

Моделирование спектральных характеристик многоадресных волоконных брэгговских структур с дискретными фазовыми сдвигами для обеспечения адаптивных процессов их голографической записи

А. А. Кузнецов

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

В работе представлены результаты исследования влияния геометрических и рефрактометрических параметров многоадресных волоконных брэгговских структур (МАВБС) с дискретными фазовыми сдвигами на их спектральные характеристики, полученные после записи голографическими методами. Исследование проводилось с использованием математической модели МАВБС, построенной методом матриц передач. Описано влияние длин однородных участков структуры, наведенного показателя преломления в процессе записи и величин его дискретных фазовых сдвигов на форму спектральной огибающей МАВБС. Выявленные закономерности могут быть использованы для создания интерференционных схем, масок и адаптивных технологических процессов записи структур с требуемыми спектральными характеристиками.

Ключевые слова: многоадресные волоконные брэгговские структуры, геометрические параметры, рефрактометрические параметры, математические модели, спектральные характеристики, голографические схемы записи.

Цитирование: Кузнецов, А. А. Моделирование спектральных характеристик многоадресных волоконных брэгговских структур с дискретными фазовыми сдвигами для обеспечения адаптивных процессов их голографической записи / А. А. Кузнецов // НОЛОЕХРО 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 235–242.

Введение

Сенсорные системы на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами датчиков, а именно малыми габаритами и весом, невосприимчивостью к электромагнитным и химическим воздействиям, отсутствием электрических цепей питания датчиков, возможностью проведения удаленных измерений, что обуславливает их востребованность во многих сферах промышленности. Однако наиболее существенным ограничением их широкого применения является сложность устройств опроса и мультиплексирования ВБР-датчиков [1]. Одним из факторов, осложняющих опрос массива ВБР, является отсутствие их адресности, что приводит к существенным ошибкам измерений при наложении спектров датчиков друг на друга.

Решением данной проблемы стало использование адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) [2–4], которые представляют собой особым образом структурированные ВБР с оптическим откликом, содержащим две сверхузкополосные оптические компоненты с разностной частотой, лежащей в радиочастотной области спектра. Разностная частота АВБС

остаётся неизменной при смещении центральной длины волны структуры в процессе измерения и называется её адресной частотой. Опрос (определение центральной длины волны АВБС) осуществляется за счёт того, что двухчастотное оптическое излучение, полученное при пропускании через АВБС широкополосного излучения и прошедшее через фильтр с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой, вызывает сигнал биений на выходе фотоприемника с частотой, равной адресной частоте АВБС. По амплитуде этого сигнала биений судят о положении центральной длины волны АВБС. Поскольку каждый АВБС-датчик в сенсорной системе имеет свою уникальную адресную частоту, опрос массива датчиков возможен без использования сложных оптико-электронных схем.

Развитием концепции адресных брэгговских структур стало создание многоадресных волоконных брэгговских структур (МАВБС) [1, 5]. МАВБС представляет собой квазипериодическую структуру, сформированную аналогично АВБС, оптический спектральный отклик которой состоит из трех и более сверхузкополосных компонент, разностные частоты между которыми находятся в радиочастотном спектральном диапазоне. Так же, как и АВБС, многоадресные структуры характеризуются инвариантностью разностных частот между спектральными компонентами при воздействии на МАВБС деформации и температуры. Принцип опроса многоадресных и адресных структур идентичен, за исключением того, что в первом случае используются несколько частотных компонент сигнала биений на фотодетекторе. Использование МАВБС позволяет расширить адресную емкость сенсорной системы, а также повысить точность определения центральной длины волны каждой брэгговской структуры.

