

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСИРОВАННОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

*К.А. Ходжсанепесов¹, А. Ниязгулыева¹,
Д.Н. Матвеев², И.И. Нуреев², Э.В. Белов², Т.А. Аглиуллин², Руслан Ш. Мисбахов²,
В.Ю. Виноградов², Г.Д. Коверин²*

¹Институт телекоммуникаций и информатики Туркменистана
Туркменистан, г. Ашгабат, Проспект Махтумкули, д. 68

²Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. В статье предлагается концепция построения комплексированного волоконно-оптического датчика для одновременного измерения относительной влажности и температуры воздуха, а также температуры солнечной батареи. Датчик представлен двойной структурой, состоящей из двухкаскадного интерферометра Фабри-Перо для измерения относительной влажности и температуры воздуха и двухкомпонентной волновой адресной волоконной брэгговской структуры для измерения температуры солнечной батареи. Датчик вставляется ортогонально плоскости фотоэлектрической панели солнечной батареи в сформированное в ней технологическое отверстие так, что расстояние между адресной волоконной брэгговской структурой и модулем интерферометров Фабри-Перо позволяет без перекрестных искажений одновременно измерять относительную влажность и температуру воздуха, а также температуру солнечной батареи. Изменение относительной влажности влияет только на показатель преломления внешнего интерферометра, тогда как изменение температуры воздуха влияет на показатель преломления обоих интерферометров. Изменение температуры солнечной батареи влияет только на центральную длину волны адресной волоконной брэгговской структуры. Решив систему уравнений по указанным параметрам, относительную влажность и температуру воздуха, а также температуру солнечной батареи можно контролировать одновременно. Приведены структура и конструкция комплексированного волоконно-оптического датчика, результаты первых экспериментов, подтвердившие возможность одновременного измерения рассматриваемых параметров, влияющих на эффективность работы солнечных батарей.

Ключевые слова: солнечная батарея, мониторинг эффективности преобразования, комплексированный волоконно-оптический датчик, двухслойный интерферометр Фабри-Перо, двухкомпонентная волновая адресная волоконная брэгговская структура, относительная влажность воздуха, температура воздуха, температура солнечной батареи.

Введение

Температура фотоэлектрической панели солнечной батареи (ТСБ), а также относительная влажность (ОВ) и температура воздуха (ТВ) вблизи ее поверхности, являются тремя наиболее важными параметрами мониторинга эффективности фотоэлектронного преобразования. Повышенные ТСБ и ТВ вызывают уменьшение ширины запрещенной зоны полупроводника, а ток насыщения увеличивается из-за меньшей энергии, необходимой для образования электронно-дырочных пар. При этом ток короткого замыкания незначительно

увеличивается, в то время как напряжение холостого хода уменьшается и приводит к заметному уменьшению доступного максимума мощности [1-3]. ОВ воздуха влияет на эффективность преобразования в солнечных батареях (СБ), во-первых, потому, что одна из полос поглощения солнечного излучения водяным паром лежит в диапазоне наиболее эффективной спектральной области работы батарей, а во-вторых, потому, что она влияет на процессы теплообмена между батареей и воздухом [4]. По сравнению с электронными гигрометрами и термометрами волоконно-оптические датчики относительной влажности и температуры (ВОД ОВиТ) обладают такими преимуществами, как устойчивость к электромагнитным помехам, высокая чувствительность, быстродействие и т. д. [5]. В [6] сообщается о нескольких типах ВОД ОВиТ, таких как интерферометры Маха-Цендера (ИМЦ), интерферометры Фабри-Перо (ИФП), волоконные брэгговские решетки (ВБР) и другие более сложные структуры.

В большинстве своем эти датчики не могут одновременно измерять ОВиТ. ОВ определяется как процентное отношение текущего давления водяного пара к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре. Это означает, что для обеспечения точности измерения ОВ необходимо одновременно измерять соответствующую температуру. Кроме того, температура также может влиять на точность традиционных ВОД ОВ из-за термооптического эффекта материала волокна. В [7] предложен ВОД на основе каскадных С-образных ИФП для одновременного измерения ОВ и температура. Два вида твердых полимерных материалов были использованы для заполнения С-образных ИФП и измерения обоих параметров. Однако диапазон измерения ОВ был небольшим (от 20% до 45%), а чувствительность датчика ОВ была низкой. В [8] ВБР, записанная в полимерном оптическом волокне, была покрыта kleem, отверждаемым УФ-излучением, для получения чирпированых ВБР для двухпараметрического измерения. Чувствительность к ОВ двух отдельных активных областей сенсора составляла $11,8 \pm 0,2$ пм/% и $13,7 \pm 0,5$ пм/%, а чувствительность к деформации составляла $0,719 \pm 0,020$ пм/ μ е и $0,122 \pm 0,005$ пм/ μ е. Однако зависимость между центральной длиной волны ВБР и температурой не является монотонной, а чувствительность датчика по ОВ осталась низкой по сравнению с другими датчиками с двойными параметрами. В [9] представлена компактная система для одновременного измерения относительной влажности и температуры, состоящая из ИФП и ИМЦ. Структура ИМЦ была образована путем сращивания одномодовых волокон со смещением сердцевин. Область смещения сердцевины была покрыта чувствительным материалом из ПВА, заполненного графеновыми наночастицами. Чувствительность датчика к ОВ составила $-0,132$ нм/%, а температурная чувствительность $+0,37$ нм/ $^{\circ}$ С. Однако датчик получился хрупким из-за смещения сердцевины. В [10] представили датчик для одновременного измерения относительной влажности и температуры, который состоит из ВБР и ИФП. ИФП формировался в одномодовом волокне из полого капилляра и полиимидной пленки, заполняющей конец полого капилляра. При соединении ВБР, чувствительной к температуре, датчик может одновременно измерять ОВиТ. Однако его изготовление достаточно сложно, а чувствительность по обоим параметрам низкая.

