

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИДРОФОНА

© 2011 г. В. А. Артеев; А. В. Куликов; И. К. Мешковский, доктор техн. наук;  
В. Е. Стригалева, канд. физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: a.kulikov86@gmail.com

Рассмотрен один из методов повышения чувствительности волоконно-оптического гидрофона путем формирования покрытий на чувствительной части волокна. Представлены результаты измерений чувствительности для некоторых типов покрытий. Экспериментальные результаты показали, что с помощью специальных покрытий можно достичь увеличения чувствительности на 25–30 дБ по сравнению с волокном в стандартном полиакрилатном покрытии.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический гидрофон, гидроакустическая чувствительность, модуль Юнга.

Коды OCIS: 060.2370.

Поступила в редакцию 20.09.2010.

### Введение

При проектировании современных гидрофонов на основе оптического волокна возникает задача повышения их чувствительности.

Для эффективного обнаружения объектов с помощью этих устройств необходимо расширять их частотный диапазон и максимизировать отклик на частотах от нескольких сотен до нескольких единиц герц. Проблема повышения гидроакустической чувствительности чаще всего решается с помощью покрытия оптического волокна, являющегося чувствительным элементом гидрофона, материалом с определенными свойствами.

Статья посвящена разработке метода и созданию стенда для проведения исследований спектральной чувствительности оптического волокна с различными покрытиями. Кроме того, представлены результаты измерений чувствительности для некоторых типов покрытий.

### Регистрация гидроакустического давления с помощью волоконно-оптического интерферометра (ВОИ)

Исследуемый волоконно-оптический гидрофон представляет собой интерферометр Маха-Цендера (рис. 1), одно из плеч которого

является опорным, а второе – сигнальным. Излучение источника (ИИ) через Y-разветвитель (2) поступает в оба плеча. Через X-разветвитель (6) излучение попадает на фотодетекторы (ФД), и с помощью осциллографа регистрируется картина интерференции. Под воздействием гидроакустического давления происходит изменение фазы световой волны в сигнальном плече, что приводит к соответствующему изменению наблюдаемой интерференционной картины.

В качестве опорного и сигнального плеч интерферометра используются стандартные одно-

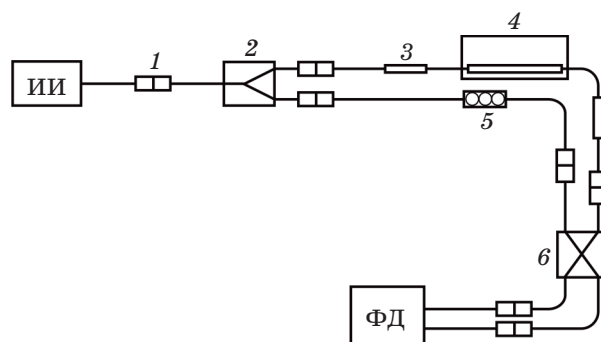
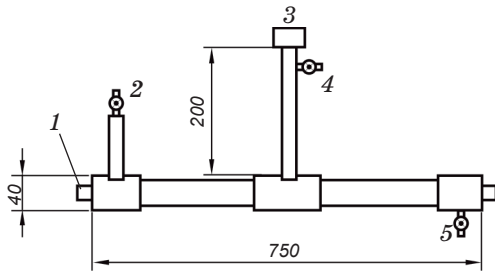


Рис. 1. Схема волоконно-оптического интерферометра. 1 – разъемное соединение, 2 – Y-разветвитель, 3 – место сварки, 4 – гидрокамера для определения чувствительности, 5 – контроллер поляризации, 6 – X-разветвитель.



**Рис. 2.** Схема гидрокамеры для определения чувствительности ВОИ. 1 – система герметизации волокна, 2 – отверстие для спуска воздуха, 3 – звукоизлучатель, 4 – отверстие для заливки воды, 5 – сливной кран.

