

УДК 681.7.068

Расчет неоднородных брэгговских волоконных решеток

Хорохоров А. М.,

Оввян А. П.

a.horohorov@yandex.ru,

annushkaph@hotmail.com

Брэгговские волоконные решетки (БВР) в настоящее время являются одним из важнейших элементов в различных устройствах волоконной оптики. Они, в частности, применяются в качестве компенсаторов дисперсии в волоконно-оптических линиях связи, зеркал волоконных и полупроводниковых лазеров, чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков физических величин (температуры, натяжения, давления) и т. д. БВР физически представляет собой оптический интерферометр, встроенный в волокно. В самом простом случае это – периодическое изменение показателя преломления в сердцевине одномодового оптического волокна (рис.1).

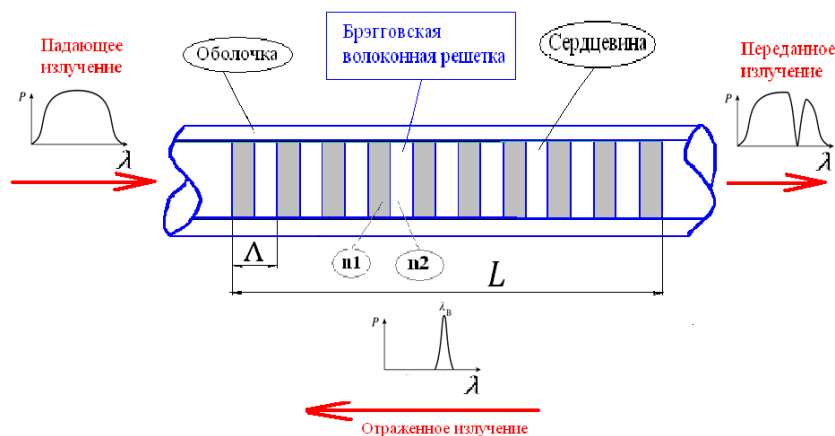


Рис.1. Однородная брэгговская решетка длиной L с периодом Δ .

Современные кварцевые волокна могут изменять свои оптические свойства под действием интенсивного лазерного излучения в ультрафиолетовой области спектра. Этот эффект используется для наведения периодических (дискретных) изменений показателя преломления сердцевины вдоль длины волокна, что приводит к формированию брэгговской решетки внутри сердцевины [1]. Волокна с брэгговскими решетками являются узкополосными оптическими фильтрами, которые отражают излучение с определенной длиной волны и пропускают

практически без затухания излучение на всех остальных длинах волн входного спектра сигнала.

В последнее время в связи с бурным развитием волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) большой интерес вызывает разработка теории расчета и изготовления неоднородных БВР, осуществляющих эффективное спектральное разделение каналов передачи информации.

Неоднородная БВР представляет собой сочетание последовательно расположенных однородных БВР с различным пространственным периодом, поэтому актуальной является задача влияния ширины слоев на параметры БВР, приводящая к назначению технологических допусков при ее изготовлении. Кроме того, важнейшим, с точки зрения надежности работы ВОЛС такого типа, является вопрос о распределении показателя преломления материала волокна внутри каждого слоя.

Таким образом, целью данной работы является определение оптимального соотношения между шириной слоя с большим показателем преломления сердцевины по отношению к слою с меньшим, позволяющего получить максимальное значение коэффициента отражения для фиксированной длины волны излучения и анализ многослойной неоднородной БВР, с точки зрения надежного спектрального разделения каналов и повышения помехоустойчивости.

Существуют разные математические модели, описывающие физику брэгговских решеток и позволяющие определять коэффициент отражения (интенсивность отраженной волны) в зависимости от длины волны излучения. В работах [2,3] используется теория связанных мод, в [4] – теория многослойных не поглощающих оптических структур, а в [5] проводится анализ, основанный на аналогии брэгговской решетки с резонатором Фабри-Перо.

Следует отметить, что метод связанных мод [2,3] не позволяет оптимизировать толщину слоев, так как распределение показателя преломления вдоль волокна осуществляется по гармоническому закону и существенно усложняет расчет неоднородной БВР. Используемый нами матричный метод [6,7] позволяет получить значения коэффициента отражения в зависимости от длины брэгговской решетки и размеров слоев с соответствующими коэффициентами преломления, а также разработать неоднородную БВР, состоящую из суммы однородных решеток с переменным периодом.

Нами используется математический аппарат, определяющий параметры БВР и основанный на теории многослойных непоглощающих оптических структур [6,7]. Картина такой структуры (рис.2) состоит из N слоев с периодически дискретными значениями показателя преломления сердцевины вдоль одномодового волокна. Поле на одной границе слоя выражается через поле на другой его границе с помощью матрицы Абея, характеристической матрицы слоя. Для m -го слоя она записывается следующим образом:

$$M_m = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_m) & -\frac{i}{n_m} \sin(\varphi_m) \\ -in_m \sin(\varphi_m) & \cos(\varphi_m) \end{pmatrix}$$

Где $\varphi_m = \frac{2\pi}{\lambda} n_m d_m$ – фазовая толщина m-го слоя; n_m – показатель преломления материала слоя, d_m – толщина слоя. В работе [6] получена характеристическая матрица для N бинарных слоев как $M_\Sigma = M^N$. В отличие от этой работы, нами вводится параметр x ($0 < x < 1$), характеризующий соотношение между шириной слоя с большим показателем преломлением ($n_{eff} + n_{mod}$) по отношению к слою с меньшим n_{eff} (рис.2), для дальнейшего анализа оптимальной БВР. Уравнение брэгговской решетки в этом случае записывается как:

$$\lambda_{БР} = 2 * \left((n_{eff} + n_{mod}) * \Lambda * x + n_{eff}(\Lambda - \Lambda * x) \right)$$