Благодаря способности реагировать на параметры окружающей среды многие полимерные материалы используются для измерения ОВиТ. В [11] предложен ВОД ОВ со структурой ИФП. ИФП формировался нанесением пленки из чистого ПВА на торец одномодового волокна. На рис. 1, а,б показаны соответственно структура и спектральная форма отклика ИФП.

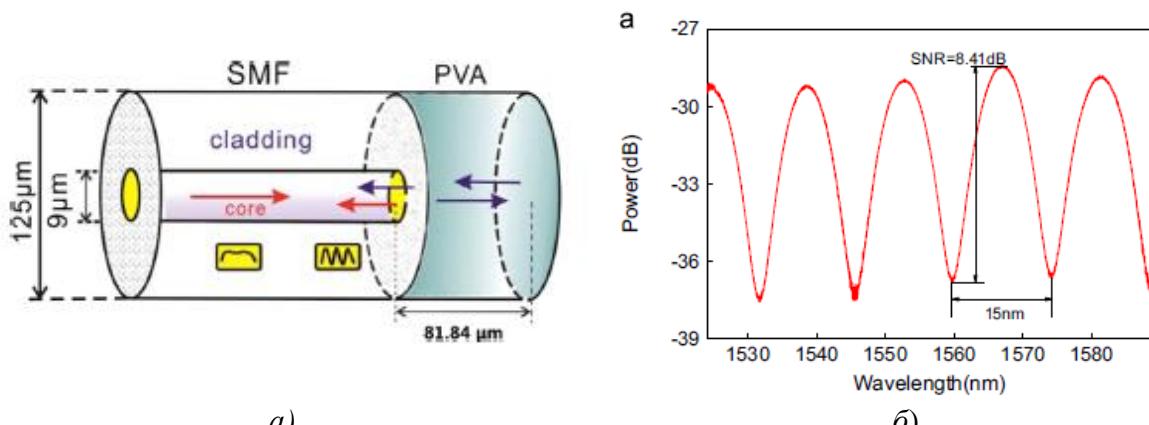


Рис. 1. Датчик на концевом ИФП: структура (а) и спектральная форма отклика (б) [11]

В описанном в [11] эксперименте чувствительность датчика ИФП по относительной влажности составила 70 пм/% в диапазоне от 7% до 91,2%. Однако их чувствительность по ОВ необходимо поднимать и формировать возможность измерения температуры. Таким образом, структура ВОД ОВиТ в конфигурации концевого ИФП в перспективе должна отличаться простой конструкцией, использованием недорогих поглощающих высокочувствительных материалов, долговечностью, простотой в обслуживании, а их разработка является актуальной задачей.

В данной работе предлагается концепция построения комплексированного волоконно-оптического датчика для одновременного измерения относительной влажности и температуры с двойной структурой, состоящей из двухкаскадного интерферометра Фабри-Перо для измерения относительной влажности и температуры воздуха и двухкомпонентной волновой адресной волоконной брэгговской структуры (АВБС) [12-17] для измерения температуры солнечной батареи. Датчик вставляется ортогонально плоскости фотоэлектрической панели солнечной батареи в сформированное в ней технологическое отверстие так, что АВБС измеряет температуру солнечной батареи, а двойной интерферометр Фабри-Перо - относительную влажность и температуру воздуха. Изменение относительной влажности влияет только на показатель преломления внешнего слоя интерферометра Фабри-Перо, тогда как изменение температуры воздуха влияет на показатель преломления его обоих слоев. Изменение температуры солнечной батареи влияет только на центральную длину волны АВБС. Решение системы уравнений по указанным параметрам, позволяет контролировать относительную влажность и температуру воздуха, а также температуру солнечной батареи одновременно.

