

Суперструктурированные адресные волоконные брэгговские структуры

Б.И. Валеев¹, Р.А. Макаров¹, Т.А. Аглиуллин¹, А.Ж. Сахабутдинов¹, О.Г. Морозов¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

Аннотация

Представлены результаты теоретического исследования возможностей многоадресных волоконно-оптических брэгговских структур, сформированных на базе комбинации массива из однородных слабоотражающих волоконных решеток Брэгга и специально структурированных дискретных фазовых сдвигов. Исследование проведено на основе математического аппарата матриц рассеяния и передачи. Полученные решения открывают новые перспективы для интеграции многоадресных волоконно-оптических брэгговских структур в устройства радиوفотоники и волоконно-оптические сенсорные системы, обеспечивая формирование нового класса как радиофотонных устройств, так и базовых пассивных оптических элементов. Рассмотренные в работе многоадресные брэгговские структуры одновременно выполняют роль как формирователей радиофотонного излучения, так и чувствительных элементов, что обеспечивает выполнение ключевых требований, предъявляемых к компонентам радиофотонных систем в целом. Приведены принципы управления спектральными характеристиками многоадресных систем данного класса.

Ключевые слова: волоконные брэгговские решетки, адресные волоконные брэгговские структуры, многоадресные волоконные брэгговские структуры.

Цитирование: Валеев, Б.И. Суперструктурированные адресные волоконные брэгговские структуры / Б.И. Валеев, Р.А. Макаров, Т.А. Аглиуллин, А.Ж. Сахабутдинов, О.Г. Морозов // Компьютерная оптика. – 2025. – Т. 49, № 3. – С. 399-405. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1529.

Citation: Valeev BI, Makarov RA, Agliullin TA, Sakhabutdinov AZ, Morozov OG. Superstructured addressed fiber Bragg structures. Computer Optics 2025; 49(3): 399-405. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1529.

Введение

Волоконные брэгговские структуры являются одним из основных элементов как волоконно-оптических линий связи, так и волоконных сенсорных систем [1 – 4]. Параллельно с повышением эффективности в волоконно-оптические сенсорные системы начали активно интегрироваться принципы радиопотоники, способствуя формированию нового класса радиофотонных сенсорных систем и устройств [5, 6]. А в качестве базовых пассивных оптических элементов радиофотонных сенсорных сетей предложены адресные волоконные брэгговские структуры [7 – 9]. Главное требование к адресным волоконным брэгговским структурам совпадает с требованием радиопотоники, которое заключается в том, чтобы оптический отклик от них содержал как минимум две узкополосные компоненты в оптическом диапазоне, разностная частота между которыми находится в радиочастотной области спектра [10, 11]. Это позволяет адресным волоконным брэгговским структурам одновременно быть как формирователем радиофотонного излучения, так и чувствительным элементом. Неизменность разностной частоты адресных брэгговских структур при наложении физических полей и общем смещении их спектра по частоте позволяет использовать их в качестве чувствительных элемен-

тов радиофотонных сенсорных систем [12 – 14]. Это придает радиофотонным сенсорным системам на адресных волоконных брэгговских структурах одно из ключевых значений в решении научно-технических задач в области оптики [15 – 18].

Известно два основных подхода к формированию адресных волоконных брэгговских структур с инвариантной разностной частотой между ее частотными компонентами при наложении физических полей [19, 20]. Первым подходом является изготовление волоконной брэгговской решетки (ВБР) с двумя симметричными фазовыми сдвигами (2π -ВБР), а вторым – использование двух идентичных сверхузкополосных волоконных брэгговских решеток, разнесенных по длине волны (2λ -ВБР). Ранее показана принципиальная возможность формирования и мультиплексирования различного количества сенсоров на основе адресных брэгговских структур этих типов.

Классическая адресная брэгговская структура, работающая на пропускание (2π -ВБР), может быть сформирована путем внесения в структуру равномерной волоконной брэгговской решетки двух дискретных фазовых сдвигов, а вся структура представляет собой три идентичные по периоду и наведенному показателю преломления однородные волоконные брэгговские решетки, разделенные между собой участками оптического волокна, длина которых совпадает с половиной периода решетки. Изменение длин одно-

родных участков позволяет управлять радиопотонным адресом такой структуры.

В работе поставлена задача на основе математического аппарата матриц рассеяния и передач исследовать теоретические возможности формирования одно- и многоадресных волоконных брэгговских структур путем комбинации конечного числа однородных слабоотражающих волоконных решеток Брэгга (СВРБ) и особым образом задаваемых дискретных фазовых интервалов между ними.

