

## **Волоконная брэгговская решетка как важнейший элемент современной фотоники**

О.В. Бутов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11-7.  
E-mail: [obutov@mail.ru](mailto:obutov@mail.ru)*

*Представлен краткий обзор по волоконным брэгговским решеткам - одному из ключевых элементов современной фотоники. Рассматриваются их структура, принцип работы, способы изготовления и области применения включая современную телекоммуникацию, лазерную технику, волоконную сенсорику.*

*Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, фотоника, телекоммуникация, волоконный лазер, волоконная сенсорика*

## **Fiber Bragg grating as a key element of modern photonics**

O.V. Butov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS.*

*A brief overview of fiber Bragg gratings, one of the key elements of modern photonics, is presented. Their structure, operating principle, fabrication methods, and applications including modern telecommunications, laser technology, and fiber optic sensing are discussed.*

*Keywords: fiber Bragg grating, photonics, telecommunication, fiber laser, fiber sensorics*

### **Введение**

Эра волоконной оптики, волоконно-оптической коммуникации, а также неразрывно связанного с ней термина «фотоника» ведет отчет с начала 70-х годов прошлого века, когда впервые был представлен световод (оптическое волокно) с низкими, менее 20 дБ/км, потерями. Именно тогда стало понятно, что предсказанная ранее оптическая коммуникация может стать реальностью нашей жизни. Вскоре потери были снижены до 4-х, а впоследствии и до 0,2 дБ/км, что дало возможность создавать протяженные линии оптической связи. Телекоммуникационный световод представляет собой кварцевую нить, структурированную по диаметру и в стандартном своем исполнении имеет кварцевую светоотражающую оболочку и сердцевину из кварцевого стекла, легированного германием, который повышает показатель преломления, обеспечивая распространение по сердцевине света за счет эффекта полного внутреннего отражения.

Важнейшим этапом развития элементной базы волоконной оптики считается открытие фоточувствительности волокон с германосиликатной сердцевиной, т.е. перманентного изменения показателя преломления под действием интенсивного лазерного излучения. Как и некоторые другие интересные открытия, данный эффект был обнаружен случайно, когда по волокну запускалось излучение аргонового лазера и было обнаружено, что со временем интенсивность на выходе волокна начинает уменьшаться [1]. В волокне за счет отражения от торца световода образовывалась стоячая волна, в максимумах которой наблюдалось незначительное изменение показателя преломления. Формировалась структура с периодом в половину длины волны лазерного излучения. Такая структура отражала свет, ее сформировавший, как кристаллическая решетка отражает рентгеновские лучи по закону Брэгга-Вульфа. Фактически, сформированная

структура являлась одномерным фотонным кристаллом, фотонной кристаллической решеткой для оптического излучения. Такой волоконный фотонный кристалл был назван волоконной брэгговской решеткой (ВБР).

Важнейшим шагом на пути практического применения волоконных решеток явилось создание метода голографической записи таких структур с помощью ультрафиолетового излучения, которое оказалось на порядки более эффективным [2]. Теперь короткую, но эффективную брэгговскую решетку можно было записывать в волокне, создав интерференционную картину на сердцевине волоконного световода в свете луча лазера УФ-диапазона. Именно такой метод на десятилетия определил технологию создания одного из ключевых элементов современной фотоники – брэгговской решетки.

### Структура и свойства волоконной брэгговской решетки

Волоконная брэгговская решетка представляет собой периодическую структуру, как правило в виде модуляции показателя преломления, сформированную вдоль сердцевины волоконного световода. Ключевыми параметрами, определяющими ее свойства, является величина модуляции, длина структуры и ее период. Такая решетка отражает оптический сигнал в узком спектральном диапазоне, пропуская остальную часть спектра практически без изменений. Максимум длины волны отражения определяется по формуле (1) и называется брэгговской длиной волны  $\lambda_B$ :

$$\lambda_B = 2n\Lambda, \quad (1)$$

где  $n$  – эффективный показатель преломления

$\Lambda$  – период брэгговской структуры

Эффективный показатель преломления определяется для распространяющейся по волокну моды и зависит от показателей преломления сердцевины и оболочки, а также от размера модового пятна и диаметра сердцевины волоконного световода.

Величина модуляции показателя преломления  $\Delta n_{mod}$  и длина брэгговской решетки  $L$  определяют коэффициент отражения  $R$  на брэгговской длине волны:

$$R = \tanh^2(\pi \Delta n_{mod} \eta L / \lambda_B), \quad (2)$$

где  $\eta$  – так называемый, интеграл перекрытия, определяющий долю мощности основной моды волокна, распространяющейся по сердцевине.