1. Практика построения ВОД для одновременного измерения относительной влажности и температуры на основе ИФП и ВБР структур

В последние годы исследования многопараметрических датчиков получили всестороннее внимание и широкое распространение. В [18] представлен ИФП, который состоит из оптического резонатора, образованного двумя близко расположеными зеркалами, а в [19] сообщено об ИМЦ на основе двухсердцевинного световода. В [20] описан комплексный ВОД на основе оптического волокна, в котором встроена структура в форме «ореха», каскадированная с длиннопериодной волоконной решеткой, а в [21] – ВБР, соединенная с фотонным кристаллом для одновременного измерения двух параметров. Большинство методов, упомянутых выше, увеличивают сложность изготовления ВОД и демодуляции сигналов. Более того, чувствительность получаемых параметров чрезвычайно низка и не очень подходит для различимого одновременного измерения ОВиТ.

Таким образом, для одновременного мониторинга двух нужных нам физических параметров необходимы как минимум две простые, известные практикой применения волоконные структуры. Комбинация структур ИФП и ВБР – это новый метод для достижения двухпараметрического измерения [11]. Комплексированные ВОД (КВОД) на основе ВБР, каскадированные со структурой ИФП для одновременного измерения двух параметров, активно развиваются. Как показывают оценки, перспективная для мониторинга параметров СБ чувствительная структура должна состоять из внешнего ИФП в виде полусферической тонкой пленки, реагирующей на ОВ, записанной на торце ВБР. Пик спектральной интерференции, создаваемый тонкопленочным ИФП, чувствителен к воздуху, в частности к изменению его ОВ, тогда как спектр отражения ВБР зависит только от температуры и слабо чувствителен к изменению внешнего давления, поэтому ОВиТ можно измерять одновременно.

Используя температурно-зависимую чувствительность ВБР, построенная матрица чувствительности для КВОД используется для различения измерений по ОВиТ. Эта сенсорная архитектура может служить не только эффективным методом одноточечного многопараметрического измерения, но также имеет такие достоинства, как возможность мультиплексирования по длине волны ВБР. Однако в этом случае стоимость системы значительно увеличивается в связи с необходимостью использования сверхдорогого оптоэлектронного интерроратора и необходимости разделения спектральных откликов от ВБР и ИФП [22].

Способ изготовления ИФП на основе графеновой диафрагмы входит в число современных вариантов для измерений из-за их преимуществ: небольшого размера, высокой чувствительности и быстрого отклика. Однако, по сравнению с графеном, прозрачный УФ-отверждаемый клей привлек значительное внимание благодаря уникальным преимуществам упрощенного производственного процесса, низкой стоимости, быстрого отверждения, низкого энергопотребления и отсутствию растворителя, малым загрязнениям окружающей среды. В [23] сообщается о неотерическом методе создания полимерного ИФП из УФ-клейя на конце одномодового волокна, с записанной в ней ВБР для одновременного и однозначного измерения двух параметров.

На рис. 2, а-в показаны соответственно снимок датчика на концевом РФП с помощью микроскопа, его структура и спектральная форма отклика [23].

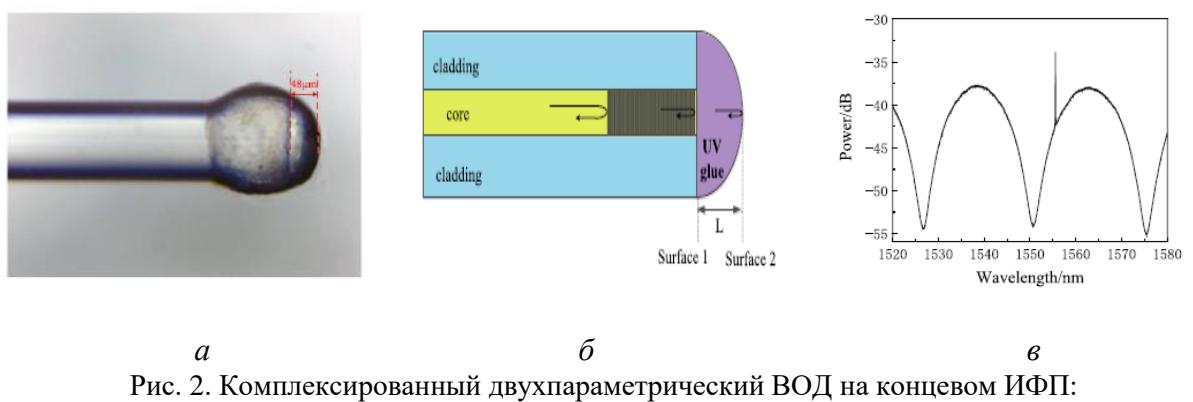


Рис. 2. Комплексированный двухпараметрический ВОД на концевом ИФП: снимок с помощью микроскопа (а), структура (б) и спектральная форма отклика (в) [23]

Подводя итог, можно сказать, что двухпараметрический КВОД изготавливается методом лазерной записи ВБР с исполнением ИФП на ее конце путем формирования полимерной пленки методом УФ-отверждения. Поскольку два устройства интегрированы вместе, каскадный датчик может обеспечить одноточечное одновременное измерение темпера-

туры и давления. Примечательно, что введение ВБР нечувствительной к ОВ, но чувствительной к температуре, позволяет использовать ее как температурный контроль и компенсацию температуры при измерении ОВ.