1. Моделирование спектрального отклика многоадресных волоконных брэгговских структур с дискретными фазовыми сдвигами

Известны два подхода к формированию АВБС и МАВБС — внесение нескольких фазовых сдвигов в периодическую структуру ВБР [2] и формирование набора сверхузкополосных ВБР с брэгговскими частотами, разнесенными между собой на адресные частоты [3]. Рассмотрим математическую модель МАВБС, сформированную путем внесения трех фазовых сдвигов в периодическую структуру равномерной ВБР (3φ-ВБР). Схема 3φ-ВБР структуры и амплитудно-частотная характеристика центральной части её спектра пропускания приведены на рис. 1. Многоадресная 3φ-ВБР состоит из четырех последовательно сформированных однородных участков ВБР с фазовыми сдвигами между ними (рис. 1а). Спектр центральной части оптического излучения, прошедшего через 3φ-ВБР, содержит три окна прозрачности, которые формируют адресные частоты Ω_{21} , Ω_{32} и Ω_{31} (рис. 1б).

Для формирования спектрального отклика 3φ-ВБР применим метод матриц передач, который используется для моделирования ВБР с неоднородной структурой [4]. Каждая однородная секция 3φ-ВБР описывается матрицей передачи S_m [4, 6].

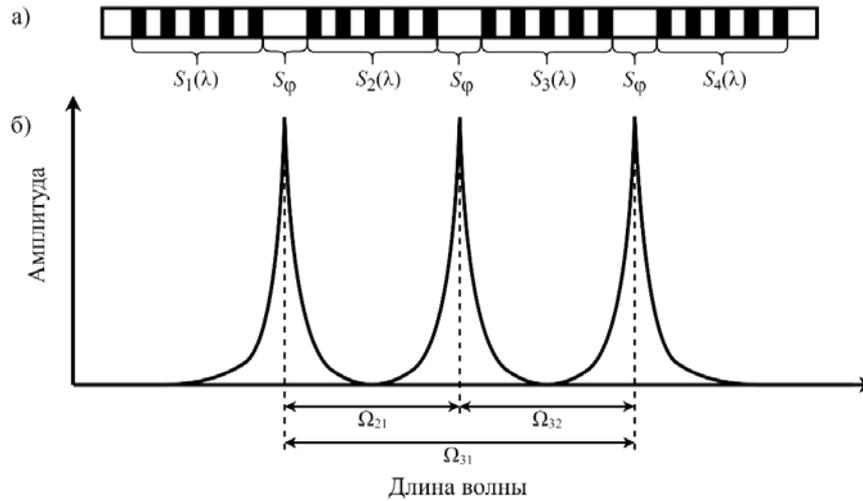


Рис. 1. Схема многоадресной 3φ-ВБР структуры (а) и амплитудно-частотная характеристика центральной части её спектра (б)

$$S_m(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{e^{iq(\lambda)L} - r(\lambda)^2 e^{-iq(\lambda)L}}{1 - r(\lambda)^2} & \frac{-r(\lambda)^2 e^{-iq(\lambda)L} + e^{iq(\lambda)L}}{1 - r(\lambda)^2} \\ \frac{r(\lambda)^2 e^{-iq(\lambda)L} - e^{iq(\lambda)L}}{1 - r(\lambda)^2} & \frac{e^{-iq(\lambda)L} - r(\lambda)^2 e^{iq(\lambda)L}}{1 - r(\lambda)^2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где L — длина однородного участка, а параметры $r(\lambda)$ и $q(\lambda)$.

$$r(\lambda) = \frac{q(\lambda) - \sigma_\beta(\lambda)}{\kappa}, \quad q(\lambda) = \sqrt{\sigma_\beta^2(\lambda) - \kappa^2}. \quad (2)$$

В (2) $\sigma_\beta(\lambda) = 2\pi(1/\lambda - 1/\lambda_B)$, $\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda$ — центральная (брэгговская) длина волны (Λ — период ВБР, n_{eff} — эффективный показатель преломления сердцевины волокна); $\kappa = \pi\sigma_n/\lambda_B$ — постоянная распространения, в которой $\sigma_n = n_{\text{mod}}/n_{\text{eff}}$ — индекс модуляции коэффициента преломления, n_{mod} — величина наведенного показателя преломления.