Также для описания свойств решеток используют показатель  $\kappa_B$  – силу решетки, определяющий, фактически, «удельное» отражение ВБР:

$$\kappa_B = \pi \Delta n_{mod} \eta / \lambda_B. \quad (3)$$

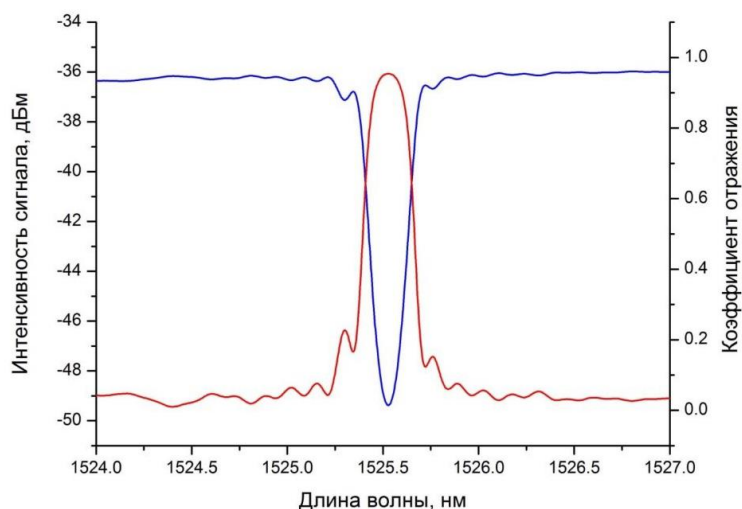
Тогда выражение (2) приобретает вид:

$$R = \tanh^2(\kappa_B L), \quad (4)$$

Как правило, потерями на рассеяние и поглощение в случае стандартных брэгговских решеток можно пренебречь, тогда спектр пропускания является обратной функцией отражения и определяется как:

$$T(\lambda) = 1 - R(\lambda), \quad (5)$$

Часто для более корректного анализа решеток с большим коэффициентом отражения используется логарифмическая шкала в которой запрещенная зона решетки (падение пропускания на брэгговской длине волны или «глубина» решетки) выражается в децибелах. Типичные спектры пропускания (синяя кривая) и отражения (красная кривая) ВБР приведены на рисунке 1. При этом спектр пропускания представлен в логарифмической шкале в абсолютных единицах уровня мощности оптического сигнала.



**Рис. 1. Типичные спектры пропускания и отражения волоконной брэгговской решетки**

Как видно из формулы (4) именно сила решетки и ее физическая длина определяют величину коэффициента отражения. Однако сама длина, или количество штрихов решетки влияют на еще один важный параметр – ширина спектра. В классической теории полная ширина решетки определяется спектральным расстоянием между первыми нулями коэффициента отражения [3]:

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda_B}{N_B} \sqrt{1 + \left(\frac{\kappa_B L}{\pi}\right)^2}, \quad (6)$$

где  $N_B = L/\lambda_B$  – количество штрихов решетки.

Очевидно, что при  $\kappa_B L \ll \pi$  спектральная ширина решетки зависит лишь от количества штрихов в ее структуре, т.е. обратно пропорциональна ее длине. На практике часто используют ширину решетки на полувысоте интенсивности отражения, что для равномерной структуры составляет примерно половину от полной ширины спектра.

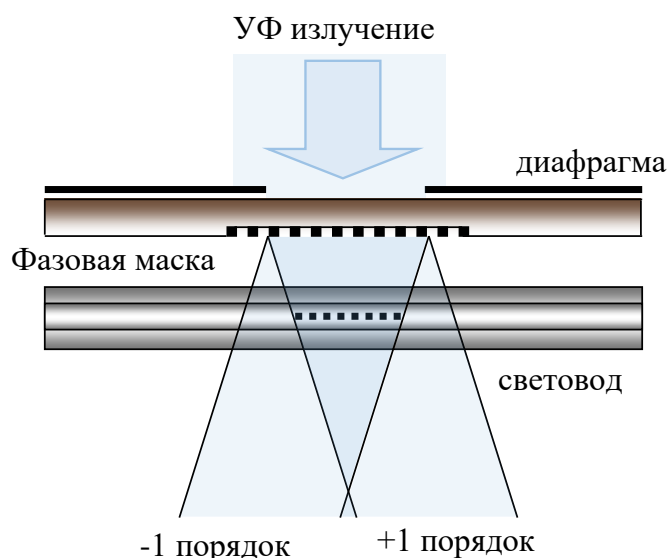
Как видно из рисунка 1 помимо основного пика отражения в спектре присутствуют боковые «сателлиты» - пики с меньшим коэффициентом отражения, наличие которых для ряда задач оказывается критичным. Данные пики являются естественным интерференционным явлением и возникают из-за резкой границы в структуре решеток. Для борьбы с ними используют аподизацию – плавный рост интенсивности модуляции показателя преломления от краев брэгговской структуры к центру. Такие решетки называют аподизированными. При правильном подборе профиля аподизации можно добиться подавления боковых спектральных пиков на 20 дБ и более. Однако запись такой структуры, как правило, связана с дополнительными технологическими сложностями.

### **Методы записи брэгговских решеток**

Как было упомянуто выше, основным методом создания волоконных брэгговских решеток долгое время оставалась их запись в фоточувствительных волоконных световодах с помощью излучения лазера ультрафиолетового диапазона. Для формирования решетки необходимо было создать интерференционную картину, спроецированную на сердцевину волоконного световода, в максимумах которой показатель преломления изменялся, что и обеспечивало формирование периодической структуры. Такую интерференционную картину можно было создать пространственными интерферометрами, такими как интерферометр Маха-Цандера или интерферометр Ллойда [3]. При этом, регулируя угол схождения лучей можно

регулировать период интерференционной картины в широком диапазоне, записывая решетки с требуемой брэгговской длиной волны.