Благодаря различным особенностям, таким как небольшой размер, простота изготовления, низкая текучесть материалов и т.д., предлагаемый датчик позволяет получить много функциональных приложений в разных областях. Например, он может быть взят за основу для решения нашей задачи контроля ОВ, ТВ и ТСБ. При этом на первой стадии модернизации ВБР может быть заменена на АВБС. Преимущество такой замены описаны в ряде работ [12-17] и связаны с получением адресности измерений, переходом к радиофотонным методам мультиплексирования и измерений, упрощением и значительным снижением стоимости интерропратора радиофотонного типа, который заменяет типовой оптоэлектронный.

На рис. 3, *а-в* показаны соответственно общий вид конструкции КВОД, его структура и спектральная форма отклика [24].

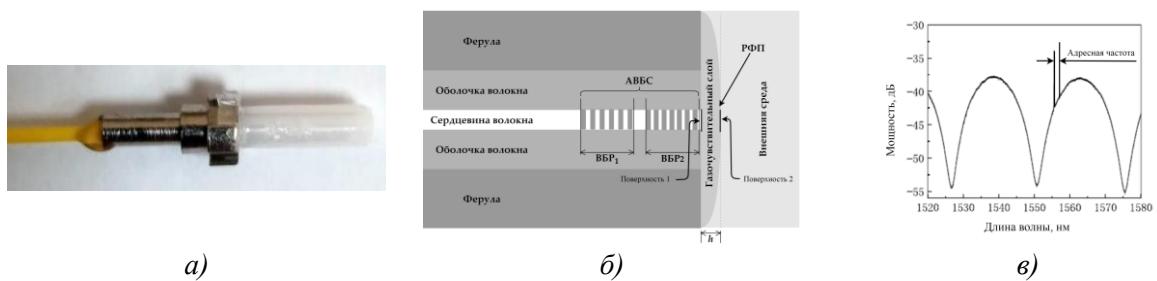


Рис. 3. Комплексированный двухпараметрический ВОД на концевом ИФП: общий вид (*а*), структура (*б*) и спектральная форма отклика (*в*) [24]

Проведенное моделирование спектрального отклика КВОД с разрешением 1 пм в диапазоне 1520–1580 нм показало, что отраженный спектр при комнатной температуре и стандартном давлении в 1 атм показывает сверхвысокие спектральные контрасты около 18 и 9 дБ для ИФП и АВБС соответственно. Отраженный спектр представлен на рис. 3, *в* для случая типовой ОВ в воздухе.

На второй стадии модернизации необходимо обеспечить раздельное измерение температуры воздуха и солнечной батареи. Для этого предлагается использовать как базовый вариант двухслойный ИФП для одновременного измерения ОВиТ, представленный в [5].

На рис. 4, *а-в* показаны соответственно общий вид конструкции КВОД, его структура и спектральная форма отклика [5].

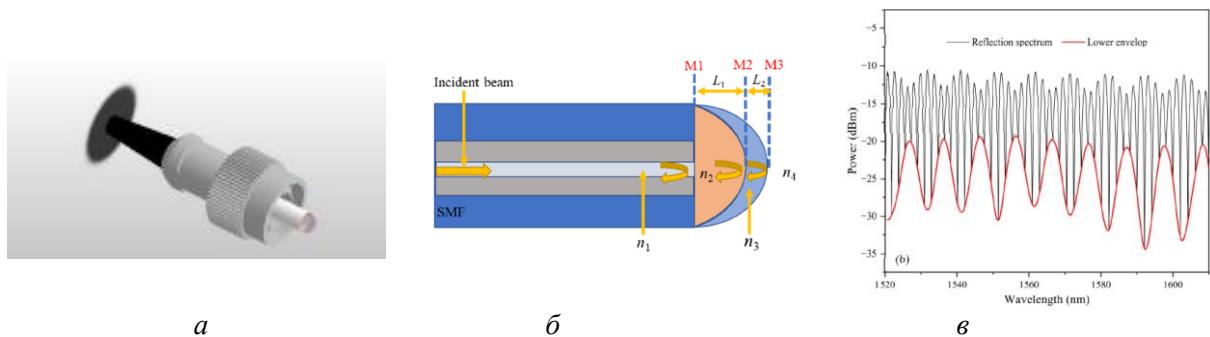


Рис. 4. Комплексированный двухпараметрический ВОД на двухслойном концевом ИФП: общий вид (*а*), структура (*б*) и спектральная форма отклика (*в*) [5]

Как видно в данном ВОД используется эффект Вернье для повышения чувствительности измерений. Этот метод использует наложение двух или более подобных интерферометров для повышения чувствительности датчика.

2. Моделирование отклика КВОД на ОВ, ТВ и ТСБ

Структурная схема ПУ КВОД, приведена на рис. 5.