модовые оптические волокна без сохранения поляризации марки SMF-28 ULL (производство фирмы “Corning”).

Установленный контроллер поляризации позволяет подстраивать поляризацию в опорном плече так, чтобы получать картину интерференции с максимальной контрастностью.

Для определения гидроакустической чувствительности данного волоконного интерферометра используется специально изготовленная герметичная камера, в которую помещается участок световода, играющего роль сигнального плеча (рис. 2). С помощью низкочастотного звукоизлучателя в камере создается акустическое давление.

Источником излучения в представленной схеме является узкополосный перестраиваемый лазер INTUL TL1550-B с длиной когерентности, позволяющей не учитывать незначительную разницу в длинах опорного и сигнальных плеч интерферометра. Мощность лазера на выходе устанавливается 2,5 мВт, а длина волны излучения – 1555 нм.

### Механизм взаимодействия акустической волны с оптическим волокном

Чтобы упростить задачу, рассмотрение механизма будем проводить для случая гидростатического давления. Основанием для этого служит то, что во всем звуковом динамическом диапазоне оптическое волокно ведет себя в поле переменных давлений так же, как в статическом [1]. Предположим, что на чувствительное плечо ВОИ воздействует какое-то постоянное внешнее давление  $P$ .

В рассматриваемом нами ВОИ в качестве параметра, изменяющегося под внешним воз-

действием, выступает фаза световой волны, распространяющейся по оптическому волокну. Фазовый сдвиг  $\Delta\Phi$  при единичном изменении давления  $\Delta P$  определяется как

$$\Delta\Phi/\Delta P = L\beta(1 - 2\mu)[n^2(2p_{12} + p_{11})/2 - 1]/E, \quad (1)$$

где  $p_{11}$ ,  $p_{12}$  – упругооптические коэффициенты кварца,  $E$  – модуль Юнга материала покрытия,  $\beta$  – постоянная распространения,  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала покрытия,  $L$  – длина покрытого участка волокна,  $n$  – коэффициент преломления сердцевины волокна.

Как следует из этого соотношения, сдвиг фазы можно менять соответствующим выбором размеров и свойств материала покрытия оптического волокна.

Внешнее гидростатическое давление при воздействии на световод вызывает в нем продольные и поперечные деформации и напряжения. В связи с этим смещение фазы обусловлено изменениями длины и показателя преломления световода, возникающими под действием давления [2].

При покрытии оптического волокна специальными материалами радиальное сжимающее давление на его кварцевую сердцевину увеличивается незначительно.

Иначе дело обстоит с продольной деформацией. Осевое напряжение в световоде с покрытием может стать много больше, чем в световоде без покрытия. Это вызвано тем, что в световоде с покрытием, как в любой композитной структуре, более жесткий компонент – кварцевая сердцевина, для которой модуль Юнга в 20–30 раз больше, чем у полимерного покрытия, – принимает на себя пропорционально большую часть продольной нагрузки. В свою очередь общая аксиальная нагрузка на оптическое волокно с покрытием возрастает по сравнению с непокрытым оптическим волокном во столько раз, во сколько увеличивается поперечное сечение. Таким образом, значительная часть давления, приложенного в продольном направлении к покрытой волоконной структуре, передается на оптическое волокно от покрытия, поэтому продольное напряжение и изменение длины оказываются больше, чем у непокрытого световода. Фазовый сдвиг увеличивается в 10–20 раз по сравнению с непокрытым оптическим волокном [3].

Однако, как уже упоминалось, есть и вторая сторона изменения фазового смещения. Так как в покрытом оптическом волокне поперечная составляющая напряжения возрастает

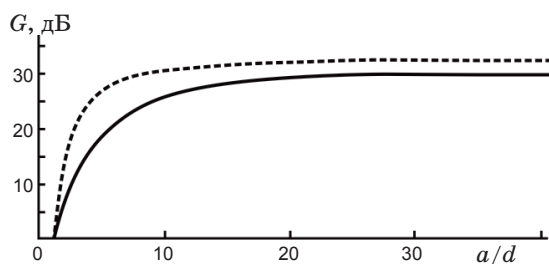


Рис. 3. Зависимости гидроакустической чувствительности оптического волокна от диаметра покрытия для двух разных материалов.

