оболочки ($\delta/d = 0,01$, $n_1 = 1,5$, 1 – $n_2 = 1,3$; 2 – $n_2 = -1,3$)

На рис. 1в показан случай, когда смещение x луча вдоль оси волновода в области волновода (2) компенсируется смещением луча в оболочке (1) в противоположном направлении $x = 2|\Delta|$ (при $n_1 < 0$). В этом случае время прохождения луча участка L (время задержки) растёт неограниченно $\tau \rightarrow \infty$. Условие реализации этого случая имеет вид:

$$2f \sin \alpha = 1.$$

Отсюда можно получить, что условием «остановки» луча вдоль оси волновода является ввод луча в волновод под углом

$$\alpha = \arccos \sqrt{((2\delta/d)^2 - (n_2/n_1)^2) / ((2\delta/d)^2 - 1)}.$$

На рис. 4 показана зависимость критического угла ввода излучения α_{cr} от относительной толщины оболочки δ/d при различных соотношениях показателей преломления волновода и оболочки n_1/n_2 .

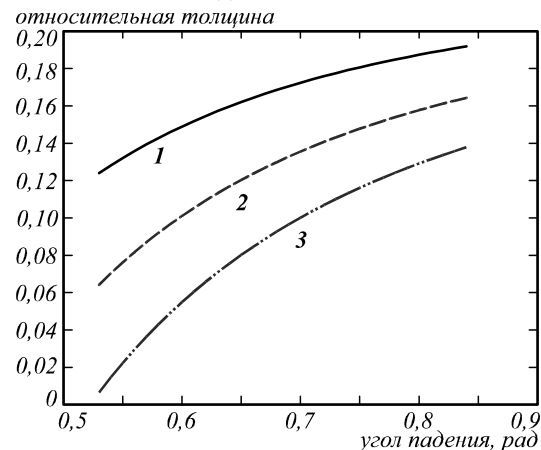


Рис. 4. Зависимость параметра относительной толщины пленки δ/d от угла ввода света в оптическую среду $n_1 = 1,5$ (1 – $n_2 = -1,4$; 2 – $n_2 = -1,35$, 3 – $n_2 = -1,3$), при котором обеспечивается условие остановки луча вдоль оси волновода

Отметим, что изменение знака показателя преломления n_2 может привести к изменению знака скорости

перемещения луча вдоль оси волнонаправляющей структуры с оболочкой из метаматериала при $\alpha \geq \alpha_{cr}$:

$$v = (x \pm 2\Delta)/(\tau_x + 2\tau_\Delta) = c/n_1 \times (\cos \alpha \times \\ \times (1/\sin \alpha \pm 2f))/(1/\sin \alpha + 2(n_2/n_1)^2 f)).$$

Заключение

Использование метаматериалов в оптических волнонаправляющих структурах позволяет существенно изменить характер распространения волн, в частности, достичь существенного уменьшения скорости распространения света в волноводе, вплоть до изменения направления движения. Полученные результаты показывают одну из возможностей новых сред в создании новых функциональных элементов интегральной и волоконной оптики и могут лечь в основу создания одного из направлений электродинамики метаструктур.