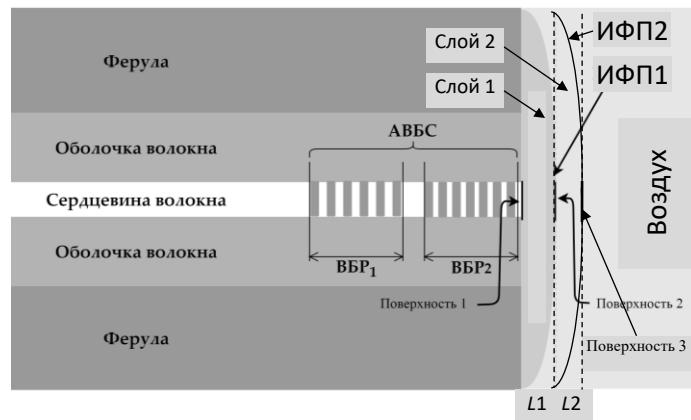


Рис. 5. Структурная схема КВОД

КВОД, разрабатываемый нами можно представить в виде многослойной структуры, состоящей из пяти различных участков, по которым распространяется широкополосное излучение лазерного диода: сердцевина волокна, структура АВС ($ВВР_1$ и $ВВР_2$) и ИФП (ИФП₁ и ИФП₂). На торец оптического волокна нанесена тонкая пленка прозрачного органического полимерного материала, толщиной L_1 – прозрачный УФ-отверждаемый клей ИФП₁, сверху на него нанесена вторая тонкая пленка прозрачного органического полимерного материала, толщиной L_2 – ПВА. Показатели преломления пленок и их толщины зависят от ТВ и ОВ соответственно.

Как показано на рис. 5, датчик состоит из созданной на торце волокна АВС, комбинированной с двумя ИФП в виде полимерных пленок. ИФП состоит из трех отражающих поверхностей: поверхность 1 – это переход между волокном и первой полимерной пленкой; поверхность 2 является границей раздела между первой и второй полимерной пленкой; поверхность 3 – граница между второй полимерной пленкой и воздухом.

Падающий широкополосный свет изначально отражается от АВС на двух длинах волн ее адресных компонент. Затем прошедший свет отражается от трех поверхностей (поверхности 1-3) ИФП, при этом три отраженных луча интерферируют друг с другом из-за разной фазовой задержки, вызванной различной разницей оптических путей. Поскольку отражательная способность поверхности оптического волокна и поверхности полимерных пленок относительно низкие, влиянием многократного отражения падающего излучения на трех поверхностях можно пренебречь, что говорит о необходимости учета только интенсивностей отраженных лучей первого порядка. Следовательно, интенсивность выходного излучения датчика может быть приблизительно выражена как некий комбинированный спектр:

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \left[\rho_{\text{ВВР}1} + \rho_{\text{ВВР}2} + (1 - \rho_{\text{ВВР}1} - \rho_{\text{ВВР}2})^2 \rho_{\text{ИФП}} \right], \quad (1)$$

где $\rho_{\text{ВВР}1}$, $\rho_{\text{ВВР}2}$, $\rho_{\text{ИФП}}$ – спектральные коэффициенты отражения первой и второй ВБР – компонент АВС и модуля из двух ИФП.

Данные коэффициенты соответственно определяются как:

$$\rho_{\text{ВБР}i} = R_i \exp \left[-(\lambda - \lambda_{\text{ВБР}i})^2 / \Delta\omega^2 \right], \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ИФП}} = & \rho_1 + \rho_{\text{ИФП1}}^2 + \rho_{\text{ИФП2}}^2 + 2\sqrt{\rho_1}\rho_{\text{ИФП2}} \cos[2(\varphi_{\text{ИФП1}} + \varphi_{\text{ИФП2}})] + \\ & + 2\sqrt{\rho_1}\rho_{\text{ИФП1}} \cos[2\varphi_{\text{ИФП1}}] + 2\rho_{\text{ИФП1}}\rho_{\text{ИФП2}} \cos[2\varphi_{\text{ИФП2}}], \end{aligned} \quad (3)$$

где R_i – пиковая отражательная способность первой и второй ВБР ($i = 1, 2$, $R_i = 0,6-0,8$); $\lambda_{\text{ВБР}i}$ и $\Delta\omega$ – их центральные длины волн и ширина полосы пропускания, равная для обеих ВБР; ρ_1 – отражательная способность на конце одномодового волокна и внешней поверхности первого ИФП; $\rho_{\text{ИФП}i}$ и $\varphi_{\text{ИФП}i}$ – отражательная способность и фазовый набег в интерферометрах ИФП модуля:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ИФП1}} &= (1 - \rho_1)\sqrt{\rho_2}; \\ \rho_{\text{ИФП2}} &= (1 - \rho_1)(1 - \rho_2)\sqrt{\rho_3}; \\ \varphi_{\text{ИФП}j} &= 2\pi n_{j+1} L_j / \lambda; \quad j = 1, 2. \end{aligned} \quad (4)$$

При этом

$$\rho_k = (n_k - n_{k+1}) / (n_k + n_{k+1}); \quad k = 1, 2, 3. \quad (5)$$

В (5) ρ_k и n_k – коэффициенты трех поверхностей, образующих два ИФП, и показатели преломления формирующих их сред.