1. Математический аппарат матриц рассеяния и передач

Спектральный отклик, сформированный от периодической структуры и/или однородного участка волокна, описывается с использованием теории и техники матриц рассеяния и передачи [21–24]. Достоверность результатов данного метода моделирования была неоднократно подтверждена как с использованием других расчетных моделей, так и на практике. Так, в статье [22] было проведено сравнение результатов моделирования спектрального отклика ВБР, полученных методом матриц рассеяния и передачи и методом однородных слоев (коэффициентов прохождения и отражения каждого слоя), а также полученных в специализированном коммерческом программном пакете Optiwave OptiGrating. При этом было показано, что расхождения при моделировании различными методами составляли доли процента.

Распространение света через слоистую структуру, состоящую из однородных сплошных сред или волоконных брэгговских решеток, моделируется в виде произведения матриц передач по следующему алгоритму:

1. Для каждого однородного участка волоконной брэгговской решетки и скачка показателя преломления сплошной среды строятся соответствующие матрицы рассеяния:

(а) для сплошной среды:

$$\mathbf{S}^{\text{SL}}(\lambda, \varepsilon, \mu, h) = \begin{bmatrix} 0 & \exp(-j\gamma h) \\ \exp(-j\gamma h) & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где h – длина однородного участка; γ – параметр затухания:

$$\gamma(\lambda, \varepsilon, \mu) = \frac{2}{\pi} \sqrt{\text{Re}(\varepsilon)\text{Re}(\mu)} \times \left[\sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{\text{Im}(\varepsilon)}{\text{Re}(\varepsilon)} \right)^2} + 1} - j \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{\text{Im}(\varepsilon)}{\text{Re}(\varepsilon)} \right)^2} - 1} \right],$$

где ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды;

- (б) для однородной волоконной брэгговской решетки:

$$\mathbf{S}^{\text{FBG}}(\lambda, n_0, \Delta n, \Lambda) =$$

$$= \begin{bmatrix} \cosh(\gamma h) - j \frac{\Delta\beta}{\gamma} \sinh(\gamma h) & -j \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma h) \\ \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma h) & \cosh(\gamma h) + j \frac{\Delta\beta}{\gamma} \sinh(\gamma h) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где h – длина однородной волоконной брэгговской решетки; γ , $\Delta\beta$ и κ :

$$\gamma = \sqrt{|\kappa|^2 - \Delta\beta^2}, \Delta\beta = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda},$$

$$\kappa = \pi \frac{\Delta n}{2\lambda}, n_{\text{eff}} = n_0 + \frac{\Delta n}{2},$$

где n_{eff} – эффективный показатель преломления ВРБ; Λ – период ВРБ; Δn – наведенный показатель преломления ВРБ; n_0 – показатель преломления сердцевины оптического волокна; λ – длина волны;

(с) для скачка диэлектрической проницаемости сплошной среды:

$$\mathbf{S}^{\text{J}}(\varepsilon_1, \mu_1, \varepsilon_2, \mu_2) = \frac{1}{\sqrt{\mu_1/\varepsilon_1} + \sqrt{\mu_2/\varepsilon_2}} \times \begin{bmatrix} \sqrt{\mu_2/\varepsilon_2} - \sqrt{\mu_1/\varepsilon_1} & 2\sqrt{\mu_1\mu_2/\varepsilon_1\varepsilon_2} \\ 2\sqrt{\mu_1\mu_2/\varepsilon_1\varepsilon_2} & \sqrt{\mu_1/\varepsilon_1} - \sqrt{\mu_2/\varepsilon_2} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где μ_1 , μ_2 , ε_1 , ε_2 – магнитные и диэлектрические проницаемости сред.

2. Каждая матрица рассеяния преобразуется в соответствующую ей матрицу передачи:

$$\mathbf{T}^i = \frac{1}{S_{2,1}^i} \begin{bmatrix} S_{2,1}^i \cdot S_{1,2}^i - S_{1,1}^i \cdot S_{2,2}^i & S_{1,1}^i \\ -S_{2,2}^i & 1 \end{bmatrix}.$$

3. Матрицы передачи перемножаются между собой в той последовательности, в которой располагаются участки прохождения излучения:

$$\mathbf{T} = \prod_i \mathbf{T}^i.$$

4. На основании результирующей матрицы передачи восстанавливается матрица рассеяния:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{T_{2,2}} \begin{bmatrix} T_{1,2} & T_{1,1} \cdot T_{2,2} - T_{1,2} \cdot T_{2,1} \\ 1 & T_{2,1} \end{bmatrix}.$$

Элемент матрицы рассеяния $S_{1,1}$ отражает зависимость коэффициента отражения всей структуры при направлении излучения со стороны левого входа; $S_{2,2}$ – со стороны правого входа; элементы $S_{1,2}$ и $S_{2,1}$ являются коэффициентами прохождения излучения при направлении излучения со стороны левого и правого входов соответственно. Предложенный математический аппарат позволяет получить спектр отражения волоконных брэгговских структур с введенными в них фазовыми неоднородностями ϕ , которые моде-

лируются матрицами (1) в виде участков сплошной среды протяженностью $h_\phi = \phi \cdot \Lambda / (2 \cdot \pi)$. Матрица передачи структуры, состоящей из последовательности однородных СВРБ с фазовыми сдвигами между ними, описывается матрицей передачи комбинированной структуры путем последовательного перемножения матриц передачи однородных участков волоконных брэгговских решеток и участков сплошной среды.