Для описания дискретного фазового сдвига вводится матрица S_φ .

$$S_\varphi(\varphi) = \begin{bmatrix} e^{-i\varphi} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где φ — величина фазового сдвига.

Матрица, описывающая 3φ-ВБР структуру, определяется как последовательное произведение матриц передачи однородных участков ВБР и матриц фазовых сдвигов.

$$S_{\text{res}}(\lambda) = S_1(\lambda) \times S_\varphi(\varphi_1) \times S_2(\lambda) \times S_\varphi(\varphi_2) \times S_3(\lambda) \times S_\varphi(\varphi_3) \times S_4(\lambda), \quad (4)$$

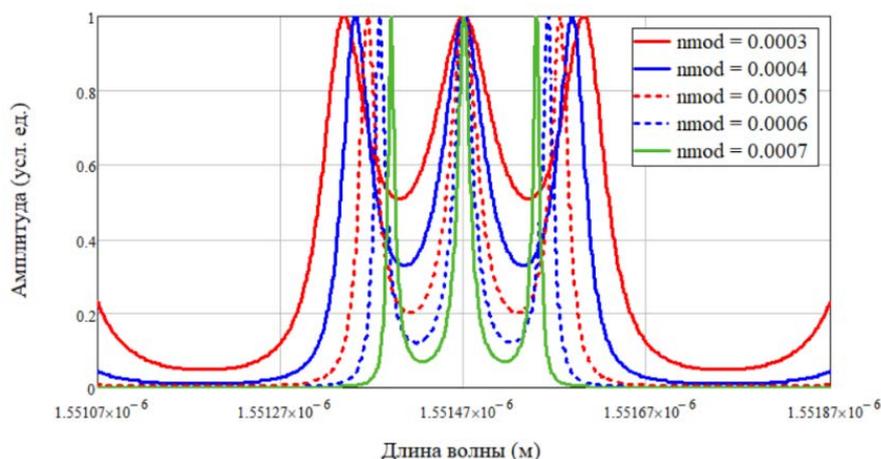
где φ_k ($k = 1, 3$) — величины фазовых сдвигов.

Спектр пропускания 3φ-ВБР структуры является комбинацией элементов результирующей матрицы передачи (4) [7].

$$T_{\text{res}}(\lambda) = \left| S_{\text{res}}(\lambda)_{1,1} - \frac{S_{\text{res}}(\lambda)_{1,2} S_{\text{res}}(\lambda)_{2,1}}{S_{\text{res}}(\lambda)_{2,2}} \right|^2. \quad (5)$$

Табл. 1. Исходные параметры для построения модели МАВБС

Параметр	Значение
Период ВБР Λ (центральная длина волны λ_B), нм	528,358 (1551,47)
Эффективный показатель преломления сердцевины оптического волокна n_{eff}	1,4682
Величина наведенного показателя преломления n_{mod}	$6 \cdot 10^{-4}$
Длины однородных участков ВБР $L_0, L_1 : L_2 : L_3 : L_4$, мм	$L_0=2, (1:1:1:1) \cdot L_0$
Величины фазовых сдвигов $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, рад	$\pi/2, \pi/2, \pi/2$

**Рис. 2.** Центральная часть спектра 3φ -ВБР структуры для различных значений амплитуды модуляции наведенного показателя преломления

Входными параметрами для моделирования спектрального отклика 3φ -ВБР структуры являются: период ВБР — Λ , эффективный показатель преломления сердцевины оптического волокна — n_{eff} , наведенный показатель преломления ВБР — n_{mod} , длины однородных участков: L_1, L_2, L_3, L_4 , и величины фазовых сдвигов: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$. В табл. 1 приведены исходные значения параметров, использованные в работе для моделирования 3φ -ВБР.