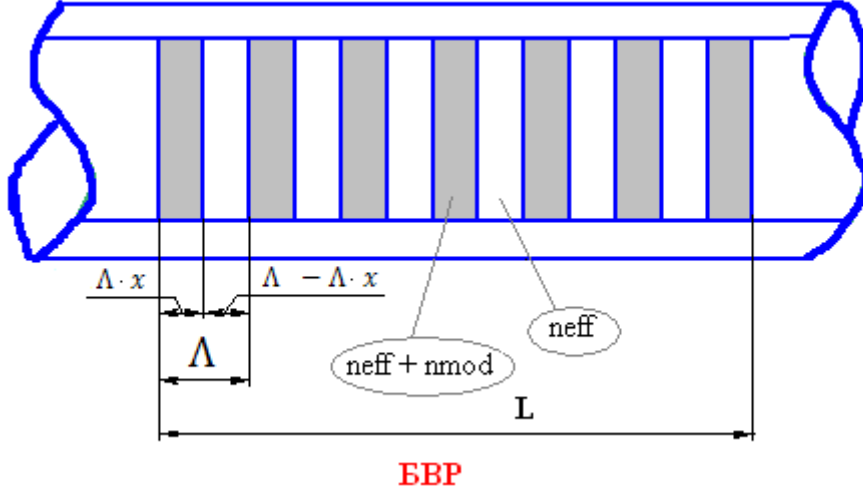


Рис.2. БВР с переменным параметром x

Согласно вышеописанному алгоритму [4], зависимость $r(\lambda)$ от длины волны λ имеет вид $(|r(\lambda)|^2 - \text{коэффициент отражения})$:

$$r(\lambda) = \frac{\left(M_{11}(\lambda) + \frac{M_{12}(\lambda)}{Z_1} \right) - \left(M_{21}(\lambda) + \frac{M_{22}(\lambda)}{Z_1} \right) Z_1}{\left(M_{11}(\lambda) + \frac{M_{12}(\lambda)}{Z_1} \right) + \left(M_{21}(\lambda) + \frac{M_{22}(\lambda)}{Z_1} \right) Z_1} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} M_{11}(\lambda) &= m_{11}(\lambda) * U_{N-1}(\lambda) - U_{N-2}(\lambda), \\ M_{12}(\lambda) &= m_{12}(\lambda) * U_{N-1}(\lambda), \\ M_{21}(\lambda) &= m_{21}(\lambda) * U_{N-1}(\lambda), \\ M_{22}(\lambda) &= m_{22}(\lambda) * U_{N-1}(\lambda) - U_{N-2}(\lambda), \end{aligned} \quad (2)$$

$U_{N-1}(\lambda)$ и $U_{N-2}(\lambda)$ – полиномы Чебышева второго рода:

$$U_N(\lambda) = \frac{\sin[(N+1)\arccos(a(\lambda))]}{(1-a(\lambda)^2)^{0.5}}, \quad N - \text{число бинарных слоев в БВР};$$

$$a(\lambda) = \frac{M_{11}(\lambda) + M_{22}(\lambda)}{2},$$

$$m_{11}(\lambda) = \cos(\beta_2(\lambda)) * \cos(\beta_1(\lambda)) - \frac{Z_2}{Z_1} \sin(\beta_2(\lambda)) * \sin(\beta_1(\lambda)),$$

$$\begin{aligned}
m_{12}(\lambda) &= -i * Z_1 * \cos(\beta_2(\lambda)) * \sin(\beta_1(\lambda)) - i * Z_2 \sin(\beta_2(\lambda)) * \cos(\beta_1(\lambda)), \\
m_{21}(\lambda) &= -\frac{i}{Z_2} * \sin(\beta_2(\lambda)) * \cos(\beta_1(\lambda)) - \frac{i}{Z_1} \cos(\beta_2(\lambda)) * \sin(\beta_1(\lambda)), \\
m_{22}(\lambda) &= \cos(\beta_2(\lambda)) * \cos(\beta_1(\lambda)) - \frac{Z_1}{Z_2} \sin(\beta_2(\lambda)) * \sin(\beta_1(\lambda)),
\end{aligned} \tag{3}$$

$$Z_1 = \frac{1}{n_{eff} + n_{mod}}, Z_2 = \frac{1}{n_{eff}},$$

$$\beta_1(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{eff} + n_{mod}) * \Lambda * x, \quad \beta_2(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} * (\Lambda - \Lambda * x).$$

Из (1) с учетом (2) и (3) получена зависимость коэффициента отражения $|r(x)|^2$ (рис.3) для брэгговской длины волны $\lambda = 1.499745$ мкм. Как следует из рис.5 для получения максимального коэффициента отражения необходимо, чтобы $0.45 \leq x \leq 0.6$. Полученный результат при $x \approx 0.5$ с учетом малости n_{mod} соответствует четвертьволновой слоистой структуре, так как

$$\frac{2 * \pi}{\lambda_{БР}} * (n_{eff} + n_{mod}) * \Lambda * x = \frac{2 * \pi}{\lambda_{БР}} * n_{eff} (\Lambda - \Lambda * x) = \frac{\pi}{2}$$