Литература

1. **Heinze, G.** Stopped Light and Image Storage by Electromagnetically Induced Transparency up to the Regime of One Minute / G. Heinze, C. Hubrich, T. Halfmann // *Physical Review Letters*. – 2013. – Vol. 111, Issue 3. – 033601. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.033601.
2. **Rui, Y.** Realization of "Trapped Rainbow" in 1D slab waveguide with Surface Dispersion Engineering / Y. Rui, Zhu Wenkan, Li Jingjing // *arXiv:1410.8196*. – 2014. – Vol. 1(10). – P. 1-11. – DOI: 10.1364/OE.23.006326.
3. **Musorin, A.I.** Ultrafast Faraday Rotation of Slow Light / I. Musorin, M.I. Sharipova, T. Dolgova, M. Inoue, A. Fedyanin // *Physical Review Applied*. – 2016. – Vol. 6, Issue 2. – 024012. – DOI: 10.1103/PhysRevApplied.6.024012.
4. **Hau, L.V.** Light speed reduction to 17 meters per second in an ultracold atomic gas / S. Harris, Z. Dutton, C. Behroozi // *Nature*. – 1999. – Vol. 397. – P. 594-598. – DOI: 10.1038/1756.
5. **Wu, P.** Controllable Snail-Paced Light in Biological Bacteriorhodopsin Thin Film / P. Wu, N. Rao // *Physical Review Letters*. – 2005. – Vol. 95, Issue 25. – 253601. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.253601.
6. **Александров, Е.Б.** В погоне за «медленным светом» / Е.Б. Александров, В.С. Запасский // *Успехи физических наук*. – 2006. – Т. 176, № 10. – С. 1093-1102. – DOI: 10.3367/UFNr.0176.200610f.1093.
7. **Matsko, A.B.** On the dynamic range of optical delay lines based on coherent atomic media / A.B. Matsko, D.V. Strekalov, L. Maleki // *Optics Express*. – 2005. – Vol. 13, Issue 6. – P. 2210-2223. – DOI: 10.1364/OPEX.13.002210.
8. **Майер, В.В.** Полное внутреннее отражение света / В.В. Майер. – М.: Физматлит, 2007. – 112 с. – ISBN: 978-5-9221-0657-3.
9. Дифракционная нанофотоника / А.В. Гаврилов, Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, П.Н. Дьяченко, А.А. Ковалёв, В.В. Котляр, А.Г. Налимов, Д.В. Нестеренко, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина, Я.О. Шуупова, под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2011. – 680 с. – ISBN: 978-5-9221-1237-6.
10. **Bliokh, K.Y.** Goos-Hänchen and Imbert-Fedorov beam shifts: An overview / K.Y. Bliokh, A. Aiello // *Journal of Optics*. – 2013. – Vol. 15(1). – 014001. – DOI: 10.1088/2040-8978/15/1/014001.
11. **Valentine, J.** Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index / J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D. Genov, G. Bartal, X. Zhang // *Nature*. – 2008. – Vol. 455. – P. 376-379. – DOI: 10.1038/nature07247.
12. **Веселаго, В.Г.** Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ / В.Г. Веселаго // *Успехи физических наук*. – 1967. – Т. 92, Вып. 7. – С. 517-526. – DOI: 10.3367/UFNr.0092.196707d.0517.
13. **Глушенко, А.Г.** Стимулированная прозрачность запердельных структур с активными средами / А.Г. Глушенко, Е.П. Захарченко. – LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 186 с. – ISBN: 978-3-8443-5745-5.
14. **Егоров, А.В.** Использование связанных фотонно-кристаллических резонаторов для повышения чувствительности оптического датчика. / А.В. Егоров, Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 158-162. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-158-162.
15. **Налимов, А.Г.** Острая фокусировка света планарной градиентной микролинзой / А.Г. Налимов, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 135-140. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-135-140.
16. **Харитонов, С.И.** Решение обратной задачи фокусировки лазерного излучения в плоские области в рамках геометрической оптики / С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 439-450. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-439-450.
17. **Головастиков, Н.В.** Резонансные дифракционные решетки для дифференцирования оптических импульсов в пропускании и отражении / Н.В. Головастиков, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович, В.А. Сойфер // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 138-145.
18. **Завершинский, Д.И.** Параметрическое взаимодействие сонаправленных магнитоакустической и альфвеновской волн в условиях магнитоакустической неустойчивости / Д.И. Завершинский, Н.Е. Молевич // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 410-414.
19. **Kirby, E.I.** FDTD analysis of slow light propagation in negative-refractive-index metamaterial waveguides / E.I. Kirby, J.M. Hamm, K.L. Tsakmakidis, O. Hess // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2009. – Vol. 11, № 11. – 114027. – DOI: 10.1109/ICMMT.2008.4540775.
20. **Jiang, T.** Stopping light by an air waveguide with anisotropic metamaterial cladding / T. Jiang, J. Zhao, Y. Feng // *Optics Express*. – 2009 – Vol. 17, Issue 1. – P. 170-177. – DOI: 10.1364/OE.17.000170.
21. **Jiang, T.** Light trapper by tapered air core in anisotropic metamaterial / T. Jiang, J. Zhao, Y. Feng // *International Workshop on Metamaterials 2008*. – 2008. – P. 363-365. – DOI: 10.1109/META.2008.4723615.
22. **Вендик, И.Б.** Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) / И.Б. Вендик, О.Г. Вендик // *Журнал технической физики*. – 2013. – Т. 83, Вып. 1. – С. 3-28.