2. Массив СВРБ с постоянными фазовыми сдвигами

Рассмотрим периодическую структуру, состоящую из СВРБ и фазовых интервалов между, каждая СВРБ имеет длину L , а фазовые сдвиги между ними – оптическую длину ϕ . Схема представлена на рис. 1.

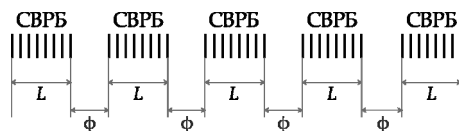


Рис. 1. Схема структуры из массива СВРБ с постоянными фазовыми сдвигами между ними

При фазовом сдвиге, соответствующем половине периода решетки, $\phi = \pi$ такая структура формирует спектральный отклик в виде периодической последовательности пиков отражения (рис. 2), разнесенных на разностную частоту – Ω , называемую адресной.

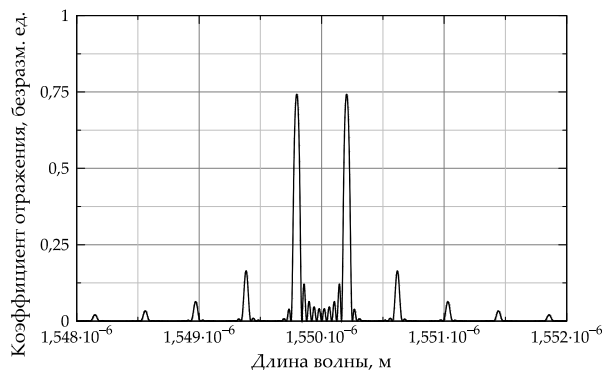


Рис. 2. Спектр отражения массива при длине СВРБ $L = 2$ мм, количестве решеток $N = 10$ и $n_{\text{eff}} = 1,45871$

Разность длин волн $\Delta\lambda$ между двумя последовательными максимумами спектра отражения структуры обратно пропорциональна длине одиночной СВРБ и может быть оценена согласно [25]:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_B^2}{2n_{\text{eff}}L}, \quad (4)$$

где λ_B – центральная длина волны однородного участка решетки; n_{eff} – эффективный показатель преломления СВРБ.

Адресная частота Ω однозначно связана с разностной длиной волны $\Delta\lambda$ и может быть выражена как:

$$\Omega = \frac{c}{2n_{\text{eff}}L} \cdot \frac{(f_B - \Omega)(f_B + \Omega)}{f_B^2}, \quad (5)$$

где c – скорость света в вакууме; f_B – частота, соответствующая центральной длине волны однородного участка решетки.

Можно показать, что второй множитель в (5) можно принять равным единице (с точностью до шести порядков) на всем диапазоне реальных адресных частот $0 < \Omega < 20$ ГГц (рис 3).

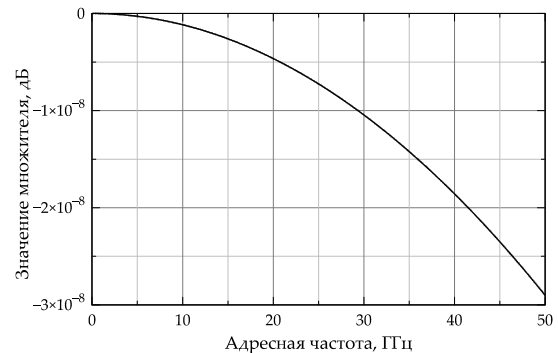


Рис. 3. Зависимость множителя $(f_B^2 - \Omega^2) / f_B^2$ от адресной частоты Ω

Следовательно, величину адресной частоты можно оценить как:

$$\Omega = \frac{c}{2n_{\text{eff}}L}. \quad (6)$$

Отношение адресных частот Ω / Ω_0 (адресная частота $\Omega_0 = 102,76$ ГГц взята при длине однородного участка решетки $L_0 = 1$ мм) в зависимости от изменения длины однородного участка СВРБ приведено на рис. 4.