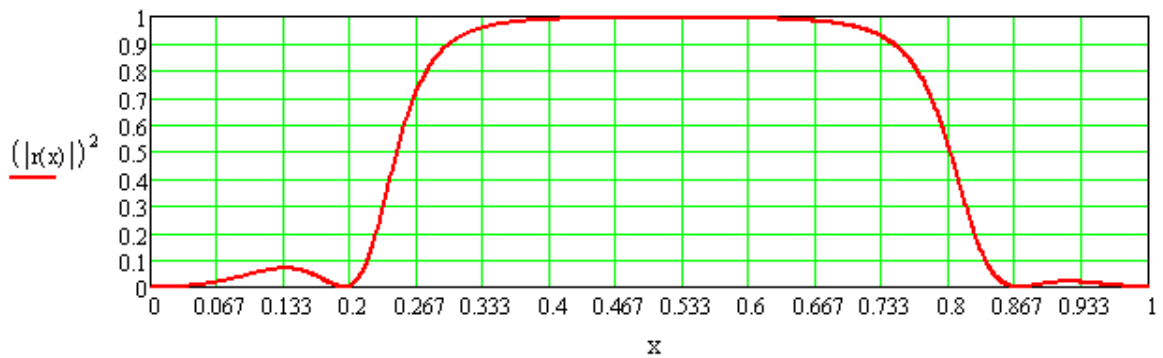


Рис.3. Зависимость коэффициента отражения $|r(x)|^2$

Использование БВР для определенных целей требует расчета временных задержек компонент отраженного спектра и значения дисперсии. Для этого необходимо знать фазовую характеристику БВР, определяемую выражением: $\varphi_r(\lambda) = \arctg\left(\frac{Im(r(\lambda))}{Re(r(\lambda))}\right)$. Графически эта зависимость в диапазоне $(-\pi, \pi)$ представлена на рис.6.

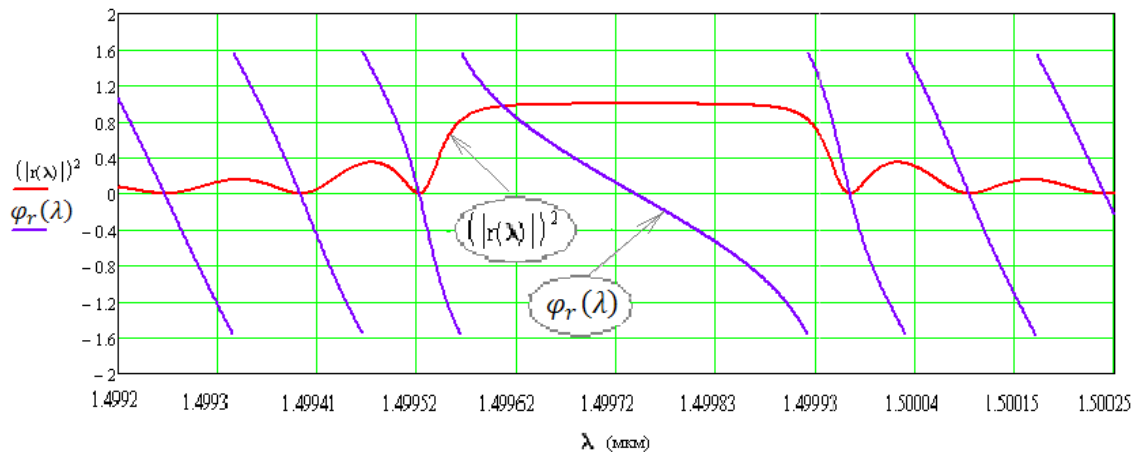


Рис.4. $|r(\lambda)|^2$ – Коэффициент отражения БВР от длины волны,

$\varphi_r(\lambda)$ – фаза коэффициента отражения от длины волны

Зная зависимость фазы от длины волны, можно определить задержку отраженного излучения $\tau(\lambda)$ и дисперсию $d(\lambda)$, создаваемую БВР, в соответствии со следующими формулами:

$$\tau(\lambda) = \frac{d\varphi}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\varphi}{d\lambda}, \quad d(\lambda) = \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\varphi}{d\omega^2}.$$

На рис.5 вместе с графиком $|r(\lambda)|^2$ представлен график зависимости задержки $\tau(\lambda)$ отраженного излучения от длины волны λ . Для длины волны максимального отражения $\lambda_{\text{БР}}$ задержка минимальна и составляет $\tau \approx 7.2$ пс. Это время задержки для $\lambda_{\text{БР}}$ соответствует длине прохождения излучения $L = \frac{\tau \cdot c}{2 \cdot n_{\text{eff}}} \approx 0.725$ мм при длине БВР 5 мм.

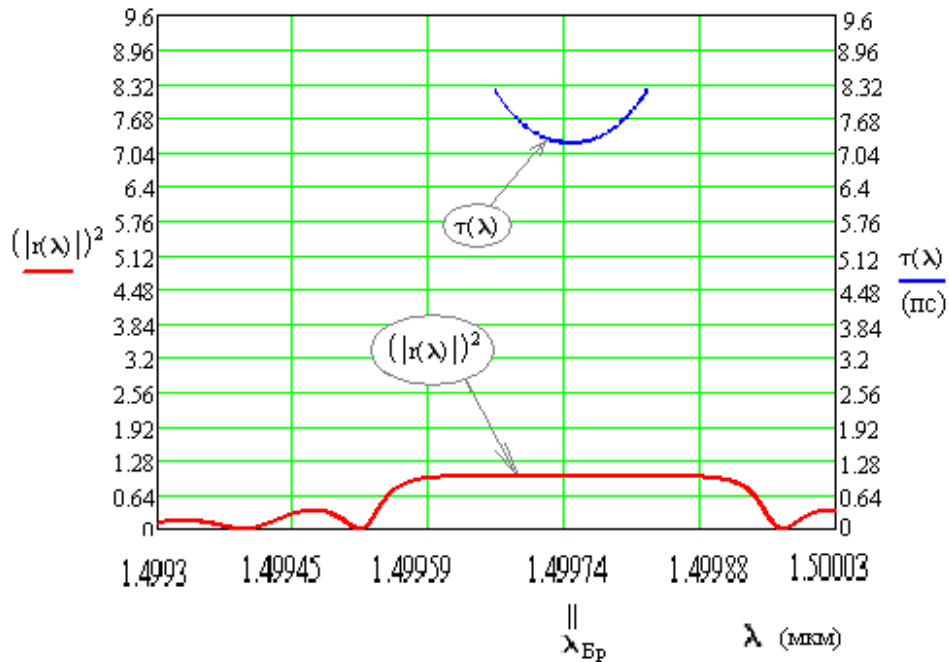


Рис.5. $\tau(\lambda)$ – задержка, $|r(\lambda)|^2$ – коэффициент отражения БВР от длины волны,

