**УДК 62-97/-98**

***Дубровин Сергей Игоревич***
***Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации***
***сотрудник***
***Россия, г. Орёл***
***Научный руководитель: Меркулов Павел Александрович***
***Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации***
***сотрудник***
***Россия, г. Орёл***

# ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

***Аннотация:*** *В данной статье рассматривается применение волоконно-оптических брэгговских решеток (ФБГ) для измерения скорости детонации взрывчатых веществ. Основное внимание уделяется точности и надежности ФБГ как инструмента для оценки эффективности взрывных систем. Обсуждаются основные характеристики ФБГ, такие как отражательная способность и дифракционная эффективность, а также методы моделирования для предсказания их поведения при детонации.*

***Ключевые слова:*** *волоконно-оптические брэгговские решетки (ФБГ), скорость детонации, моделирование взрывных систем, дифракционная эффективность, пространственное разрешение, спектральная плотность мощности (PSD)*

***Annotation:*** *This article discusses the application of fiber optic Bragg gratings (FBGs) to measure the detonation velocity of explosives. The focus is on the accuracy and reliability of FBGs as a tool for evaluating the performance of explosive systems. Basic characteristics of FBGs, such as reflectivity and diffraction*

*efficiency, as well as modeling techniques for predicting their detonation behavior are discussed.*

***Key words:*** *Fiber Bragg gratings (FBGs), detonation velocity, explosive system modeling, diffraction efficiency, spatial resolution, power spectral density (PSD)*

Скорость детонации является важным параметром при оценке эффективности взрывчатых веществ и должна быть измерена как можно точнее, чтобы подтвердить и улучшить проектирования и моделирования взрывных систем. Взрыв - это выделение энергии, которое происходит за очень короткий промежуток времени (обычно мкс). временной шкале). Эта энергия проявляется в виде света, тепла и быстрого расширения газов, которые совершают работу над окружающей средой.

FBG - это элемент фильтрации длины волны, который находится в сердцевине оптического волокна. Он состоит из периодического возмущения показателя преломления (ПП), которое является резонансным для определенного диапазона входных длин волн. Если падающий оптический сигнал находится в пределах резонансной полосе пропускания FBG, то он претерпевает изменение направления распространения из-за накопления фазово-согласованных отражений Френеля. Степень, в которой это происходит, называется называется отражательной способностью или дифракционной эффективностью и зависит как от конкретной конструкции

FBG и точной длины волны сигнала. Помимо этих основных свойств, которые в целом характерны для всех ФБГ, можно изготовить большое разнообразие ФБГ, имеющих различную длину, форму фильтров, отражательной способностью и дисперсионными характеристиками.

В целом, теория связанных мод используется для количественной оценки передачи энергии между двумя или более резонансными модами в системе. Например, в волоконной оптике поперечная мода может соединяться

между несколькими соседними жилами - механизм, используемый в волоконно-оптическом соединителе.

Для измерения скорости детонации особенно важно, чтобы реакция ФБГ на изменение длины - его "характеристики стирания" - была хорошо охарактеризована. FBG на изменение длины - его "характеристики стирания" - должны быть хорошо охарактеризованы. Для того чтобы предсказать характеристики стирания ФБГ, необходим метод моделирования, где период решетки, ΛG(z), профиль показателя преломления, Δn(z), и длина, L, могут быть заданы, чтобы получить отражательную способность решетки в зависимости от длины волны, R(λ).

Для измерения скорости детонации методы ФБГ представляют собой малозаметную, непрерывную, неэлектрическую и простую в реализации альтернативу различным методам. Ниже приводится краткая информация об этих преимуществах:

- Низкопрофильный: Площадь поперечного сечения стандартного оптического волокна (диаметр 125 мкм) составляет всего 0,012 мм2

Это позволяет встраивать FBG-датчик непосредственно в взрывчатку с минимальной инвазивностью.

- Непрерывность: Теоретическим пределом пространственного разрешения для FBG-датчика детонации

теоретическим пределом пространственного разрешения для датчика скорости детонации FBG является период решетки, ΛG. Эта длина обычно значительно меньше чем общая длина датчика, ΛG << L, поэтому измерение можно считать непрерывным.

- Неэлектрические: Волоконно-оптические датчики нечувствительны к электрическим помехам и безопасны для и безопасны для использования там, где электрические провода нежелательны.

- Просты в реализации: Механическая гибкость оптического волокна, а также возможность непрерывного измерения означает, что крепление является

простым по сравнению с дискретными методами, где точность измерения ограничивается точностью выравнивания при настройке.

CFBG представляет собой квазипериодическую модуляцию показателя преломления вдоль оптического волокна, которая создается путем впечатывания интерференционных полос от УФ-излучения в волокно. Эта модуляция действует в качестве решетки, отражающей свет длины волны, зависящей от периода модуляции.

В общем случае для источника ASE со спектральной плотностью мощности (PSD), Spsd(λ), освещающего CFBG с отражательной способностью, R(λ), полная отраженная мощность, достигающая фотодетектора, будет

$$P = \int_{\lambda_{start}}^{\lambda_{end}} S_{psd}(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda,$$

где $\lambda_{start}$ и $\lambda_{end}$ – границы пропускной способности CFBG

На рисунке 1. Показана типичная установка для измерения скорости детонации ОФПГ, использующая схему измерения интегральной мощности. В данном случае широкополосный (некогерентный) источник усиленного спонтанного излучения (ASE) используется для освещения всей полосы частот CFBG, а отраженный сигнал направляется на фотодетектор через оптический циркулятор. Благодаря наличию высокоскоростных фотоприемников и осциллографов, эта система способна обеспечить скорость измерений в диапазоне ГГц – достаточно легко для достижения субмиллиметрового пространственного разрешения.