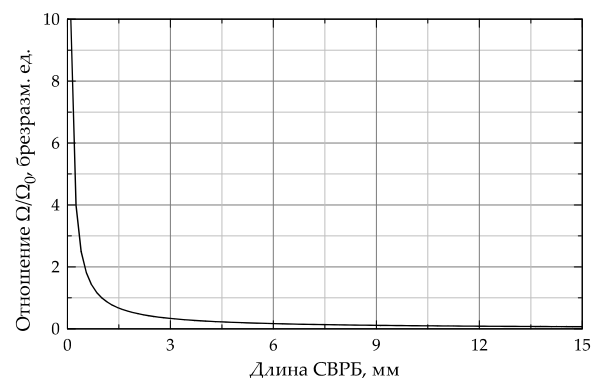


Рис. 4. Зависимость отношения адресных частот Ω / Ω_0 от длины L однородного участка СВРБ при $n_{\text{eff}} = 1,45871$

Увеличение длины однородного участка СВРБ (в k раз) влечет за собой кратное уменьшение адресной частоты Ω . Требование сохранения коэффициента отражения при этом влечет за собой требование к кратному (в k раз) увеличению длины всей структуры в целом.

Зависимость максимума коэффициента отражения структуры от изменения наведенного показателя преломления Δn СВРБ представлена на рис. 5.

Увеличение коэффициента отражения структуры с ростом наведенного показателя преломления Δn происходит тем быстрее, чем больше длина СВРБ.

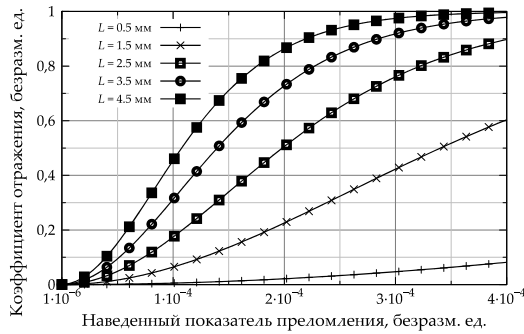


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения структуры от изменения наведенного показателя преломления Δn при $N=10$, $\phi=\pi$

3. Массив СВРБ со структурированными фазовыми сдвигами

Рассмотрим массив СВРБ со структурированными дискретными фазовыми сдвигами между ними в форме, показанной на рис. 6. Фигурными скобками на рисунке обозначены периодические структуры, внутри каждой из которой сформированы фазовые сдвиги ϕ_i с периодом t в виде последовательности:

$$\{\phi_i\} = \frac{2}{m} \cdot i, i = \overline{1, m}, m \in \mathbb{N}. \quad (7)$$

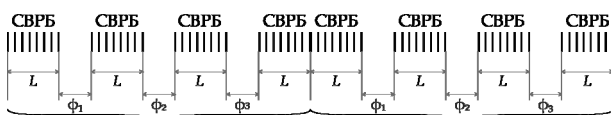


Рис. 6. Схема структуры из массива СВРБ с периодическими фазовыми сдвигами между ними при $m=4$

Структурирование фазовых сдвигов позволяеткратно уменьшить адресную частоту Ω при кратном увеличении m – количества участков интервала $[0; 2\pi]$, при сохранении параметров общей спектральной огибающей (рис. 7). Эквивалентность ϕ_i и $(\phi_i + 2\pi)$ обеспечивает выбор интервала дискретизации $[0; 2\pi]$ для построения последовательности $\{\phi_i\}$ при его разбиении на m участков.

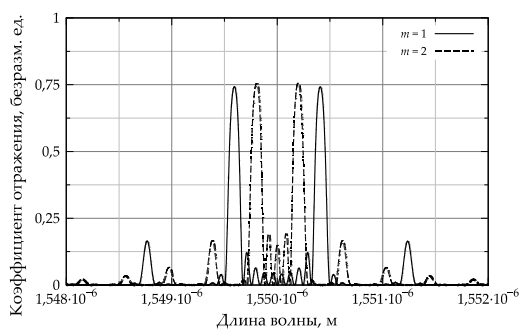


Рис. 7. Спектр отражения структуры из массивов СВРБ при $L=2$ мм, $n_{\text{eff}}=1,45871$, $N=10$, $m=1$ (сплошная) и $m=2$ (пунктирная) линия

Деление отрезка $[0; 2\pi]$ на m равных интервалов влечет уменьшение в m раз адресной частоты Ω структуры – рис. 8 (данные получены при $L_0=1$ мм и $m=5$, $\Omega_0=20,61$ ГГц), согласно (6), $\Omega_m=\Omega/m$.