Итак, можно сделать вывод, что окончательный спектр датчика представляет собой наложение спектров отражения АВС и двух ИФП (2)-(5). Реакция датчика на изменение ОВ может быть связана с упруго-оптическим эффектом, что приведет к изменению толщины полимерной пленки ИФП1. Температурный отклик КВОД можно отнести к термическому эффекту расширения и термооптическому эффекту полимерной пленки и используемого покрытия, что также приведет к изменению длины ИФП2 и центральной длины ВБР1 и ВБР2.

Сдвиг центральной длины волны компонент АВС может быть задан как [17]:

$$\Delta\lambda_{\text{FBG}i} = 2\delta n_{\text{eff}} \Lambda_i, \quad (6)$$

где Λ_i – период первой и второй ВБР, δn_{eff} – изменение эффективного показателя преломления сердцевины волокна.

Одновременное измерение ОВ, как изменения толщины полимерной пленки, и ТВ может быть реализовано путем измерения изменения длины волны огибающей, вызванной интерференцией отраженных от модуля ИФП волн, а ТСБ – сдвига центральной длины волны АВС. Когда изменения длины волны огибающей модуля ИФП $\Delta\lambda_{\text{ИФП}}$ и сдвига центральной длины волны АВС $\Delta\lambda_{\text{АВС}}$ ($\Delta\lambda_{\text{АВС}} = \Delta\lambda_{\text{ВБР}1} = \Delta\lambda_{\text{ВБР}2}$, что следует из теории АВС [12-17]) определены, можно построить матрицу чувствительности датчика в целом.

Коэффициенты матрицы могут быть определены через индивидуальное измерение характеристик датчика по ОВиТ путем калибровки изменений длины волны огибающей, вызванной интерференцией отраженных от модуля ИФП волн и сдвига центральной длины волны АВС.

Поскольку ИФП1 нечувствителен к ОВ, то изменения спектра отраженного сигнала происходят за счет изменения n_3 и L_3 . Чувствительность к ОВ можно выразить следующим образом:

$$S_{\text{ОВ}} = M\lambda_m (n_3 L_2 + n_3 \Delta L_2) / (n_2 L_1 + n_3 \Delta L_2). \quad (7)$$

Чувствительность к ОВ представляет собой комбинированный эффект изменения преломляющего коэффициента и длины ИФП2 после того, как пленка поглотила молекулы воды. Чувствительность к ТВ можно получить аналогичным образом, но с учетом того, что обе полости чувствительны к температуре:

$$S_{\text{ТВ}} = M \lambda_m (\Delta n_2 L_1 + n_2 \Delta L_1 + \Delta n_3 L_2 + n_3 \Delta L_2) / (n_2 L_1 + n_3 L_2). \quad (8)$$

Температурная чувствительность обусловлена тепловым расширением и термооптическим эффектом полимерных пленок.

Смещение брэгговской длины волны АВБС происходит из-за температурного расширения кварца, вызывающего изменение периода решётки, а также изменения показателя преломления волокна. Смещение (6) при изменении $\Delta \text{ТСБ}$ может быть записано как:

$$\Delta \lambda_{\text{АВБС}} = \lambda_{\text{АВБС}} (\alpha + \xi) \Delta \text{ТСБ}, \quad (9)$$

где $\alpha = (1/\Lambda)(\delta \Lambda / \delta T)$ – коэффициент термического расширения (для кварца $\alpha = 0,55 \times 10^{-6}$), $\xi = (1/n)(\delta n / \delta T)$ – термооптический коэффициент (для волокон с добавками германия примерно равный $8,6 \times 10^{-6}$) [25]. Видно, что изменение показателя преломления волокна является доминирующим эффектом. Из уравнения (9) можно рассчитать, что температурный сдвиг АВБС в одномодовом оптическом волокне составляет $\sim 13,7 \text{ пм/}^{\circ}\text{C}$.

3. Описание эксперимента и обсуждение результатов

Изготовление КВОД на АВБС может быть выполнено по двум технологиям, аналогичным изготовлению КВОД на ВБР. При использовании ультрафиолетового непрерывного лазера процесс начинается с записи АВБС, на конце которой затем формируется два ИФП. В ряде случаев для формирования ИФП требуется высокая температура, которая может «стереть» часть АВБС. По этой причине ИФП обычно изготавливается на расстоянии от 1 до 4 см от конца АВБС. Расстояние для записи АВБС от конца волокна определяется толщиной фотоэлектрической панели СБ. Центральная длина волны АВБС в этом случае зависит только от ТСБ.

АВБС записывается в диапазоне 1550 нм, что обусловлено как наличием развитой элементной базы для сенсорных и телекоммуникационных систем этого диапазона, так и наличием спектральных откликов полимеров ИФП в нем.