Однако применение таких пространственных интерферометров связано с рядом трудностей, в частности для их эффективного использования требуется высокая степень стабилизации и изоляции схемы записи от внешних воздействий. Кроме того, для использования пространственных интерферометров требуется очень высокое качество лазерного пучка с большой временной и/или пространственной когерентностью. Для серийной записи решеток наибольшее распространение получил метод с применением фазовых масок (рис. 2).



**Рис. 2. Схема записи брэгговской решетки с применением фазовой маски**

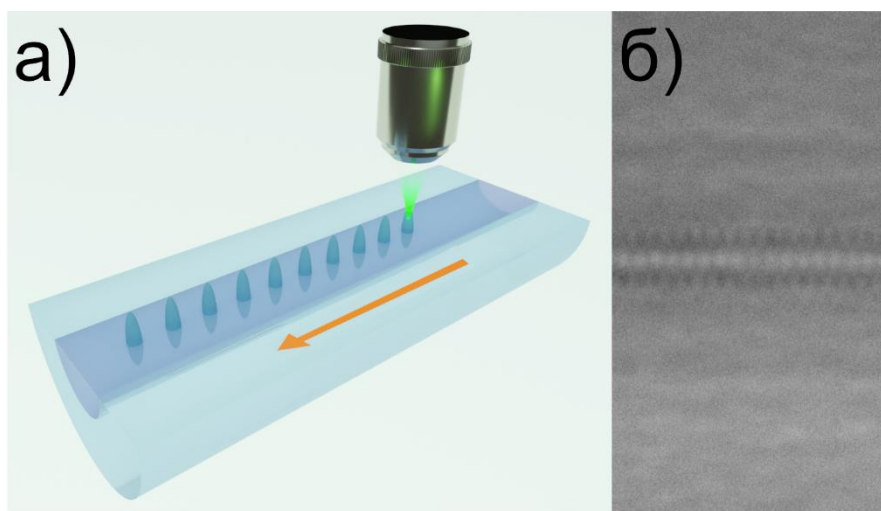
При прохождении излучения через фазовую маску, за ней формируется интерференционная картина с фиксированным периодом. Волокно располагается непосредственно за фазовой маской. Такой метод менее требователен к внешней стабилизации оптической схемы (необходимо обеспечить лишь стабильное положение маски относительно волокна), а также позволяет использовать низкокогерентное излучение, например, импульсных эксимерных лазеров. Недостатком схемы является отсутствие возможности перестройки периода записи. Для каждой брэгговской длины волны необходимо использовать фазовую маску с соответствующим периодом.

Общим недостатком всех вышеперечисленных методов является необходимость использования специального волокна с фоточувствительной сердцевиной, что существенно ограничивает возможность записи решеток, например, в волокнах с повышенной радиационной стойкостью на основе нелегированного кварцевого стекла. Кроме того, зачистка полимерного защитного покрытия в месте записи решетки — необходимого технологического этапа при таком типе записи — ухудшает прочностные характеристики решетки и усложняет технологический процесс. Решетки формируются путем воздействия излучения на менее стабильные, по сравнению с регулярной сеткой стекла, фоточувствительные примесные центры, что, в свою очередь, влияет и на стабильность получаемых брэгговских структур, в частности, обуславливая их относительно низкую устойчивость к воздействию повышенных температур.

В последнее время активное развитие претерпевает альтернативный метод формирования брэгговских решеток с помощью излучения фемтосекундного лазера. Особый интерес представляют, так называемые, методы прямой записи, когда каждый

элемент («штрих») решетки записывается одним импульсом фемтосекундного лазера. Такая запись происходит за счет многофотонных процессов в точке фокусировки излучения. При этом используется излучение видимого или ближнего инфракрасного диапазона, для которого в линейном режиме материал волокна и полимерного покрытия прозрачны. Таким образом, фокусировка на сердцевину осуществляется без удаления полимерного слоя, а, благодаря многофотонным процессам, запись структуры брэгговской решетки возможна даже в нелегированном кварцевом стекле.

Общий принцип прямой, поточечной записи представлен на рисунке 3а (Для наглядности оптическое волокно показано в разрезе). На рисунке 3б приведена микрофотография сформированной в волокне структуры [4]. В процессе записи волокно перемещается вдоль своей оси с заданной скоростью относительно сфокусированного лазерного пучка, а период брэгговской решетки определяется частотой следования лазерных импульсов и скоростью движения волокна.



**Рис. 3. Схема поточечной записи решетки излучением фемтосекундного лазера (а) и фотография брэгговской структуры в сердцевине оптического волокна (б) [4]**

При записи решетки излучением фемтосекундного лазера изменяется структура регулярной сетки кварцевого стекла, что позволяет сформировать устойчивый к внешним воздействиям дефект (штрих решетки). Решетка, сформированная таким образом обладает повышенной термической устойчивостью, что особенно важно при ее использовании в экстремальных условиях эксплуатации.

Следует также отметить гибкость технологии прямой записи, а именно, возможность формирования брэгговских решеток с заданной аперидичной структурой (решетки с фазовым сдвигом), чирпированных решеток (решеток с переменным периодом) а также решеток со сложной формой штриха. Ранее формирование таких структур было невозможно классическими интерференционными методами и требовало применения технологически сложных подходов или специально разработанных фазовых масок.