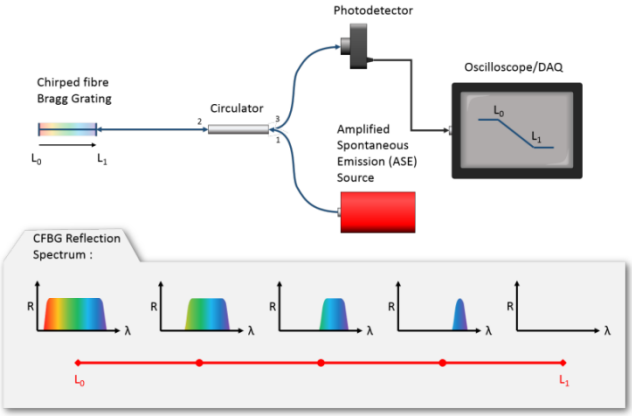


Рисунок 1. Типичная установка, используемая для измерения скорости детонации CFBG

Благодаря наличию высокоскоростных фотоприемников и осциллографов, эта система способна обеспечить скорость измерений в диапазоне ГГц – достаточно легко для достижения субмиллиметрового пространственного разрешения.

Использовании существующей системы измерения скорости CFBG и использовать моделирование для оптимизации конструкции решетки. С помощью моделирования Т-матрицы было обнаружено, что CFBG моделирования, было обнаружено, что CFBG подвержены эффектам нелинейной полосы пропускания, которые, как правило, недооценивают скорость детонации.

Однородная волоконная брэгговская решетка (UFBG) имеет одну резонансную длину волны, подобно методу CFBG, UFBG можно освещается широкополосным источником, так что полная отраженная мощность пропорциональна длине решетки следующим образом:

$$P(L) = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} R(\lambda, L) \cdot S_{psd}(\lambda) \cdot d\lambda,$$

где $S_{psd}$ - спектральная плотность мощности широкополосного зондирующего источника. В дальнейшем этот метод будет называться гибридным, поскольку он требует замены UFBG

непосредственно в установку CFBG. В качестве альтернативы, если использовать очень узкополосный источник для освещения UFBG на его Брэгга, то отраженная мощность пропорциональна длине решетки

Дискретные датчики TOA являются одними из самых ранних датчиков скорости детонации. (например, метод Д'Аутриче [8]) и до сих пор обеспечивают наиболее надежное определение средней скорости детонации. Это объясняется простотой их конструкции, коммерческой доступностью и нечувствительностью к изменениям коммерческой доступностью и нечувствительностью к градиентам деформации/температуры. В этих методах диапазон измерений определяется расстоянием между двумя оконечными зондами, пространственное разрешение определяется расстоянием между каждым из соседних зондов, а точность измерения определяется шириной зонда, точностью пространственного позиционирования и временем нарастания напряжения. шириной зонда, точностью пространственного позиционирования и временем нарастания параметров внутреннего оборудования.

Хотя оба метода CFBG и UFBG могут достичь пространственного разрешения ≤250 мкм, UFBG, вероятно, способен на более высокое разрешение в диапазоне измерений 1 мм. UFBG, вероятно, способен обеспечить более высокое разрешение в диапазоне измерений 1 мм. В этом случае, согласно результатам, приведенным в разделе 3, пространственная погрешность ∼1 мкм возможна при использовании UFBG - эквивалентное разрешение CFBG не будет так легко уменьшаться так просто, поскольку ограничения на полосу пропускания решетки диаметром 1 мм резко уменьшат мощность сигнала.

В качестве альтернативы дискретные методы TOA могут быть расширены для измерения средней скорости детонации - в частности, скорости в установившемся режиме. В этом случае желателен большой диапазон, чтобы максимизировать точность показаний средней скорости. Для такого применения особенно хорошо подходят дискретные методы TOA.

Таким образом, использование ФБГ позволяет достигать высокой точности измерений в условиях, где традиционные методы могут быть неэффективны или невозможны. Демонстрируется, как инновационные подходы в области волоконной оптики могут способствовать развитию новых технологий для контроля и анализа динамики детонации. Это открывает новые возможности для исследований и применения взрывчатых материалов, делая процессы более безопасными и контролируемыми. Статья вносит важный вклад в научное сообщество, предоставляя ценные данные и аналитические методы для будущих исследований в данной области.

**Использованные источники:**

1. В. Фикетт и В. К. Дэвис. Детонация: Теория и эксперимент. Dover Publications, 2000. ISBN: 0-486-41456-6.

2. L.F. Henderson, G. Ben-Dor, O. Igra, and T. Elperin. Справочник по ударным волнам, том 1. Academic Press, 2001. ISBN: 0-12-086431-2.

3. M. Suceska. Экспериментальное определение скорости детонации. Фрагбласт, 1(3):261, 1997.

4. C.A. Handley, B.D. Lambourn, N.J. Whitworth, H.R. James, and W.J. Belfield. Понимание ударной и детонационной реакции взрывчатых веществ на континуальном и мезомасштабе. Applied Physics Reviews, 5(1):011303, 2018.