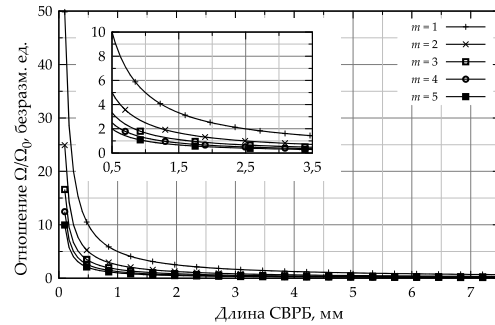


Рис. 8. Зависимость отношения адресных частот Ω/Ω_0 от длины СВРБ L при $n_{\text{eff}}=1,45871$

Увеличение числа интервалов m при фиксированном значении наведенного показателя преломления Δn ведет к снижению максимума коэффициента отражения структуры (рис. 9).

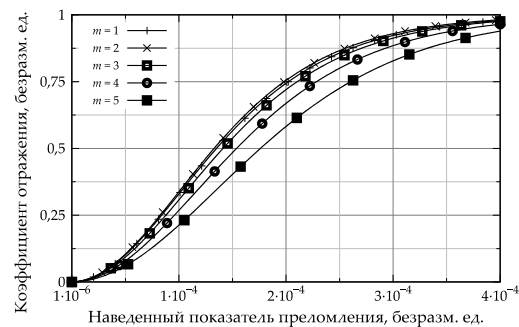


Рис. 9. Зависимость коэффициента отражения структуры от показателя преломления Δn при $N=10$, $L=1$ мм

Введение определяемых по (7) структурированных фазовых сдвигов в структуру массивов СВРБ позволяет: уменьшить адресную частоту Ω структуры в m раз при сохранении ее полной длины $N \cdot L$ (рис. 10); уменьшить полную длину $N \cdot L$ структуры в m раз при сохранении адресной частоты Ω между ее спектральными компонентами (рис. 11).

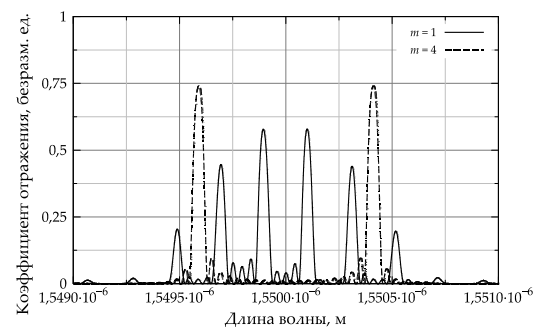


Рис. 10. Спектр отражения структуры из массивов СВРБ при $L=1$ мм, $n_{\text{eff}}=1,45871$, $N=20$, для $m=1$ (пунктирная) и $m=4$ (сплошная) линия

4. Температурная зависимость массива СВРБ

Зависимость спектральной характеристики массива СВРБ со структурированными фазовыми сдвигами в условиях изменения температуры исследовалась на основе модельной зависимости физической длины L ,

периода Λ , показателя преломления материала светонесущей части n и наведенного показателя преломления Δn , от температуры, согласно (8):

$$\begin{aligned} L &= L_0 \cdot (1 + k_E \cdot T), \Lambda = \Lambda_0 \cdot (1 + k_E \cdot T), \\ n &= n_0 \cdot (1 + k_O \cdot T), \Delta n = \Delta n_0 \cdot (1 + k_O \cdot T), \end{aligned} \quad (8)$$

где L_0 , Λ_0 , n_0 и Δn_0 – длина, период, показатель преломления и наведенный показатель преломления СВРБ при $T=0^\circ\text{C}$; k_E и k_O – температурный коэффициент линейного расширения и термооптический коэффициент оптического волокна.

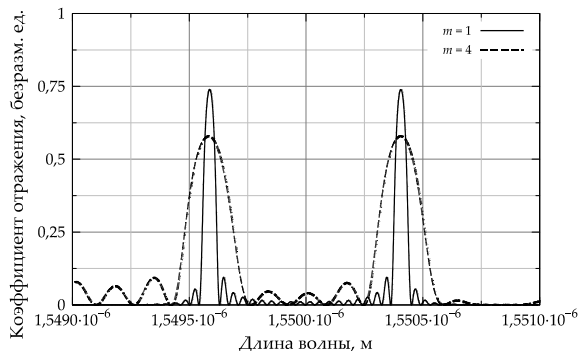


Рис. 11. Спектр отражения структуры из массивов СВРБ при $N=20$ для $L=1$ мм, $n_{\text{eff}}=1,45871$, $m=1$ (сплошная) и $L=0,25$ мм, $n_{\text{eff}}=1,45886$, $m=4$ (пунктирная) линия

Результаты моделирования спектра отражения структуры со структурированными фазовыми сдвигами при $T=-12^\circ\text{C}$, $T=0^\circ\text{C}$ и $T=12^\circ\text{C}$ представлены на рис. 12.