Матричный метод может с успехом использоваться не только для расчета однородных БВР с постоянными параметрами по всей длине, но и для расчета неоднородных БВР. В данной работе этот метод использовался для анализа неоднородной БВР, в частности, состоящей из 3 последовательно расположенных однородных БВР (рис.6) с разными периодами: $\Lambda_1 = 5.18938 \cdot 10^{-7}$ м, $\Lambda_2 = 5.193 \cdot 10^{-7}$ м, $\Lambda_3 = 5.197 \cdot 10^{-7}$ м. Выбор таких значений периодов осуществлен с целью, чтобы спектры отраженного излучения были разнесены на 100 ГГц (рис.7), что может быть использовано в волоконных линиях связи со спектральным уплотнением (WDM системы). В WDM системах селекция отдельных спектральных каналов происходит с помощью циркулятора, в который поступают отраженные от БВР сигналы.

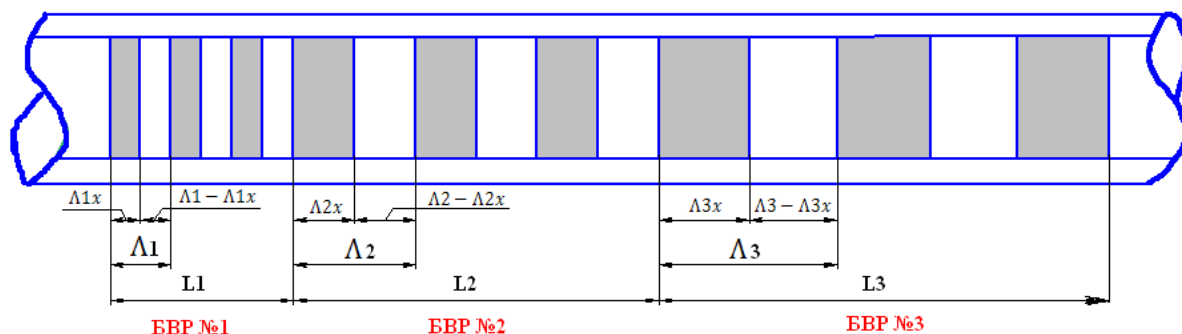


Рис.6. Неоднородная БВР, состоящая из 3-ех однородных решеток
 На рис.7 представлен график $|r(\lambda)|^2$ рассчитанной неоднородной БВР.

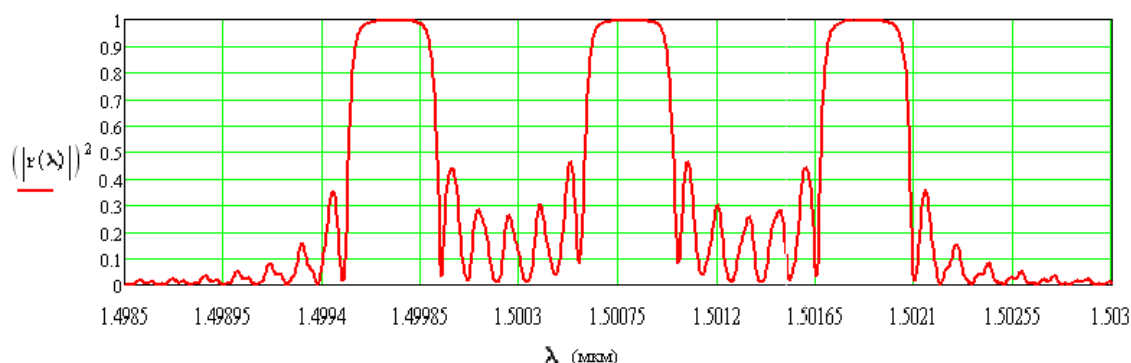


Рис.7. Спектры отраженного излучения от неоднородной БВР, состоящей из 3-ех однородных решеток, разнесенные на 100ГГц. Параметры БВР:

$$n_{eff} = 1.4447, L = 5 * 10^{-3} \text{ м}, n_{mod} = 5 * 10^{-4}$$

Из приведенных графиков следует, что рассчитанная неоднородная БВР обеспечивает надежное спектральное разделение каналов. Однако помимо основных максимумов в спектре отражения имеются боковые полосы. Поэтому следующим этапом в работе было исследование возможности снижения интенсивности боковых полос, поскольку они вносят дополнительные помехи в работу циркулятора.

Одним из методов снижения интенсивности боковых полос коэффициента отражения является введение огибающей профиля показателя преломления в пределах каждой из однородных БВР [4]. Поэтому в следующей части работы анализируются различные варианты огибающей профиля показателя преломления в сердечнике ОВ с целью уменьшения амплитуды боковых полос.