### **Применение брэгговских решеток – фильтры, зеркала, датчики**

Благодаря своим свойствам волоконные брэгговские решетки находят широкое применение в современной волоконной оптике и оптоэлектронике. Самым очевидным является их использование в качестве узкополосных зеркал или фильтров. Так, решетки могут применяться в качестве селекторов оптических каналов в демультиплексорах для линий связи или для фильтрации шумов при выделении слабого узкополосного сигнала в сенсорных, лазерных, телекоммуникационных системах. Другим очевидным применением является использование ВБР в качестве зеркал резонаторов волоконных

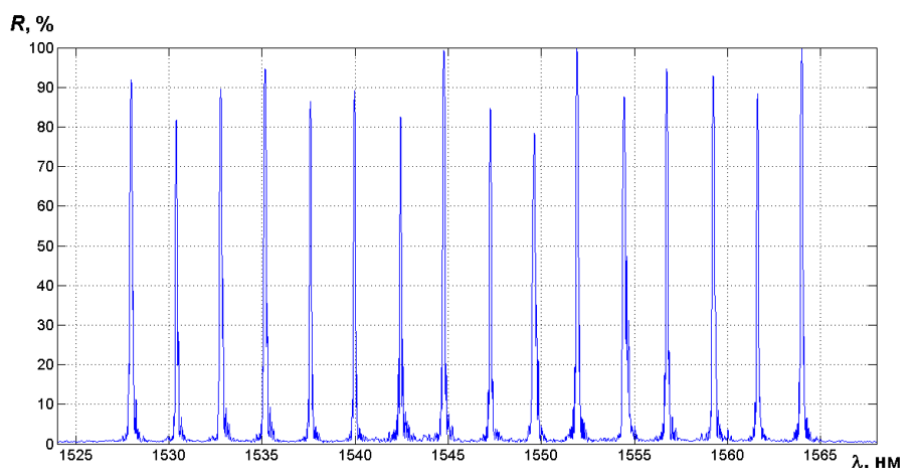
лазеров. Причем такие зеркала могут быть записаны как в подводящих световодах, так и непосредственно в активных волокнах, формируя «беспроводной» резонатор волоконного лазера.

Менее очевидным, на первый взгляд, является использование брэгговских решеток в качестве чувствительных элементов волоконных сенсоров. На этом аспекте следует остановиться подробнее. Как вытекает из формулы (1) брэгговская длина волны зависит от двух параметров – периода решетки и усредненного (эффективного) показателя преломления. При этом, механическое напряжение, приложенное к волокну вдоль его оси, будет в первую очередь вызывать изменение периода брэгговской структуры. ВБР также чувствительна и к температуре. Также у показателя преломления существует температурная зависимость. Таким образом, спектр брэгговской решетки оказывается чувствительным как к деформации, так и к температуре. Строго говоря, к каждому из данных видов внешнего воздействия чувствительны оба ключевых параметра структуры, и показатель преломления, и период. Так, например, эффективный показатель преломления оказывается чувствительным к линейной деформации за счет эффекта Пуассона, а температура влияет на объемное расширение материала. Поэтому измерение брэгговской длины волны под воздействием внешних условий записывается в виде соотношения (7):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \lambda \frac{\delta n}{\delta l} + n \frac{\delta \lambda}{\delta l} \right) \Delta l + 2 \left( \lambda \frac{\delta n}{\delta T} + n \frac{\delta \lambda}{\delta T} \right) \Delta T, \quad (7)$$

где первая половина уравнения описывает изменения, обусловленные линейной, продольной деформацией  $\Delta l$ , вторая – температурные изменения  $\Delta T$ .

Уникальной особенностью брэгговских датчиков является возможность их объединения в массивы с разделением по длинам волн, т.е. на одном волоконном световоде может быть записано до нескольких десятков решеток, при этом их единовременное сканирование осуществляется одним спектральным прибором по одному каналу. Типичный спектр отражения такой линии из приведен на рисунке 4.



**Рис. 4. Спектр отражения линии из 16 брэгговских датчиков**

Поскольку брэгговская решетка чувствительна как к деформации, так и к температуре, часто используют схемы с дополнительными брэгговскими датчиками, которые не подвержены механической нагрузке и измеряют только температуру, обеспечивая температурную компенсацию для датчика деформации. Другим типичным решением является использование дифференциальных схем.

Сенсорные системы и информационно-измерительные комплексы на основе ВБР в настоящее время активно используются для мониторинга состояния конструкции сложных инженерных сооружений, таких как высотные здания, мосты, путепроводы,



применяются для контроля механизмов и агрегатов, а также технологических процессов в машиностроении, авиации, атомной и других отраслях промышленности.

Следует отметить, что волоконно-оптические датчики на основе ВБР практически нечувствительны к любым электромагнитным наводкам, что позволяет их использовать в сильных электромагнитных полях. Более того, как упоминалось выше, решетки, записанные излучением фемтосекундного лазера способны выдерживать нагревы до нескольких сотен градусов по Цельсию, а, будучи записанными в радиационно-стойких кварцевых волокнах, обладают и высоким иммунитетом к воздействию ионизирующего излучения.