ет незначительно, сдвиг фазы из-за изменения показателя преломления происходит не так выражено, как из-за изменения длины, а общий фазовый сдвиг есть результат совместного действия этих двух разнонаправленных факторов [4].

Эффект увеличения фазового сдвига тем сильнее, чем больше разница модулей Юнга у материалов покрытия и световода, а также чем больше диаметр защитного покрытия. При отношении диаметров покрытия и световода  $a/d = 20:1$  наблюдается тенденция к насыщению процесса увеличения гидроакустической чувствительности  $G$  [4] (рис. 3).

### Изучение влияния материалов покрытия волокна на чувствительность гидрофона

Правильным подбором материала для покрытия чувствительного световода можно добиться значительного увеличения восприимчивости интерферометра к гидроакустическому воздействию. Как показано в работе [5], для увеличения чувствительности ВОИ от 10 до 100 раз материал покрытия должен иметь модуль упругости (модуль Юнга) от 10 до 100 раз меньший, чем у волокна, т. е. 0,5–9 ГПа.

Для изучения влияния материала покрытия оптического волокна на увеличение его чувствительности к гидроакустическому воздействию были подобраны два различных полимера. Следует отметить, что модули Юнга для данных материалов нам не были известны. По этой причине выбор образцов проводился косвенно: через показатель твердости, измеренной методом Шора.

Сущность метода заключается в измерении сопротивления материала погружению в нее индентора из закаленной стали. Измерение твердости резины, резиновых изделий и поли-

мерных материалов осуществляется методом Шора от 0 до 100 единиц.

Чтобы оценить влияние выбранных материалов на увеличение восприимчивости ВОИ к гидроакустическому давлению, было исследовано абсолютное значение чувствительности оптического волокна марки SMF-28 (производство фирмы “Fujicura”) в стандартном покрытии к гидроакустическому воздействию в диапазоне акустических частот 20–500 Гц. В последующем в качестве чувствительного плеча было использовано то же самое оптическое волокно, покрытое полимером № 1, имеющим твердость по Шору, равную 25, и волокно, покрытое полимером № 2 с твердостью 55. Полученные абсолютные значения гидроакустической чувствительности волокон в покрытии нормировались на полученные ранее абсолютные значения чувствительности оптического волокна марки SMF-28. Таким образом, по результатам экспериментов для этих двух материалов были построены графики зависимости относительного увеличения чувствительности  $G$  (в децибеллах) от частоты акустических колебаний (рис. 4).

Как видно из построенных зависимостей, максимальное увеличение чувствительности составляет порядка 28 дБ для световода в покрытии № 1 и около 22 дБ у световода, покрытого полимером № 2. Следует также отметить, что для обоих материалов наибольшее увеличение приходится на низкочастотную область от 20 до 300 Гц. Такой результат оказывается очень полезен при проектировании волоконно-оптических гидрофонов, потому что максимум излучения пеленгуемых объектов лежит в этом диапазоне [6].