В качестве примера на рис.8 представлен график изменения показателя преломления в сердцевине волокна неоднородной БВР, состоящей из 3 последовательно расположенных однородных БВР, каждая из которых отличается от последующей изменением значения периода решетки ($\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$). Для анализа выбраны наиболее распространенные профили огибающих показателей преломления, описываемые гауссовой функцией и функцией секанс гиперболический (sech). Гауссова огибающая слоев с большим и меньшим показателем преломления для одного значения периода БВР описывается выражением [2]:

$$n = n_{eff} \pm n_{mod} * \exp \left[-2 * \left(\frac{j - N/2}{N/2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Огибающая функции секанс гиперболический для слоев с большим и меньшим показателем преломления для одного значения периода БВР описывается так:

$$n = n_{eff} \pm n_{mod} * \operatorname{sech} \left[-2 * \left(\frac{j - N/2}{N/2} \right) \right] \quad (5)$$

где j – номер слоя, N – количество слоев в каждой из однородных БВР, составляющих одну неоднородную БВР.

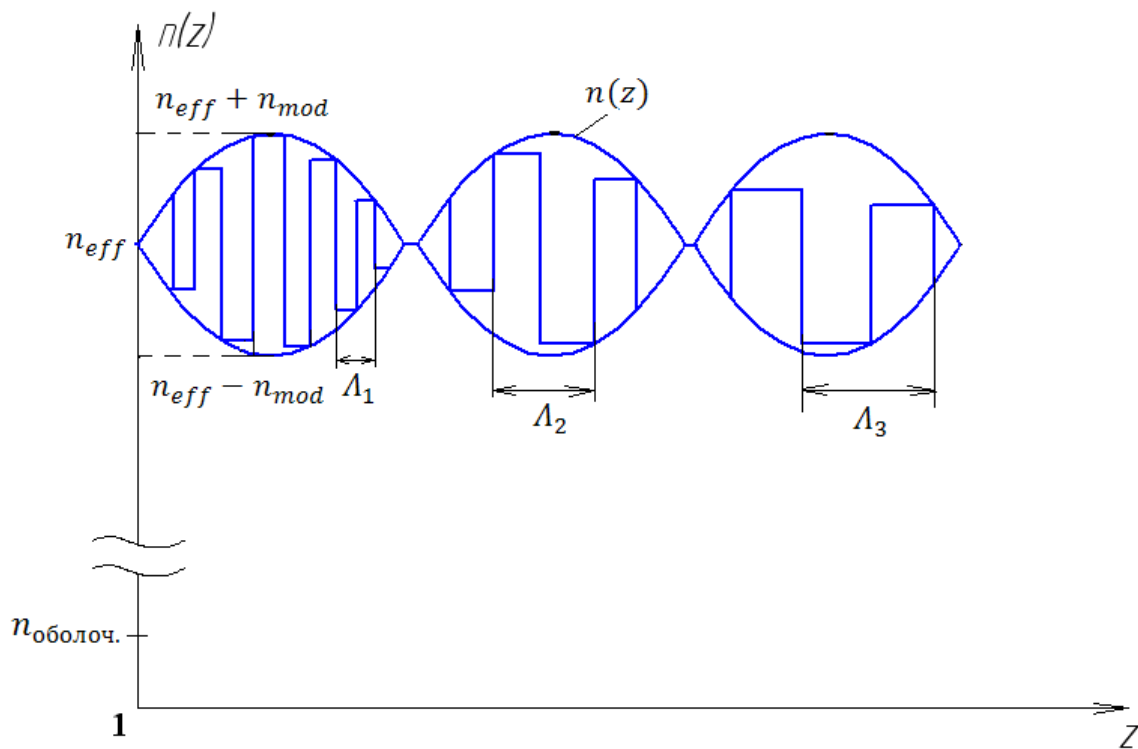


Рис. 8. Схема изменения показателя преломления в сердцевине волокна неоднородной БВР, состоящей из 3-ех последовательно расположенных однородных БВР, каждая из которых отличается от последующей изменением периода решетки ($\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$)

В среде Matlab была составлена программа для анализа БВР, состоящей из $N=1000$ слоев. Полученные результаты представлены на рисунках ниже. На рис.9 и рис. 10 показаны спектры отраженного излучения БВР с гауссовой огибающей и секанс гиперболической огибающей профиля показателя преломления. Из графиков коэффициента отражения $|r(\lambda)|^2$ видно, что введение огибающих позволяет практически полностью избавиться от побочных максимумов. Также на рис.9 и рис.10 представлены зависимости задержки и дисперсии от длины волны. В случае БВР с гауссовой огибающей отраженный сигнал на длине волны $\lambda=1500,55$ нм испытывает задержку $\tau = 25$ пс. В случае БВР с секанс гиперболической (sech)

огибающей отраженный сигнал на длине волны $\lambda=1500,55$ нм испытывает задержку $\tau =13,5$ пс. Дисперсия, вносимая обеими БВР, носит линейный характер (рис.9,з. рис.10,з.).