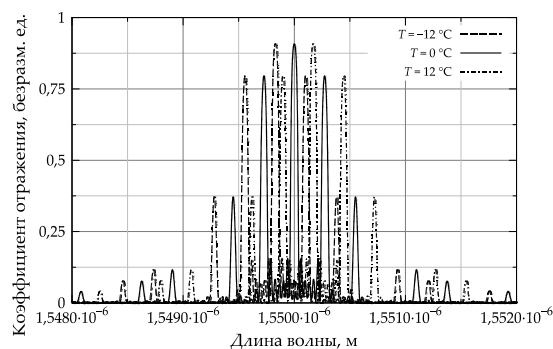


Рис. 12. Спектр отражения структуры из массивов СВРБ при $N=20$, $L=1$ мм, $n_{\text{eff}}=1,458735$, $m=3$, $k_E=0,55$ мкм/ $^\circ\text{C}$, $k_O=8,6 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$, $T=-12^\circ\text{C}$ (пунктирная), $T=0^\circ\text{C}$ (сплошная) и $T=12^\circ\text{C}$ (штрихпунктирная) линия

Увеличение температуры окружающей среды приводит к плоскопараллельному линейному смещению всей спектральной характеристики в область длинных волн, а уменьшение температуры — в область коротких волн. Одновременно с этим изменение температуры не влечет за собой изменения спектральной формы отклика и адресной частоты Ω в целом, что позволяет применять структурированные массивы СВРБ в качестве волоконно-оптических датчиков различных физических полей и компонентов радиофотоники с высокостабильными частотными характеристиками.

Заключение

Одно- и многоадресные волоконные брэгговские структуры, сформированные на основе комбинации слабоотражающих однородных брэгговских решеток и структурированных дискретных фазовых сдвигов, обладают значительным потенциалом для использования их в системах оптической передачи данных (частотное разделение каналов, избирательных фильтров) и волоконно-оптической сенсорики в качестве чувствительных элементов радиофотонных сенсорных систем.

Огибающая спектральной характеристики структуры в целом коррелирует со спектром отражения одиночной волоконной брэгговской решетки эквивалентной длины. Адресная частотаратно изменяется при изменении числа интервалов разбиения фазовых сдвигов.

Волоконные структуры на основе массива СВРБ позволяют использовать их в качестве генераторов оптической частотной гребенки с фиксированными высокостабильными параметрами, в задачах передачи данных, частотного разделения каналов (WDM- и AWG-фильтры с большой карантинной зоной между каналами) и особенно радиофотоники.

Отсутствие температурной зависимости формы спектрального отклика структуры в целом и ее адресной частоты в частности позволяет использовать такие структуры в качестве чувствительных элементов радиофотонных волоконно-оптических сенсорных систем для измерения характеристик различных физических полей.

Дальнейшие исследования будут посвящены практической реализации предложенных суперструктурированных адресных волоконных брэгговских структур, что может быть осуществлено интерферометрическими методами записи ВБР на основе интерферометров Ллойда или Тальбота, а также методами поточечной записи ВБР.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-79-10059. <https://rscf.ru/project/23-79-10059/>

References

- [1] Agrawal GP, Radic S. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing. IEEE Photonics Technol Lett 1994; 6(8): 995-997. DOI: 10.1109/68.313074.
- [2] Chan PKC, Jin W, Gong JM, Demokan NS. Multiplexing of fiber Bragg grating sensors using a FMCW technique. IEEE Photonics Technol Lett 1999; 11(11): 1470-1472. DOI: 10.1109/68.803082.
- [3] Wiberg A, Pérez-Millán P, Andrés MV, Hedekvist PO. Microwave-photonic frequency multiplication utilizing optical four-wave mixing and fiber Bragg gratings. J Lightw Technol 2006; 24(1): 329-334. DOI: 10.1109/JLT.2005.860164.