2. Влияние амплитуды модуляции наведенного показателя преломления

Исследуем изменение центральной части спектра 3φ -ВБР в зависимости от амплитуды модуляции наведенного показателя преломления. На рис. 2 приведены графики центральной части спектра 3φ -ВБР структуры для пяти различных значений амплитуды модуляции наведенного показателя преломления n_{mod} от 3×10^{-4} до 7×10^{-4} с шагом 1×10^{-4} .

Изменение амплитуды модуляции наведенного показателя преломления не влияет на симметрию формы спектрального отклика 3φ -ВБР, а лишь ведет к изменению спектральной ширины окон прозрачности и к симметричному смещению центральных частот окон прозрачности. С ростом амплитуды модуляции наведенного показателя преломления ширина окон прозрачности уменьшается, одновременно с этим уменьшаются и расстояния между окнами прозрачности — адресные частоты, рис. 2.

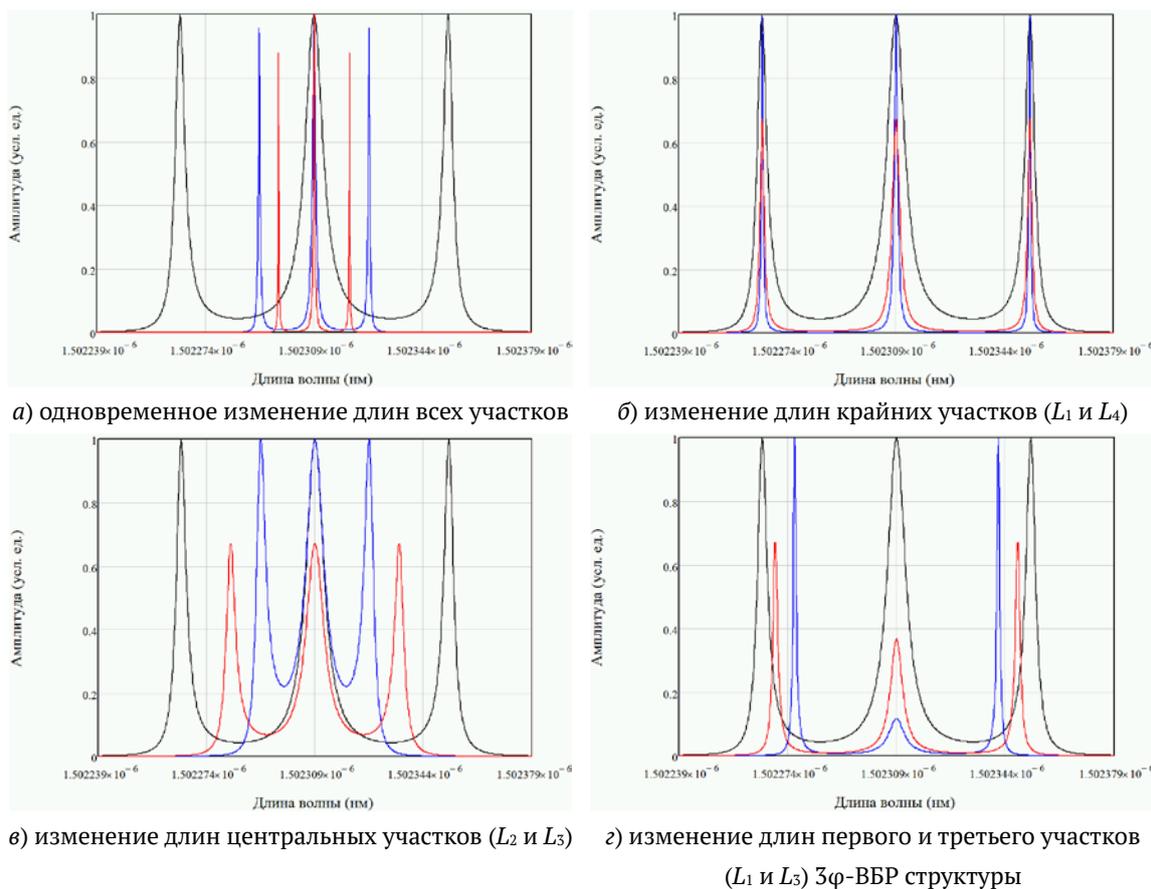


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики спектрального отклика центральной части 3φ-ВБР структуры (расшифровка цветового обозначения кривых дана в тексте)