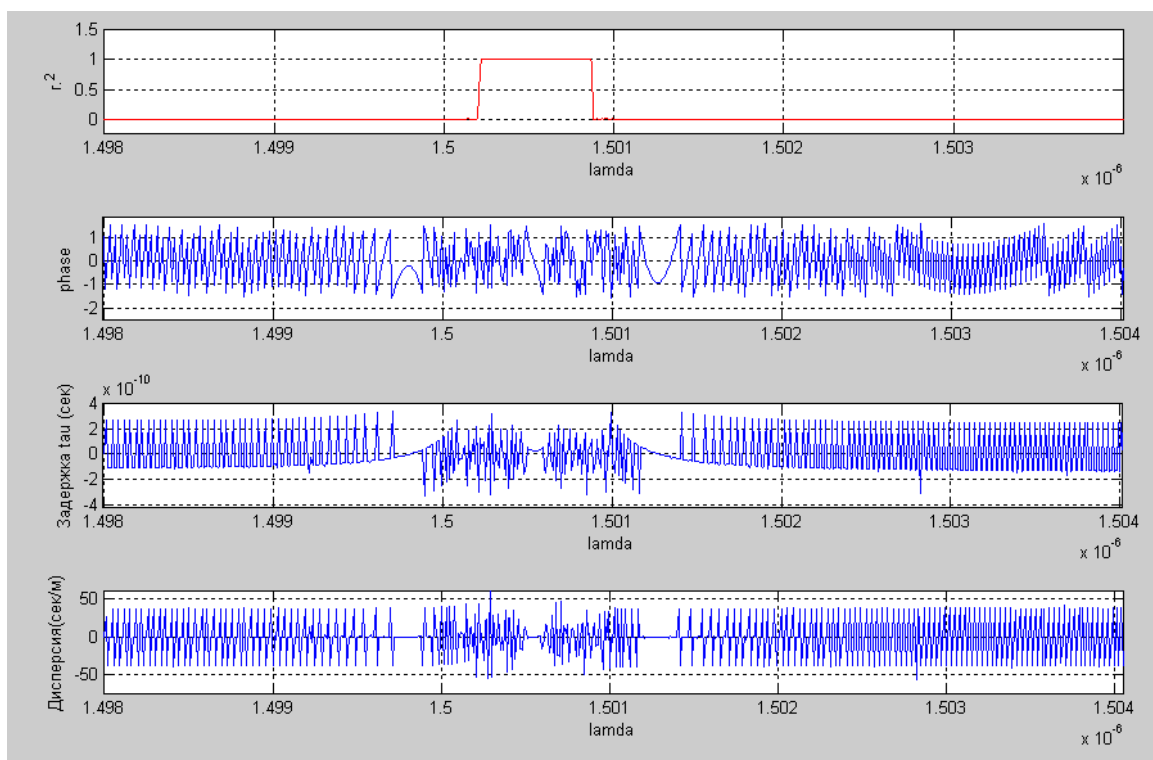


Рис. 9. а) Спектр отраженного излучения; б) фаза; в) задержка; г) дисперсия от неоднородной БВР с гауссовой огибающей профиля показателя преломления. Параметры БВР: $n_{eff} = 1.4447$, $L = 0.5$ мм, $n_{mod} = 5 * 10^{-4}$, $N=1000$.

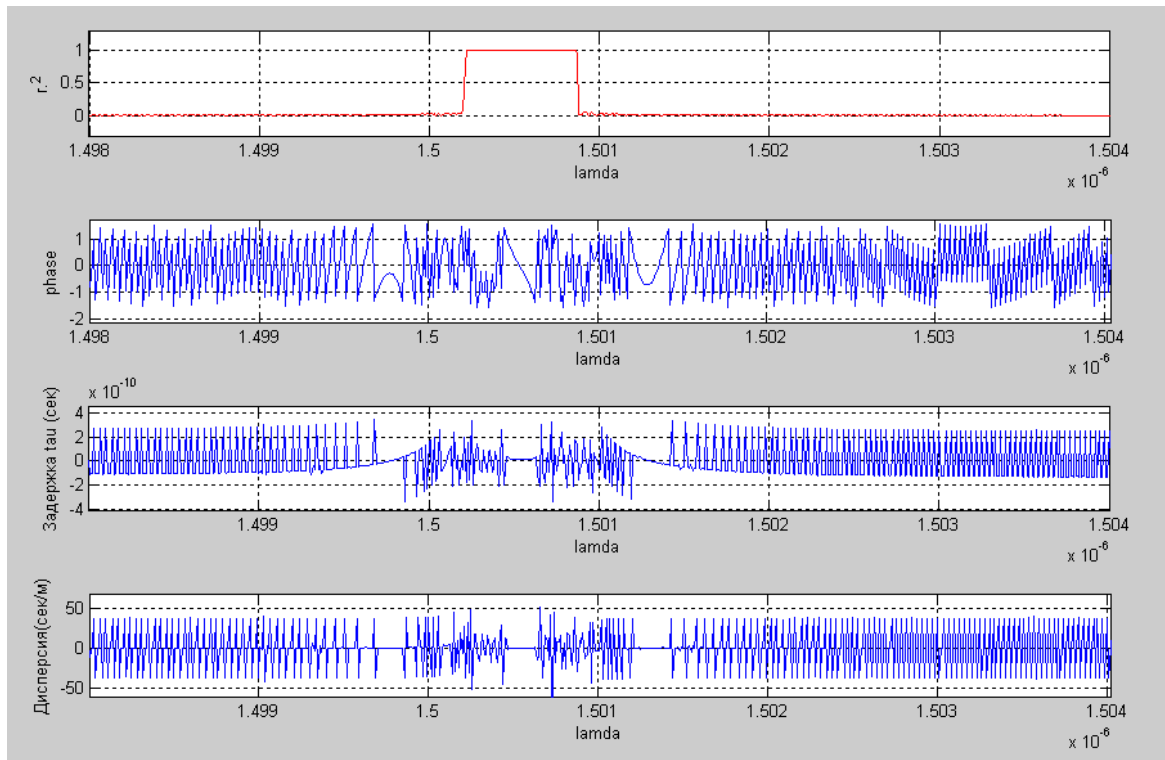


Рис.10. а) Спектр отраженного излучения; б) фаза; в) задержка; г) дисперсия от неоднородной БВР с секанс гиперболической (sech) огибающей профиля показателя преломления.

Параметры БВР: $n_{eff} = 1.4447$, $L = 0.5$ мм, $n_{mod} = 5 * 10^{-4}$, $N=1000$.