Так, например, все вышеперечисленные преимущества в полной мере были реализованы в системе измерения профиля графитовой кладки ядерных реакторов канального типа. Датчик состоял из кварцевого стержня с четырьмя световедущими сердцевинами, в которых было записано по 20 групп датчиков. Стержень работал как квазираспределенный датчик изгибных деформаций, реализуя дифференциальную схему измерения по двум ортогональным осям [5]. Решетки были записаны с помощью излучения фемтосекундного лазера в радиационно-стойком стекле. Такой датчик способен работать в активной зоне ядерного реактора, выдерживая высокий нагрев до 450 градуса по Цельсию и высокий фон ионизирующего излучения и позволяя проводить измерение без выгрузки топлива [6]. Схематичное изображение участка такого датчика представлено на рисунке 5а. На рисунке 5б представлено схематичное изображение поперечного сечения датчика, демонстрирующего принцип измерения деформации при приложении усилия  $F$ . Кривизна  $\kappa$  – обратная величина радиусу изгиба  $R$  – рассчитывается по формуле (8) исходя из показаний датчиков деформаций ( $\varepsilon_1 \dots \varepsilon_4$ ) и расстояния  $d$ , на котором расположены противоположные сердцевинки.

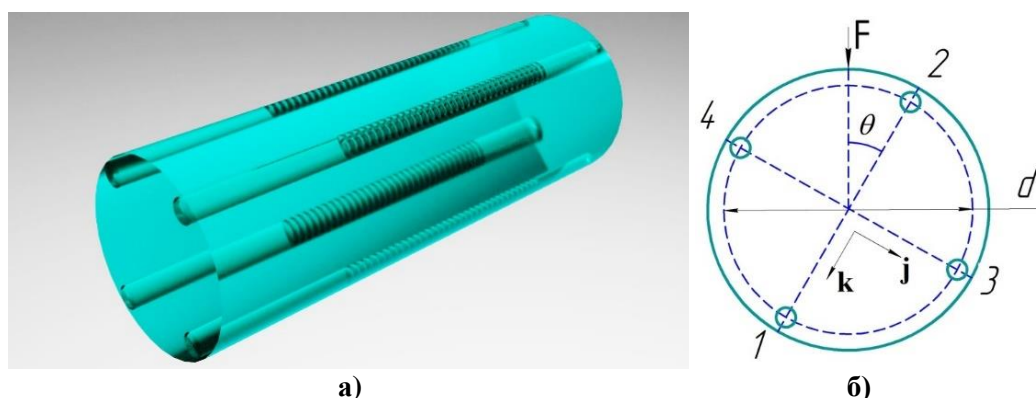


Рис. 5. Схематичное изображение участка датчика изгибных деформаций на основе четырехсердцевинной волоконной сборки (а) и принцип расчета деформации при приложении изгибного усилия  $F$ .

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \cos \theta j + (\varepsilon_3 - \varepsilon_4) \cdot \sin \theta k}{d}, \quad (8)$$

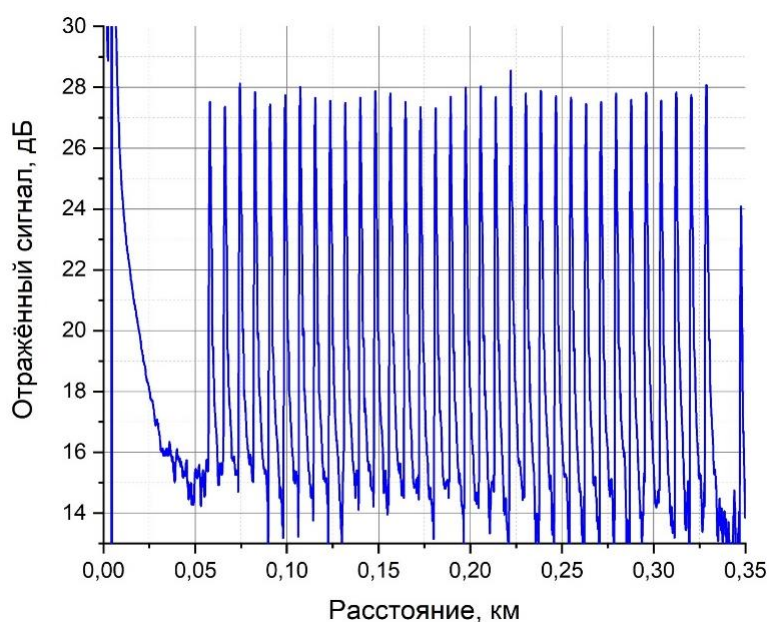
где  $j$  и  $k$  – единичные векторы, а

$\theta$  – угол между вектором приложенной силы и единичным вектором  $k$ .