3. Влияние длин однородных участков

На основе математической модели были исследованы различные варианты изменения спектральной формы 3φ-ВБР при изменении длин однородных участков L_1, L_2, L_3 и L_4 относительно их исходных величин L_0 , приведенных в табл. 1.

Одновременное увеличение длин однородных участков 3φ-ВБР структуры сохраняет амплитуду окон прозрачности. Одновременно с этим уменьшаются адресные частоты и спектральная ширина окон прозрачности (рис. 3а: черная линия — $L_1:L_2:L_3:L_4 = 1:1:1:1 \times L_0$, синяя линия — $1,4:1,4:1,4:1,4 \times L_0$, красная линия — $1,6:1,6:1,6:1,6 \times L_0$).

Симметричное увеличение длин первого и третьего участков (L_1 и L_3) ведет к уменьшению адресных частот (рис. 3г, синяя линия — $1,4:1:1,4:1 \times L_0$), одновременно с этим уменьшается амплитуда и растет спектральная ширина центрального окна прозрачности, при этом сохраняется амплитуда и уменьшается спектральная ширина боковых окон прозрачности. Асимметричное увеличение длин первого и третьего участков (L_1 и L_3) ведет к уменьшению амплитуды и спектральной ширины всех трех окон прозрачности, одновременно с этим уменьшаются и адресные частоты (рис. 3г, красная линия — $1,4:1:1,1:1 \times L_0$).