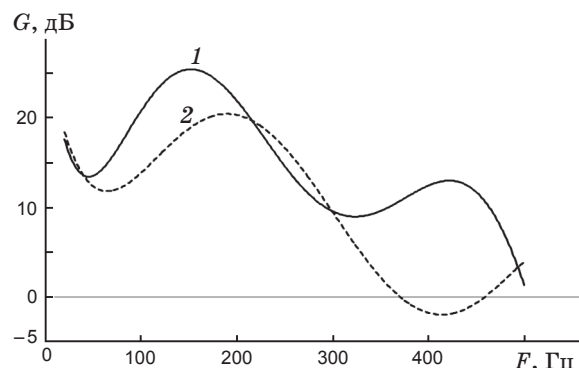
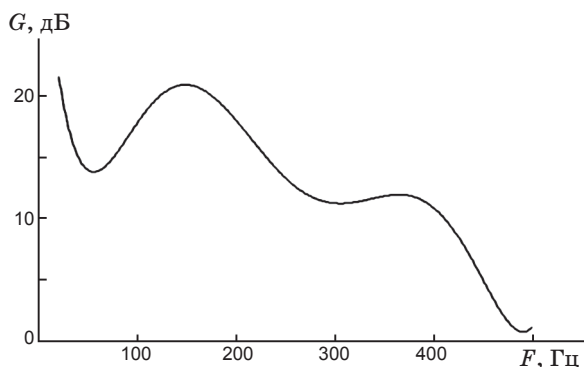


Рис. 4. Зависимости гидроакустической чувствительности оптического волокна от акустической частоты для двух материалов покрытия. 1 – полимер № 1, 2 – полимер № 2.



**Рис. 5.** Зависимость гидроакустической чувствительности световода от акустической частоты для композитной структуры покрытия.

Следует отметить, что так как практический интерес представляет не абсолютное, а относительное изменение чувствительности оптического волокна, то данные об абсолютном значении чувствительности волокна в стандартном покрытии в статье не приводятся.

Для оценки влияния на чувствительность гидрофона композитной структуры покрытия, состоящей из двух материалов, оптическое волокно в полимере № 1 было помещено в термоусадочную трубку из поливинилхлорида (ПВХ) с толщиной стенки 200 мкм. Увеличение чувствительности на разных частотах для этого случая показано на рис. 5. Видно, что в случае композитной структуры покрытия максимальное увеличение чувствительности составляет около 22 дБ, при этом наибольшее увеличение также приходится на низкочастотную область (20–300 Гц). Отсюда следует, что использование защитного покрытия из ПВХ толщиной 200 мкм допустимо и не влечет за собой существенного снижения гидроакустической чувствительности оптического волокна. Это в свою очередь весьма важно, потому что реальное применение гидрофонов невозможно без использования защиты для его чувствительного элемента.

## Заключение

Предложен и проверен метод увеличения чувствительности волоконно-оптического гидрофона к воздействию акустического давления. С этой целью была создана специальная герметичная гидрокамера, в которую помещалось исследуемое оптическое волокно. Для создания в камере гидроакустического давления использовался низкочастотный излучатель.

Высказаны предположения о механизме взаимодействия акустической волны и световода, покрытого полимерным покрытием, и обсуждены возможные причины увеличения фазового сдвига световой волны, распространяющейся по такому волокну.

Проведенные измерения показали, что для оптического волокна в покрытии из полимера можно увеличить чувствительности (по сравнению с оптическим волокном в обычном акрилатном покрытии) до 28 дБ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hughes R., Jarzynski J. Static pressure sensitivity amplification in interferometric fiber-optic hydrophones // *Appl. Opt.* 1980. V. 19. № 1. P. 98–107.
2. Hill D. J., Cranch G.A. Gain in hydrostatic pressure sensitivity of coated fibre Bragg grating // *Electron. lett.* 1999. V. 35. № 15. P. 372–373.
3. Lagakos N., Ehrenfeuchter P., Hickman T.R., Tveten A., Bucaro J.A. Planar flexible fiber-optic interferometric acoustic sensor // *Opt. lett.* 1988. V. 13. № 9. P. 788–790.
4. Hocker G.B. Fiber optic acoustic sensors with composite structure: an analysis // *Appl. Opt.* 1979. V. 18. № 21. P. 3679–3683.
5. Bucaro J.A., Hickman T.R. Measurement of sensitivity of optical fibers for acoustic detection // *Appl. Opt.* 1979. V. 18. № 6. P. 938–940.
6. Friedman N. Naval Institute Guide to World Naval Weapons Systems 1997–1998 // Naval Inst. Press. 1997. P. 623–808.