### Решетки в фазочувствительной рефлектометрии

Брэгговские решетки могут служить и вспомогательным элементом в распределенных сенсорных системах на основе фазочувствительной рефлектометрии. В таких рефлектометрических системах само волокно является распределенным чувствительным элементом, а принцип определения величины и места воздействия схож с радиолокационным принципом. Воздействие определяется по величине и времени

прихода рассеянного сигнала от посланного в волоконную линию лазерного импульса. Для увеличения чувствительности и скорости отклика используется не только величина, но и фаза пришедшего сигнала, что позволяет создавать распределенные акустические и вибрационные датчики. Одним из способов повышения эффективности и чувствительности подобных систем является создание периодически расположенных искусственных отражателей, записанных непосредственно в волоконном световоде. В качестве таких отражателей используются широкополосные слабые брэгговские решетки, с одинаковым периодом, рассчитанным на отражение лазерного импульса. В отличие от неселективных точечных отражателей, которые также могут быть записаны с помощью излучения фемтосекундного лазера, брэгговская решетка сохраняет достаточную для эксплуатации прочность оптического волокна [7]. Между двумя соседними решетками создается эффективный интерферометр, отклик которого на импульс легко интерпретировать на фоне шумов [8]. На рисунке 6 приведена типичная рефлектограмма линии со слабыми брэгговскими решетками.



**Рис. 6. Рефлектограмма линии со слабыми брэгговскими решетками**

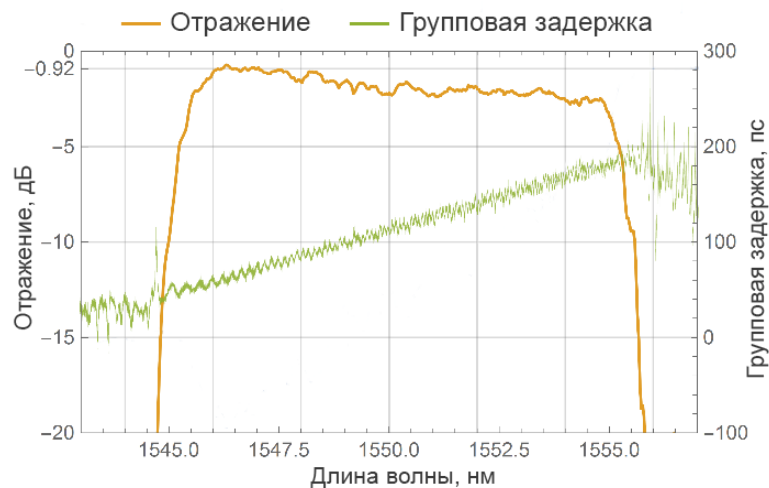
### **Чирпированные волоконные брэгговские решетки**

Отдельного рассмотрения требуют, так называемые, чирпированные брэгговские волоконные решетки (ЧВБР), т.е. решетки с переменным периодом по длине. На основе таких структур могут быть созданы широкополосные фильтры с шириной полосы до нескольких десятков нанометров. Но наибольший интерес ЧВБР представляют в качестве дисперсионных элементов. Очевидно, что, благодаря переменному периоду по длине, разные длины волн претерпевают эффективное отражение от разных участков решетки, проходя, соответственно, различный путь. Данное свойство может использоваться, например, для компенсаторов дисперсии в телекоммуникационных линиях связи, в которых за счет ненулевой дисперсии групповых скоростей импульс уширяется во времени. Для компенсации данного явления необходимо использовать компенсаторы, имеющие обратный знак дисперсии. Именно в качестве таких компенсаторов могут выступать чирпированные ВБР.

Другим примером использования ЧВБР в качестве дисперсионного элемента является стретчеры – устройства, которые растягивают во времени импульс, имеющий конечную, ненулевую спектральную ширину. Такое устройство применяется в лазерах



ультракоротких импульсов (фемтосекундных лазерах), созданных на основе схемы усиления чирпированных импульсов (Chirped Pulse Amplification – CPA). Как правило, импульсы фемтосекундной длительности, выходящие из задающего генератора, имеют низкую энергию и требуют усиления, однако усиление таких импульсов является сложной задачей из-за их высокой пиковой мощности, что провоцирует появление нелинейных эффектов и возможное разрушение материала усилителя. Особенно сильно данные эффекты проявляют себя в волоконных схемах, где размер модового пятна ограничен волноведущими свойствами оптического волокна. Для снижения пиковой мощности перед усилением сигнал «растягивается» по времени до длительности в несколько десятков пикосекунд. Импульс фемтосекундного лазера тем шире по спектру, чем короче его начальная длительность, поэтому его преобразование («растягивание») возможно с помощью стретчеров – дисперсионных элементов на основе ЧВБР [9]. После усиления импульс вновь «сжимается» по времени обратным преобразованием, но уже, как правило, с помощью объемных компрессоров. Пример спектра отражения ЧВБР, а также спектра групповой задержки такой решетки с показателем чирпа 2,5 нм/см приведен на рисунке 7 [9].



**Рис. 7. Спектр отражения и групповой задержки чирпированной брэгговской решетки**

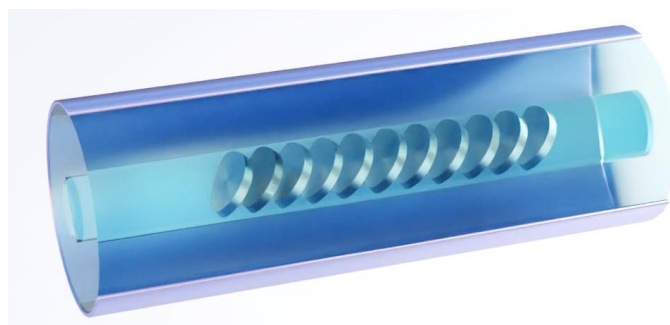
### **Решетки с фазовым сдвигом в структуре**

Помимо брэгговских решеток с регулярной периодичностью существует отдельный класс решеток с фазовым сдвигом, в структуре которых существует увеличенный на половину периода разрыв ( $\pi$ -сдвигом). Фактически, это две одинаковые по периоду брэгговские решетки, точно расположенные друг относительно друга с заданным смещением. Такая структура имеет важную особенность в спектре пропускания – узкий спектральный провал, область прозрачности в центре запрещенной зоны решетки. Решетки с фазовым сдвигом могут служить в качестве сверхузкополосных фильтров, но, основное их применение – резонаторы одночастотных волоконных лазеров с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) [10].