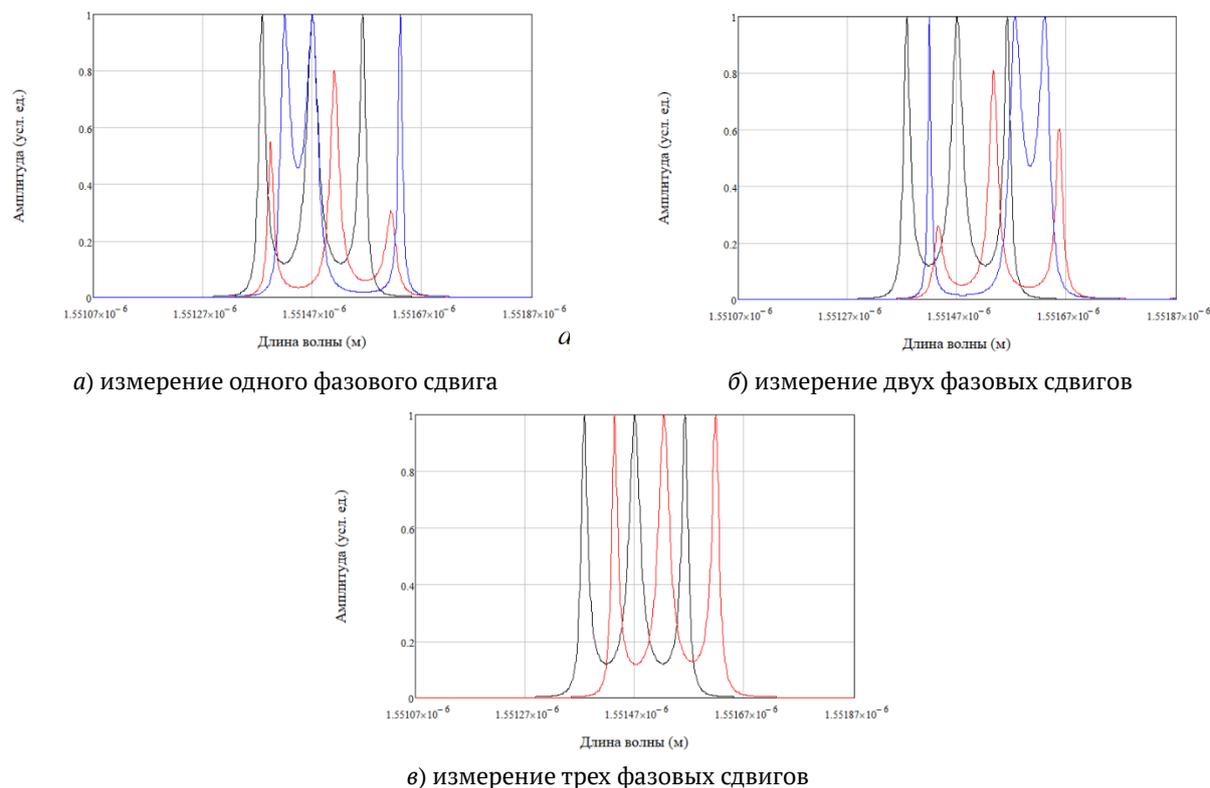


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика центральной части спектрального отклика 3ϕ -ВБР структуры (Расшифровка цветового обозначения кривых дана в тексте)

4. Влияние величин дискретных фазовых сдвигов

Рассмотрим различные варианты изменения формы спектра 3ϕ -ВБР при вариации фазовых сдвигов φ_1 , φ_2 и φ_3 относительно их исходных значений $\varphi_0 = \pi/2$.

Изменение величины одного из крайних фазовых сдвигов (φ_1 или φ_3) приводит к несимметричному изменению амплитуд всех окон прозрачности и к незначительному изменению адресной частоты Ω_{21} (рис. 4а: черная линия — исходный спектр, красная линия — $\varphi_1:\varphi_2:\varphi_3 = 0,8:1:1 \times \varphi_0$ или $1:1:0,8 \times \varphi_0$). Причем, уменьшение фазового сдвига ведет к уменьшению амплитуды и увеличению адресной частоты Ω_{21} , и наоборот.

Уменьшение величины центрального фазового сдвига сохраняет амплитуды окон прозрачности, но влечет за собой значительное уменьшение адресной частоты Ω_{21} и значительное увеличение Ω_{32} (рис. 4а, синяя линия — $1:0,8:1 \times \varphi_0$). Аналогичная картина наблюдается при увеличении величины центрального фазового сдвига, который сохраняя амплитуды окон прозрачности, влечет за собой значительное увеличение адресной частоты Ω_{21} и значительное уменьшение Ω_{32} . При этом частота центрального окна прозрачности остается неизменной.

Уменьшение двух крайних фазовых сдвигов сохраняет амплитуды окон прозрачности, но вызывает значительное увеличение адресной частоты Ω_{21} и значительное уменьшение Ω_{32} (рис. 4б, синяя линия — $0,8:1:0,8 \times \varphi_0$).

Одновременное уменьшение величин двух соседних фазовых сдвигов (φ_1 и φ_2 , либо φ_2 и φ_3) ведет к несимметричному уменьшению амплитуд всех окон прозрачности с незначительным увеличением адресной частоты Ω_{32} (рис. 4б: черная линия — исходный спектр, красная линия — $0,8:0,8:1 \times \varphi_0$ или $1:0,8:0,8 \times \varphi_0$).

Одновременное равное изменение величин всех трех фазовых сдвигов ведет к равному смещению частот всех окон прозрачности, при этом их амплитуды и адресные частоты остаются неизменными (рис. 4в: черная линия — исходная спектральная характеристика, красная линия — $0,9:0,9:0,9 \times \varphi_0$). Уменьшение величин фазовых сдвигов ведет к уменьшению центральной частоты 3φ -ВБР и наоборот.