Исходя из вышеуказанного модельного представления, был разработан алгоритм расчета неоднородных БВР с произвольным числом однородных решеток и числом слоев N в каждом из них.

С помощью Matlab смоделирована неоднородная БВР, состоящая из 10 последовательно расположенных однородных БВР, каждая из которых состоит из N слоев с одинаковым периодом с $n_{mod} = 5 * 10^{-4}$, а каждая последующая однородная БВР отличается от предыдущей изменением значения периода решеток, так, чтобы спектры отраженного излучения были разнесены на 100 ГГц. Схема такой БВР представлена на рис. 11.

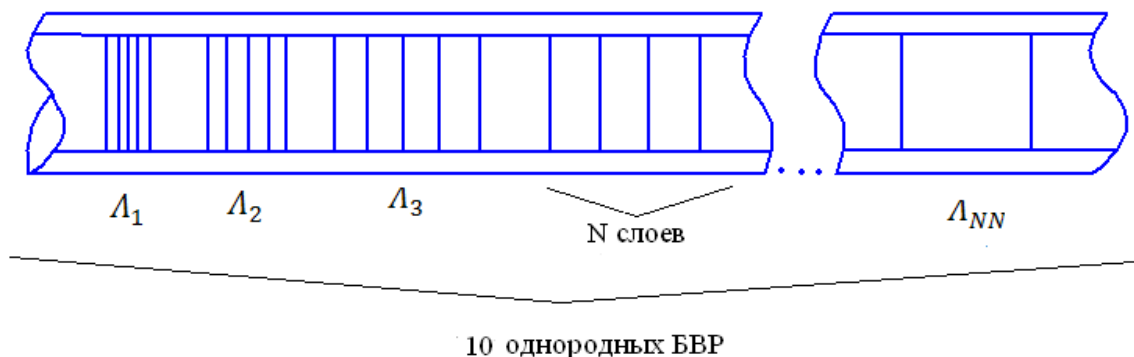
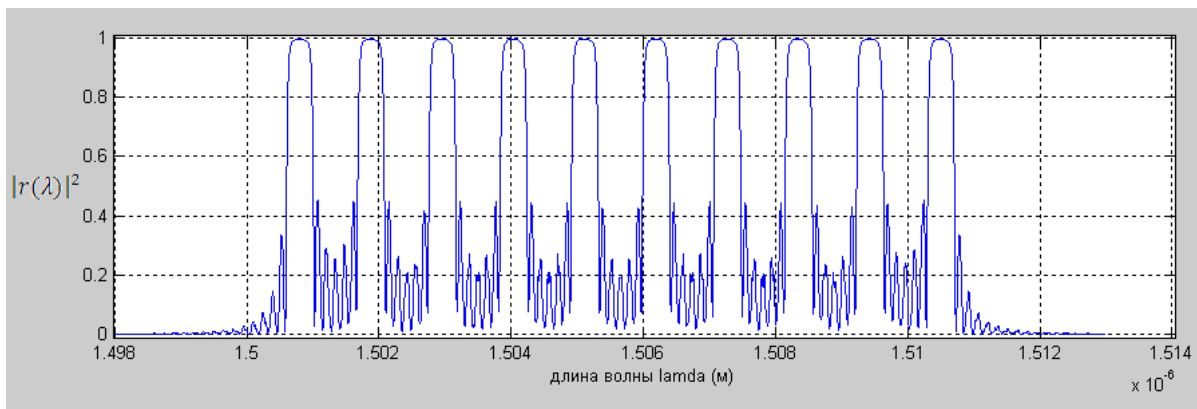
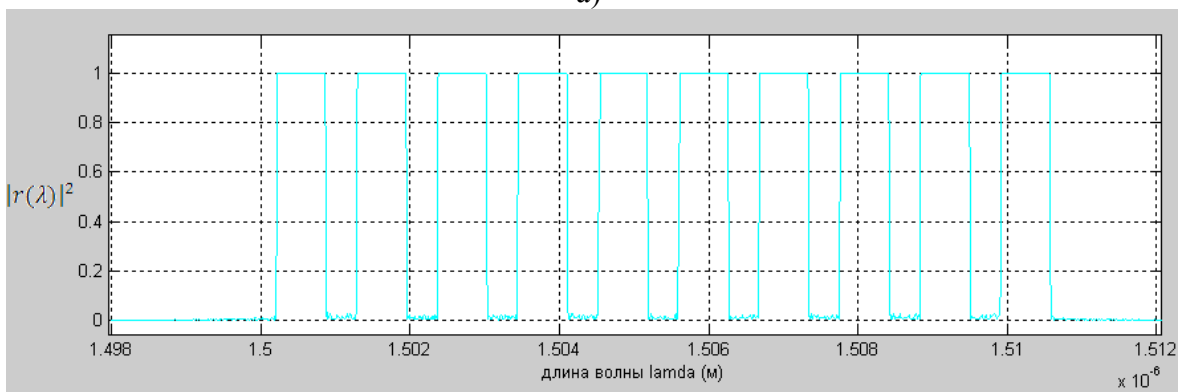


Рис.11. Неоднородная БВР, состоящая из 10-и последовательно расположенных однородных БВР, каждая из которых состоит из 10000 слоев с одинаковым периодом.