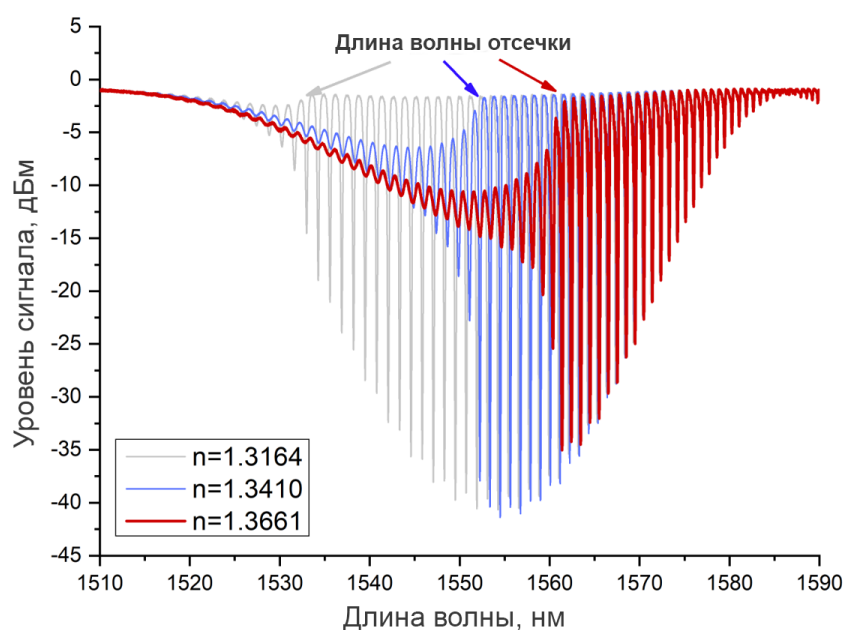
### **Наклонные волоконные брэгговские решетки**

Особый класс брэгговских решеток представляют структуры, в которых плоскость штрихов располагается под ненулевым углом к плоскости сечения волоконного световода. Такие решетки называют наклонными (НВБР) [11]. Схематично структура наклонной решетки представлена на рисунке 8. Благодаря наклону штрихов часть проходящего по волокну излучения рассеивается в оболочку, возбуждая дискретный набор оболочечных мод. На спектре пропускания решетки эффект проявляется в виде

чередующихся спектральных «провалов», соответствующих условиям возбуждения мод оболочки. Важно отметить, что оболочечные моды контактируют с внешней границей волоконного световода, а, соответственно, условие их распространения зависит, в том числе, от показателя преломления внешней среды. При повышении показателя преломления условие полного внутреннего отражения для части мод нарушается, что отражается на спектре пропускания решетки. Спектральная граница, при которой начинает проявляться данный эффект, традиционно называется длиной волны отсечки (рисунок 9) [12].



**Рис. 8. Схематическое изображение структуры наклонной брэгговской решетки**



**Рис. 9. Спектр пропускания НВБР в зависимости от показателя преломления внешней среды [13]**

Таким образом, НВБР может использоваться в качестве высокоточного датчика показателя преломления. Причем, математическая обработка спектра обеспечивает разрешение такого датчика до уровня  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  по показателю преломления [13,14]. Такого разрешения достаточно для создания чувствительного датчика малых концентраций химических примесей. Однако наибольший интерес представляют подобные структуры для медицины в качестве высокочувствительных селективных датчиков органических объектов. Поверхность оптического волокна в месте записи решетки может быть функционализирована антигенами для детектирования целевых белковых соединений в сложносоставных биологических жидкостях. Захватываемые антителами белки меняют средний показатель преломления ближайшего окружения сенсора, на что и реагирует датчик. В настоящее время уже продемонстрировано

селективное детектирование двух различных белков в одном растворе двумя датчиками с разной функционализацией поверхности [15]. Благодаря гибкости и компактным размерам волоконные датчики могут быть интегрированы в перспективные сенсорные системы на основе микрофлюидных чипов.

Альтернативной наклонным брэгговским решеткам могут служить решетки, записанные поточечным методом. Благодаря особенностям своей структуры, а именно, отсутствию равномерных штрихов, которые заменяются точечными дефектами, такие решетки также рассеивают часть излучения в коротковолновой части спектра, возбуждая, как и НВБР, оболочечные моды. Данный эффект для стандартных областей применения ВБР может считаться недостатком, но имеет существенные преимущества при их использовании в качестве рефрактометров. У таких решеток спектральный диапазон возбуждаемых оболочечных мод не зависит от угла наклона штрихов, как в НВБР, и ограничен только волноведущими свойствами оболочки. Как следствие, подобные структуры могут чувствовать изменения в показателе преломления внешней среды в широком диапазоне, начиная с единицы. Так, в работе [16] с помощью такой решетки удалось измерить с высокой точностью показатели преломления различных газов при разном давлении, демонстрируя возможности волоконного рефрактометра, работающего в широком диапазоне значений показателя преломления.