Заключение

По результатам исследования влияния геометрических и рефрактометрических параметров структуры МАВБС с тремя фазовыми сдвигами (3φ -ВБР) на ее спектральные характеристики были выявлены основные закономерности их изменения, которые необходимо учитывать при голографической записи. Наибольшее влияние на уменьшение ширины окон прозрачности оказывает увеличение наведенного показателя преломления и длины крайних однородных участков МАВБС.

Асимметричное изменение адресных частот осуществляется только посредством вариации фазовых сдвигов. Только при соблюдении симметрии 3φ -ВБР структуры относительно ее центра сохраняются амплитуды спектральных составляющих.

Анализ спектральных форм, полученных для различных отношений длин однородных участков 3φ -ВБР структуры, позволил сделать вывод о том, что уменьшение адресных частот происходит всегда за исключением симметричного или асимметричного изменения длин двух крайних участков. Только симметричное изменение длин однородных участков не приводит к уменьшению амплитуд спектральных составляющих. Изменение длин центральных участков не влияет на изменение ширины спектральных составляющих окон прозрачности. Изменение длин однородных участков во всех случаях сохраняет симметрию формы спектрального отклика 3φ -ВБР структуры.

Изменение величины фазовых сдвигов не приводит к изменению ширины окон прозрачности многоадресной структуры. Любое изменение величин любого из крайних фазовых сдвигов приводит к уменьшению амплитуд всех окон прозрачности, причем это уменьшение асимметрично. Одновременное и одинаковое изменение величин всех трех фазовых сдвигов ведет к смещению центральной частоты 3φ -ВБР в ту же сторону.

Представленные в работе качественные зависимости характеристик спектров МАВБС от параметров самой структуры могут быть использованы для создания интерференционных схем, масок и адаптивных технологических процессов записи указанных структур с требуемыми спектральными характеристиками.

Список источников

- [1] **Аглиуллин, Т. А.** Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т. А. Аглиуллин, В. И. Анфиногентов, Р. Ш. Мисбахов, О. Г. Морозов, А. Ж. Сахабутдинов // Труды учебных заведений связи. — 2020. — Том 6. — № 1. — С. 6–13.
- [2] **Sakhabutdinov, A. Zh.** [Modeling of spectrum response of addressed FBG-structures in load sensing bearings](#) / A. Zh. Sakhabutdinov, O. G. Morozov, T. A. Agliullin, R. R. Gubaidullin, V. Ivanov // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. — 2020. — P. 1–4.
- [3] **Gubaidullin, R. R.** [Application of gaussian function for modeling two-frequency radiation from addressed FBG](#) / R. R. Gubaidullin, T. A. Agliullin, I. I. Nureev, A. Z. Sahabutdinov, V. Ivanov // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. — 2020. — P. 1–4.
- [4] **Agliullin, T. A.** [Addressed fiber Bragg structures in load sensing wheel hub bearings](#) / T. Agliullin, R. Gubaidullin, A. Sakhabutdinov, O. Morozov, A. Kuznetsov, V. Ivanov // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — № 21. — P. 6191. — 14 p.
- [5] **Morozov, O. G.** [Multi-Addressed Fiber Bragg Structures for Microwave-Photonic Sensor Systems](#) / O. Morozov, A. Sakhabutdinov, V. Anfinogentov, R. Misbakhov, A. Kuznetsov, T. Agliullin // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — № 9. — P. 2693. — 10 p.
- [6] **Kashyap, R.** Fiber Bragg Gratings / R. Kashyap. — Academic Press, 1999. — 478 p.
- [6] **Оввян, А. П.** Расчет однородных и неоднородных брэгговских волоконных решеток / А. П. Оввян // Молодежный научно-технический вестник. — 2012. — № 6. — С. 10–24.