Сведения об авторах

Глушенко Александр Григорьевич, доктор физико-математических наук (ИРЭ РАН, 1991), профессор (1993), действительный член Академии телекоммуникаций (1996), Российской Академии естествознания (2008), Европейской академии естествознания (2005), Мастер связи РФ (1996), Почетный работник Высшей школы РФ

(2010). С 1996 по 2012 г. декан факультета базового телекоммуникационного образования, с 1992 г. заведующий кафедрой физики Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). В списке научных работ более 150 статей, 4 монографии, 10 патентов, учебные пособия. Область научных интересов – физические проблемы построения инфо- и телекоммуникационных систем, электродинамика нелинейных композитных структур с анизотропными, нестационарными параметрами, электродинамика субволновых структур, наноструктур, электродинамика, оптика и акустика невязимных структур. E-mail: gag646@yandex.ru.

Глущенко Евгения Павловна, окончила Поволжскую государственную академию телекоммуникаций и информатики (2005). Кандидат физико-математических наук (2011), доцент кафедры физики Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). В списке научных работ 35 статей, 3 монографии, 4 учебных пособия. Область научных интересов – физические проблемы построения инфо- и телекоммуникационных систем, электродинамика, акустика субволновых невязимных структур. E-mail: gag646@yandex.ru.

ГРНТИ: 29.31.15.

Поступила в редакцию 20 декабря 2016 г. Окончательный вариант – 21 февраля 2017 г.

THE USE OF METAMATERIALS TO CONTROL THE SPEED OF LIGHT PROPAGATION IN OPTICAL STRUCTURES

A.G. Glushchenko¹, E.P. Glushchenko¹

¹ Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

Abstract

In the article we show in the geometric approximation the possibility of slowing down the light propagating along the axis of an optical waveguide structure by using metamaterials as optical structure elements. We study features of light propagation using a plane model of a fiber optic line whose cladding material has a negative refractive index. It is shown that by introducing a metamaterial, the propagation of light waves in the structure can be changed so that the light is decelerated along the structure axis to the extent that it stops, before starting to propagate in the opposite direction. We derive relationships for calculating the delay time as a function of geometrical and optical parameters of the structure, relationships for calculating critical parameters, and conditions for stopping the light.

Keywords: optical waveguide, metamaterial, delay time.

Citation: Glushchenko AG, Glushchenko EP. The use of metamaterials to control the speed of light propagation in optical structures. *Computer Optics*. 2017; 41(2): 202-207. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-202-207.

References

- [1] Heinze G, Hubrich C, Halfmann T. Stopped Light and Image Storage by Electromagnetically Induced Transparency up to the Regime of One Minute. *Phys Rev Lett* 2013; 111(3): 033601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.033601.
- [2] Rui Y. Realization of "Trapped Rainbow" in 1D slab waveguide with Surface Dispersion Engineering. *arXiv:1410.8196* 2014; 1(10): 1-11. DOI: 10.1364/OE.23.006326.
- [3] Musorin AI, Sharipova MI, Dolgova TV, Inoue M, Fedyanin AA. Ultrafast Faraday Rotation of Slow Light. *Phys Rev Applied* 2016; 6(2): 024012. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.6.024012.
- [4] Hau LV, Harris SE, Dutton Z, Behroozi CH. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas. *Nature* 1999; 397: 594-598. DOI: 10.1038/1756.
- [5] Wu P, Rao DV. Controllable Snail-Paced Light in Biological Bacteriorhodopsin Thin Film. *Phys Rev Lett* 2005; 95(25): 253601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.253601.
- [6] Alexandrov EB, Zapasskii VS. Chasing "slow light". *Phys Usp* 2006; 49(10): 1067-1075. DOI: 10.1070/PU2006v049n10ABEH006056.
- [7] Matsko AB, Strekalov DV, Maleki L. On the dynamic range of optical delay lines based on coherent atomic media. *Opt Express* 2005; 13(6): 2210-2223. DOI: 10.1364/OPEX.13.002210.
- [8] Mayer VV. Total internal reflection of light [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2007.
- [9] Soifer VA, ed. Diffraction nanophotonics [in Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2011. ISBN: 978-5-9221-1237-6.
- [10] Bliokh KY, Aiello A. Goos-Hänchen and Imbert-Fedorov beam shifts: An overview. *J Opt* 2013; 15(1): 014001. DOI: 10.1088/2040-8978/15/1/014001.
- [11] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, Ulin-Avila E, Genov D, Bartal G, Zhang X. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index. *Nature* 2008; 455: 376-379. DOI: 10.1038/nature07247.
- [12] Veselago, V.G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ / V. G. Veselago // *Sov Phys Usp* 1968; 10: 509-514. DOI: 10.1070/PU1968v010n04ABEH003699.
- [13] Glushchenko AG, Zakharchenko EP. Stimulated transparency exorbitant structures with active environment [In Russian]. LAP Lambert Academic Publishing; 2011. ISBN: 978-3-8443-5745-5.
- [14] Egorov AV, Kazanskiy NL, Serafimovich PG. Using coupled photonic crystal cavities for increasing of sensor sensitivity. *Computer Optics* 2015; 39(2): 158-162. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-158-162.