- [4] Allil RCSB, Werneck MMM, Ribeiro BA, de Nazaré FVB. Application of fiber Bragg grating sensors in power industry. In Book: Current trends in short- and long-period fiber gratings. Chap 7. London: IntechOpen; 2013. DOI: 10.5772/54148.
- [5] Capmany J, Novak V. Microwave photonics combines two worlds. Nat Photonics 2008; 1(6): 319-330. DOI: 10.1038/nphoton.2007.89.
- [6] Zou X, Lu B, Pan W, Yan L, Stöhr A, Yao J. Photonics for microwave measurements. Laser Photonics Rev 2016; 10: 711-734. DOI: 10.1002/lpor.201600019.
- [7] Dai B, Gao Z, Wang X, Kataoka N, Wada N. Performance comparison of $0/\pi$ - and $\pm\pi/2$ -phase-shifted superstructured Fiber Bragg grating encoder/decoder. Opt Express 2011; 19(13): 12248-12260. DOI: 10.1364/OE.19.012248.
- [8] Wang C, Yao J. Fiber Bragg gratings for microwave photonics subsystems. Opt Express 2013; 21(19): 22868-22884. DOI: 10.1364/OE.21.022868.
- [9] Morozov OG, Sakhabutdinov AJ. Addressed Fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems. Computer Optics 2019; 43(4): 535-543. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543.
- [10] Morozov O, Sakhabutdinov A, Anfinogentov V, Misbakhov R, Kuznetsov A, Agliullin T. Multi-addressed Fiber Bragg structures for microwave-photonic sensor systems. Sensors 2020; 20(9): 2693. DOI: 10.3390/s20092693.
- [11] Agliullin T, Il'in G, Kuznetsov A, Misbakhov R, Misbakhov R, Morozov G, Morozov O, Nureev I, Sakhabutdinov A. Overview of addressed Fiber Bragg structures' development. Photonics 2023; 10(2): 175. DOI: 10.3390/photonics10020175.
- [12] El-Gammal HM, El-Badawy ESA, Rizk MRM, Aly MH. A new hybrid FBG with a π -shift for temperature sensing in overhead high voltage transmission lines. Opt Quant Electron 2020; 52(1): 53. DOI: 10.1007/s11082-019-2171-7.
- [13] Deepa S, Das B. Interrogation techniques for π -phase-shifted fiber Bragg grating sensor: A review. Sens Actuators A: Phys 2020; 315: 112215. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112215.
- [14] Grattan KTV, Meggitt BT. Optical fiber sensor technology: Advanced applications – Bragg gratings and distributed sensors. New York: Springer Science+Business Media; 2000. ISBN: 978-1-4419-4999-8.
- [15] Tosi D, Poeggel S, Iordachita I, Schena E. Fiber optic sensors for biomedical applications. In Book: Alemohammad H, ed. Opto-mechanical fiber optic sensors. Ch 11. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2018. DOI: 10.1016/B978-0-12-803131-5.00011-8.
- [16] Morozov O, Tunakova Y, Hussein SMRH, Shagidullin A, Agliullin T, Kuznetsov A, Valeev B, Lipatnikov K, Anfinogentov V, Sakhabutdinov A. Addressed combined fiber-optic sensors as key element of multisensor greenhouse gas monitoring systems. Sensors 2022; 22(13): 4827. DOI: 10.3390/s22134827.
- [17] Pradhan S, Town GE, Grant KJ. Dual-wavelength DBR fiber laser. IEEE Photonics Technol Lett 2006; 18(16): 1741-1743. DOI: 10.1109/LPT.2006.880799.
- [18] Liu X, Gong Y, Wang L, Wang T, Zhang T, Lu K, Zhao W. Identical dual-wavelength Fiber Bragg gratings. J. Lightw Technol 2007; 25(9): 2706-2710. DOI: 10.1109/JLT.2007.902101.
- [19] Erdogan T. Fiber grating spectra. J Lightw Technol 1997; 15(8): 1277-1294. DOI: 10.1109/50.618322.
- [20] Kashyap R. Fiber Bragg gratings. Burlington: Academic Press; 2009. ISBN: 978-0-08-091991-1.
- [21] Ikhlef A, Hedara R, Chikh-Bled M. Uniform Fiber Bragg grating modeling and simulation used matrix transfer method. Int J Comput Sci 2012; 9(1): 368-374.
- [22] Agliullin T, Anfinogentov V, Morozov O, Sakhabutdinov A, Valeev B, Niyazgulyeva A, Garovov Y. Comparative analysis of the methods for Fiber Bragg structures spectrum modeling. Algorithms 2023; 16(2): 101. DOI: 10.3390/a16020101.
- [23] Ibsen M, Durkin MK, Laming RI. Chirped moire fiber gratings operating on two-wavelength channels for use as dual-channel dispersion compensators. IEEE Photonics Technol Lett 1998; 10(1): 84-86. DOI: 10.1109/68.651115.
- [24] Deng Y, Li M, Huang N, Zhu N. Ka-band tunable flat-top microwave photonic filter using a multi-phase-shifted Fiber Bragg grating. IEEE Photonics J 2014; 6(4): 1-8. DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2339327.
- [25] Kulishov M, Azaña J. Design of high-order all-optical temporal differentiators based on multiple-phase-shifted fiber Bragg gratings. Opt Express 2007; 15(10): 6152-6166. DOI: 10.1364/OE.15.006152.