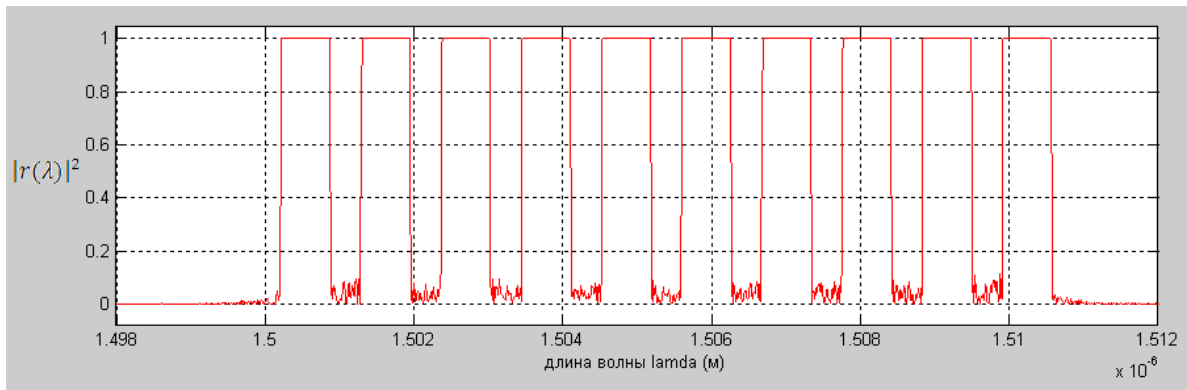
На рис.12 представлены графики $|r(\lambda)|^2$ рассчитанных БВР. Рис.12,а соответствует неоднородной БВР без модуляции показателя преломления в пределах каждой из 10 однородных решеток с числом слоев $N=10000$. Видно, что интенсивности боковых полос отражения значительны: они составляют примерно 20% от интенсивности основных максимумов. На рис.12,б представлены спектры отраженного излучения неоднородной БВР, но всего лишь с $N=500$ слоями в каждой однородной решетке и с гауссовой огибающей показателя преломления. Отметим, что в этом случае амплитуда боковых полос существенно меньше и составляет $\approx 2\%$ от интенсивности главных максимумов отражения. На рис.12,в представлены спектры отраженного излучения такой же неоднородной БВР, но с секанс гиперболической огибающей профиля показателя преломления. В этом случае амплитуда боковых полос существенно меньше и составляет $\approx 7\%$ от главных максимумов отражения. Таким образом, использование гауссовой и sech огибающих существенно уменьшает амплитуды боковых полос. Необходимо отметить также, что использование этих огибающих профиля показателя преломления дает еще одно преимущество, а именно: необходимое число слоев в однородных БВР уменьшается в 20 раз, и в этом случае вместо 10^4 слоев потребуется 500 слоев, что существенно упрощает технологический процесс изготовления таких БВР.



а)



б)



в)

Рис. 12. а) Спектры отраженного излучения от неоднородной БВР из 10 однородных решеток с 10000 слоями в каждой;

б) спектры отраженного излучения от неоднородной БВР из 10 однородных решеток с 500 слоями в каждой слоев с гауссовой огибающей профиля показателя преломления;

в) спектры отраженного излучения от неоднородной БВР из 10 однородных решеток с 500 слоями в каждой слоев с sech огибающей профиля показателя преломления;

параметры БВР:

$$n_{eff} = 1.4447, L = 2.5 \text{ мм}, n_{mod} = 5 * 10^{-4}$$

$$\Lambda_1 = 5.18938 * 10^{-7} \text{ м } \Lambda_2 = 5.193 * 10^{-7} \text{ м } \dots \Lambda_{10} = 5.1893 * 10^{-6} \text{ м}$$

По результатам материалов представленных в статье можно сделать следующие выводы.

1) Получена зависимость коэффициента отражения от соотношения между шириной слоя с большим показателем преломлением ($n_{eff} + n_{mod}$) к ширине слоя с меньшим показателем преломления n_{eff} . Показано, что оптимальное значение этого отношения, в частности для $\lambda = 1.499745$ мкм, лежит в пределах: $0.45 \leq x \leq 0.6$. Полученный результат свидетельствует о том, что существует широкий допуск на ширину слоев при изготовлении БВР.

2) Разработаны алгоритм и программа расчета неоднородной БВР с произвольным числом спектральных каналов и состоящей из заданного числа слоев. Определены зависимости фазы, времени, задержки и дисперсии сигнала в каждом канале.

3) Проведено математическое моделирование в программе Matlab различных неоднородных БВР с гауссовой огибающей и секанс гиперболической огибающей профиля показателя преломления, позволяющее смоделировать БВР из произвольного числа последовательно (соединенных) расположенных однородных БВР. Моделирование показало:

а) при использовании гауссовой огибающей и секанс гиперболической огибающей профиля показателя преломления уменьшаются амплитуды боковых полос в спектре отражения в 3 – 10 раз по сравнению с БВР без использования огибающих.

б) использование огибающей показателя преломления позволяет значительно (в 20-30 раз) уменьшить число слоев однородных решеток без ухудшения качества БВР.

Литература

1. Kivshar S., Agrawal P., Optical Solitons. Academic Press, 2003.
2. Erdogan T., Fiber Grating spectra. J. Lightwave Technol. 15, (1997)
3. Бугров В.Н., Малахов В.А., Раевский А.С., Анализ и синтез узкополосных фильтров на брегговских волоконных решетках. Физика волновых процессов и радиотехнические системы, Том 13, №4, 2010 г.
4. Султанов А.Х., Багманов В.Х., Костров С.В., Кутлюяров Р.В., Синтез отражательных фильтров на основе тонкопленочных структур. Вестник УГАТУ, 2009
5. Sipe J., Poladian L., Martinjn de Sterke C., Propagation through nonuniform grating structures, J. Opt. Soc. Am. 11, №4 (1994)
6. Бреховских Л.М., Волны в слоистых средах. М.: НАУКА, 1973
7. Борн М. Вольф Э., Основы оптики. М.: Наука, 1970