### **Выводы**

В данной работе представлен краткий обзор, посвященный волоконным брэгговским решеткам – одному из ключевым элементам современной волоконной оптики и оптоэлектроники. Описывается их структура, методы изготовления, а также рассмотрены некоторые области их использования. Благодаря своим уникальным свойствам волоконные брэгговские решетки находят широкое применение в качестве узкополосных оптических фильтров, селекторов оптических каналов, зеркал и структурных элементов лазерных резонаторов, дисперсионных оптических элементов, а также датчиков различных физических величин, охватывая широкий спектр решаемых задач в современной промышленности, телекоммуникации, оптоэлектронике.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН*

### **Литература**

1. Hill K. O., Fujii Y., Johnson D. C., Kawasaki B. S., Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // Appl. Phys. lett., 1978. V. 32. № 10. P. 647-649
2. Meltz G., Morey W. W., Glenn W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // Optics letters, 1989. V. 14. № 15. P. 823-825
3. Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г., Божков А. С., Курков А. С., Дианов Е. М. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника, 2005. Т. 35. № 12. С. 1085-1103
4. Долженко Е.И., Томишев К.А., Бутов О.В., Волоконные рефрактометры для газовых сред на основе волоконных брэгговских решёток // Труды 10-й Всероссийской Диановской конференции по волоконной оптике, С. 319-321
5. Oleg V. Butov, Alexey P. Bazakutsa, Yuri K. Chamorovski, Artem N. Fedorov, Igor' A. Shevtsov, All-Fiber Highly Sensitive Bragg Grating Bend Sensor // Sensors, 2019. 19 (19), 4228
6. Бутов О.В., Базакуца А.П., Федоров А.Н., Шевцов И.А., Никитов С.А., Создание радиационно-стойких волоконно-оптических средств контроля режимов работы и

диагностики состояния энергетического ядерного реактора // Фотон-экспресс, 2021. №6 (174), С. 262-263

7. Oleg V. Butov, Dmitrii V. Przhialkovskii, Alexey I. Lopunov, Alexey B. Pnev, Strength properties of femtosecond-induced defects and weak Bragg gratings for distributed optical fiber sensors // Optics & Laser Technology, 2023. V.162, 109271

8. Konstantin V. Stepanov, Andrey A. Zhirnov, Anton O. Chernutsky, Kirill I. Koshelev, Alexey B. Pnev, Alexey I. Lopunov, Oleg V. Butov, The Sensitivity Improvement Characterization of Distributed Strain Sensors Due to Weak Fiber Bragg Gratings // Sensors, 2020. 20 (22), 6431

9. Ivan Ulyanov, Dmitrii V. Przhialkovskii, Oleg V. Butov, Point-by-point inscription of chirped apodized fiber Bragg gratings for application as ultrashort pulse stretchers // Results in Physics, 2022, V. 32, 105101

10. Igor A. Nechepurenko, Alexander V. Dorofeenko, and Oleg V. Butov, Optimal defect position in a DFB fiber laser // Optics Express, 2021. V.29, № 9, P. 13657-13668

11. О.В. Бутов, К.А. Томышев, И.А. Нечепуренко, А.В. Дорофеев, С.А. Никитов, Волоконные брэгговские решетки с наклонными штрихами и сенсоры на их основе // Успехи Физических наук, 2022. Т.192, С.1385–1398

12. Kirill Tomyshev, Egor I. Dolzhenko, Ilya D. Golubev, Oleg V. Butov, Spectral features of tilted fiber Bragg gratings inscribed with femtosecond-pulse laser radiation // IEEE Sensors Journal, 2024. V.24, №23, P. 38996-39001

13. Egor Manuylovich, Kirill Tomyshev, Oleg V. Butov, Method for Determining the Plasmon Resonance Wavelength in Fiber Sensors Based on Tilted Fiber Bragg Gratings // Sensors, 2019. V.19(19), 4245

14. K.A.Tomyshev, E.S.Manuylovich, D.K.Tazhetdinova, E.I.Dolzhenko, O.V.Butov, High-precision data analysis for TFBG-assisted refractometer // Sensors and Actuators A:Physical, 2020. V.308, 112016

15. Kirill Tomyshev, Egor I. Dolzhenko, Alexandra D. Vasilyeva, Lyubov V. Yurina, Oleg V. Butov, Selective fiber optic TFBG-assisted biosensors, featuring functional coatings // Sensors and Actuators B: Chemical, 2023. V.384. 133618

16. K. Tomyshev, E. I. Dolzhenko, A. A. Kholboeva and O. V. Butov, Ultrahigh-Range Evanescent Field Refractometer Based on a Fiber Bragg Grating Inscribed With Femtosecond-Laser Radiation // IEEE Sensors Journal, 2025. V.25. №.17. P. 32733-32738