Эскиз и фото КВОД, расположенного в технологическом отверстии (ТО) СБ и зафиксированного в нем пластичным компаундом с УФ-отверждением, представлены на рис. 6, *а* и рис. 6, *б* соответственно.

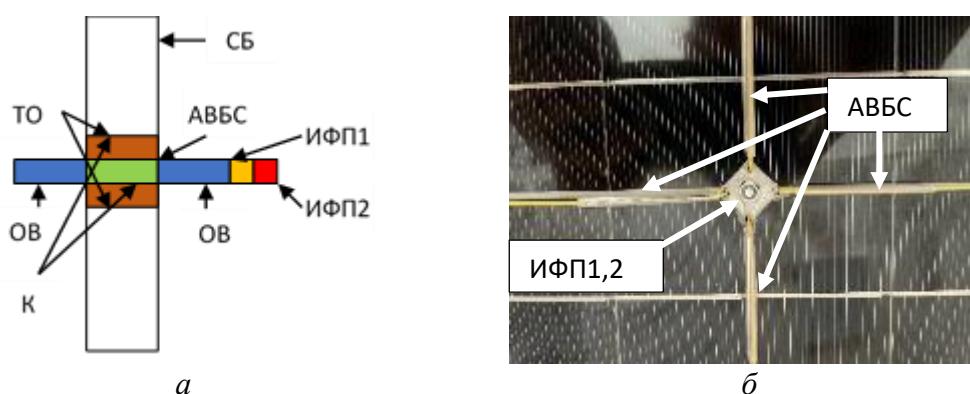
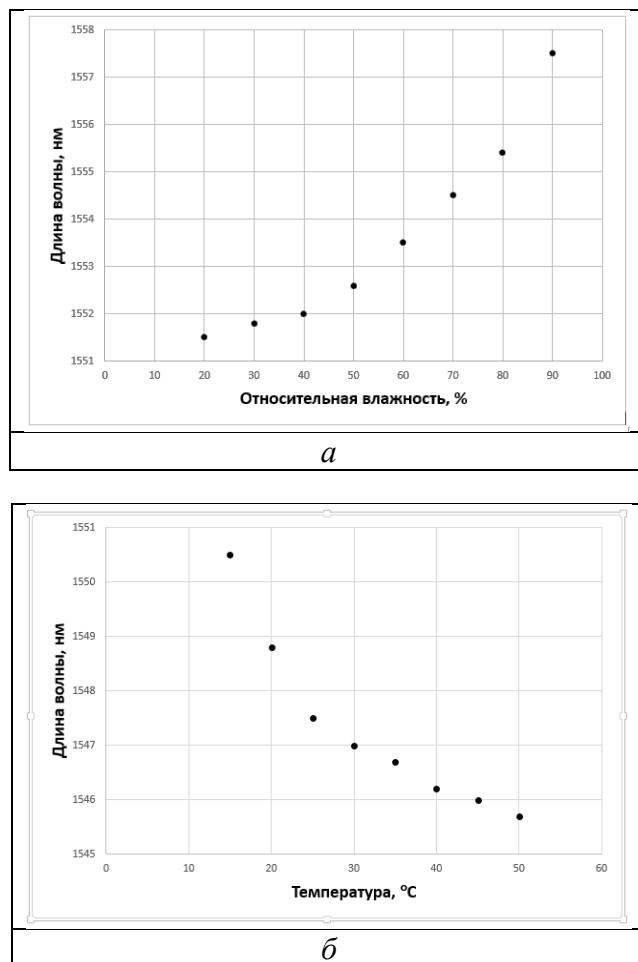


Рис. 6. КВОД: эскиз (*а*) и фото установки на СБ (*б*).
К – компаунд; ОВ – оптическое волокно

Следует отметить, что на рис. 6,б показан лишь один вариант установки КВОД, состоящего из модуля интерферометров в центре и четырех отдельных АВБС, расположенных на лучевых волокнах, для тонкой многослойной СБ. Вариант, соответствующий рис. 6,а, не показан, но его центральная часть аналогична рис. 6,б, АВБС записана за модулем интерферометров, а лучевые АВБС могут быть исключены или использованы для контроля уровня солнечной радиации при их покрытии специальными поглощающими веществами в различных окнах прозрачности атмосферы. Дополнительный вариант использования лучевых АВБС – это мониторинг скорости ветра по разности измеренных температур в момент его динамического изменения, что становится возможным при использовании только радиофотонного адресного интерроргатора.

На рис. 7, а-в показаны измерительные спектральные характеристики КВОД, полученные на экспериментальном стенде при помещении СБ в климатическую камеру ACS Challenge с возможностью изменения и контроля температуры и ОВ.