- [15] Nalimov AG, Kotlyar VV. Sharp focusing of light using a planar gradient microlens. *Computer Optics* 2016; 40(2): 135-140. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-135-140.
- [16] Kharitonov SI, Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Solving the inverse problem of focusing laser radiation in a plane region using geometrical optics. *Computer Optics* 2016; 40(4): 439-450. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-439-450.
- [17] Golovastiko NV, Bykov DA, Doskolovich LL, Soifer VA. Resonant diffraction gratings for differentiation of optical signals in reflection and transmission. *Computer Optics* 2013; 37(2): 138-145.
- [18] Zavershinsky D.I., Molevich N.E. Parametrical interaction of codirectional magnetoacoustic and alfvén waves at magnetoacoustic instability. *Computer Optics* 2013; 37(4): 410-414.
- [19] Kirby EI, Hamm JM, Tsakmakidis KL, Hess O. FDTD analysis of slow light propagation in negative-refractive-index metamaterial waveguides. *J Opt A: Pure Appl Opt* 2009; 11(11): 114027. DOI: 10.1109/ICMMT.2008.4540775.
- [20] Jiang T, Zhao J, Feng Y. Stopping light by an air waveguide with anisotropic metamaterial cladding. *Opt Express* 2009; 17(1): 170-177. DOI: 10.1364/OE.17.000170.
- [21] Jiang T, Zhao J, Feng Y. Light trapper by tapered air core in anisotropic metamaterial. *International Workshop on Metamaterials* 2008: 363-365. DOI: 10.1109/ME-TA.2008.4723615.
- [22] Vendik IB, Vendik OG. Metamaterials and their application in microwaves: A Review. *Technical Physics* 2013; 83(1): 1-24.

Authors' information

Alexander Grigorievich Glushchenko, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (IRE RAS, 1991), Professor (1993), member of the Academy of Telecommunications (1996), the Russian Academy of Natural Sciences (2008), the European Academy of Natural Sciences (2005), Russian Master of Communication (1996), Honorary worker of Higher school (2010). From 1996 to 2012 Dean of Education of Basic Telecommunications Faculty, since 1992 Head of Physics department of the Volga State University of Telecommunications and Informatics (PGUTI). Research interests – physical problems of building info- and telecommunication systems, nonlinear electrodynamics of composite structures with anisotropic, non-stationary parameters electrodynamics subwavelength structures, nanostructures, optics, acoustics non-reciprocal structures. E-mail: gag646@yandex.ru.

Eugene Pavlovna Glushchenko, graduated from the Volga State Academy of Telecommunications and Informatics in 2005 (PGATI). Candidate of Physical and Mathematical Sciences (2011), assistant professor of physics of the Volga State University of Telecommunications and Informatics (PGUTI). The list of scientific works 30 articles, 2 monographs, 4 textbooks. Research interests – physical problems of building info- and telecommunication systems, electrodynamics, acoustics non-reciprocal subwavelength structures. E-mail: gag646@yandex.ru.

Received December 20, 2016. The final version – February 21, 2017.