Сведения об авторах

Валеев Булат Ильгизярович, 2001 рождения, студент Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева–КАИ. Область научных интересов: математическое моделирование, волоконно-оптические сенсорные системы, радиофотоника. E-mail: bivaleev@kai.ru

Макаров Роман Андреевич, 1999 года рождения, аспирант Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева–КАИ. Область научных интересов: искусственные нейронные сети, фотоника, обработка сигналов, информационные технологии. E-mail: makarovroma@stud.kai.ru

Аглиуллин Тимур Артурович, 1994 года рождения, окончил Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева–КАИ, кандидат технических наук. Работает доцентом кафедры радиофотоники и микроволновых технологий. Область научных интересов: волоконно-оптические датчики, радиофотоника. E-mail: taagliullin@kai.ru

Сахабутдинов Айрат Жавдатович, 1973 года рождения, окончил Казанский государственный университет (ныне Казанский (Приволжский) федеральный университет), доктор технических наук. Работает профессором кафедры радиофотоники и микроволновых технологий. Область научных интересов: микроволновая фотоника,

радиофотоника, волоконно-оптические датчики и системы их опроса, адресные и многоадресные волоконные брэгговские структуры, численные методы решения систем уравнений. E-mail: azhsakhabutdinov@kai.ru

Морозов Олег Геннадьевич, 1960 года рождения, окончил Казанский авиационный институт имени А.Н. Туполева (ныне — Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева–КАИ), доктор технических наук. Работает профессором кафедры радиофотоники и микроволновых технологий. Область научных интересов: радиофотоника, микроволновая, оптоэлектронная, фотонная, радиофотонная и квантовая сенсорика, радиофотонные высокоинтенсивные технологии. E-mail: ogmorozov@kai.ru

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 02 апреля 2024 г. Окончательный вариант — 18 июля 2024 г.

Superstructured addressable fiber Bragg structures

B.I. Valeev¹, R.A. Makarov¹, T.A. Agliullin¹, A.Z. Sakhabutdinov¹, O.G. Morozov¹

*¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI,
K. Marksa Str. 10, Kazan, 420111, Russia*

Abstract

We present results of a theoretical study of capabilities of multi-addressed fiber Bragg structures formed by combining an array of uniform low-reflection fiber Bragg gratings and specially structured discrete phase shifts. The research is based on the mathematical apparatus of scattering and transmission matrices. The obtained results provide new perspectives for the integration of multi-addressed fiber Bragg structures into radiophotonics devices and fiber-optic sensor systems, leading to a new class of both radiophotonic devices and basic passive optical elements. The multi-addressed Bragg structures investigated in this study simultaneously perform the role of radiophotonic beamformers and sensing elements, which ensures the implementation of key general requirements for the components of radiophotonic systems. We also present principles of controlling spectral characteristics of the multi-addressed systems of this type.

Keywords: fiber Bragg gratings, addressed fiber Bragg structures, multi-addressed fiber Bragg structures.

Citation: Valeev BI, Makarov RA, Agliullin TA, Sakhabutdinov AZ, Morozov OG. Superstructured addressed fiber Bragg structures. *Computer Optics* 2025; 49(3): 399-405. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1529.

Acknowledgements: This work was financially supported by the Russian Science Foundation under project No. 23-79-10059. <https://rscf.ru/project/23-79-10059/>

Author's information

Bulat Ilgizyarovich Valeev, (b. 2001), student of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI. Research interests: mathematical modeling, fiber-optic sensor systems, radiophotonics. E-mail: bivaleev@kai.ru

Roman Andreevich Makarov, (b. 1999), postgraduate student of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI. Research interests: artificial neural networks, photonics, signal processing, information technologies. E-mail: makarovroma@stud.kai.ru

Timur Arturovich Agliullin, (b. 1994), graduated from Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, Candidate of Sciences in Technology. Works as an associate professor at the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Research interests: fiber-optic sensors, radiophotonics. E-mail: taagliullin@kai.ru

Airat Zhavdatovich Sakhabutdinov, (b. 1973), graduated from Kazan State University (now — Kazan (Volga region) Federal University), Doctor of Sciences in Technology. Works as a professor at the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Research interests: radiophotonics, fiber-optic sensors and their interrogation systems, addressable and multicast fiber Bragg structures, numerical methods for solving systems of equations. E-mail: azhsakhabutdinov@kai.ru

Oleg Gennadievich Morozov, (b. 1960), graduated from the Kazan Aviation Institute named after A.N. Tupolev, Doctor of Sciences in Technology. Works as a professor at the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Research interests: radiophotonics, microwave, optoelectronic, photonic, radiophotonic and quantum sensorics, radiophotonic high-intensity technologies. E-mail: ogmorozov@kai.ru

Received April, 02 2024. The final version – July, 18 2024.