Реакция на ОВ и ТВ тесно связаны со свойствами УФ-клей и полимера, выбранных для изготовления пленок ИФП1 и ИФП2. Как видно из рис. 7, а,б спектральные зависимости КВОД по ОВ и ТВ, полученные с помощью модуля ИФП имеют нелинейный характер и производные с разными знаками, которая по влажности определяется в основном свойствами ПВА, а по температуре – акрилата. Кривые могут быть хорошо аппроксимированы кубическим многочленом. Таким образом, датчики из определенных материалов необходимо калибровать особым образом, но принцип работы должен быть общим, если используется одна и та же конструкция. Чувствительность по каждому пику огибающей модуля ИФП при заданной температуре можно рассчитать, взяв производную от соответствующего полиномиального уравнения подгонки.



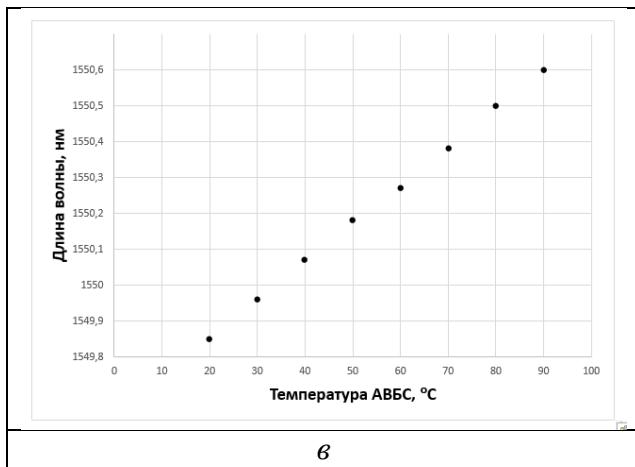


Рис. 7. Спектральная зависимость отклика КВОД на изменение ОВ (а), ТВ (б) и ТСБ (в), снятые в области 1550 нм

Спектральная характеристика АВБС по ТСБ линейна, что подтверждается графиком на рис. 7, в. Ее чувствительность зависит от свойств оптического волокна и компаунда, который передает на нее тепловое воздействие от солнечной батареи. Особое внимание должно быть уделено длине АВБС, которая должна быть максимально совместима с толщиной СБ (типовая длина 5 мм). При этом толщина самого слоя фотопреобразования очень мала (от единиц до сотен микрон) и конкретно его температуру очень сложно выделить из температуры всего конструктива (до 30 мм). Однако, если речь идет об инерционном процессе нагрева, температура слоя фотопреобразования будет равна температуре конструктива.

Заключение

В статье предложен и экспериментально исследован КВОД для одновременного измерения ОВ, ТВ и ТСБ. ИФП КВОД изготовлен путем простого отверждения двух типов полимерных пленок с разными показателями преломления и толщины на торце одномодового оптического волокна. Внутренний слой – ИФП1 – имеет более низкий показатель преломления и большую толщину (акрилат), тогда как внешний слой – ИФП2 – имеет более высокий показатель преломления и меньшую толщину (ПВА). Одновременные измерения ОВ и ТВ были выполнены путем калибровки двух характерных длин волн на огибающей спектра отражения модуля ИФП и последующего решения набора нелинейных уравнений. Дополнительно и одновременно с указанными параметрами измеряется ТСБ с помощью анализа центральной длины волны АВБС, записанной на некотором удалении от модуля ИФП.

Датчик имеет такие достоинства, как простота конструкции, простота изготовления и высокая чувствительность. Он может найти применение в мониторинге решеток СБ путем организации пассивной оптической сенсорной сети, поскольку обладает функциями адресных измерений, основанных на радиофотонном подходе.

Для определения температуры слоя фотопреобразования из температуры конструктива может быть применена чирпирпованная АВБС [26, 27], разработка которой для решения поставленных в этой работе задач видится достаточно перспективной.

Список литературы

1. Ходжанепесов, К. Влияние температуры окружающего воздуха и скорости ветра на параметры солнечного элемента / К. Ходжанепесов // Инновации в сельском хозяйстве. - 2017. - № 2.- С. 173-181.
2. Ходжанепесов, К. Влияния параметров атмосферы на энергетические характеристики кремниевой солнечной батареи / Я. Чарыев, К. Ходжанепесов, В. Гайджов, Р. Гайджова // Инновации в сельском хозяйстве. - 2016. - № 1.- С. 176-178.
3. Ходжанепесов, К. Влияния параметров атмосферы на энергетические характеристики кремниевой солнечной батареи / Я. Чарыев, К. Ходжанепесов // Инновации в сельском хозяйстве. - 2016. - № 5. - С. 219-223.
4. Zaimi, M. Determining combined effects of solar radiation and panel junction temperature on all model-parameters to forecast peak power and photovoltaic yield of solar panel under non-standard conditions / M. Zaimi, H. El Achouby, A. Ibral, E.M. Assaid // Sol. Energy. - 2019. V. 191. - P. 341-359.
5. Zhang, Teng. A Fabry-Perot sensor with cascaded polymer films based on Vernier effect for simultaneous measurement of relative humidity and temperature / Teng Zhang, Qun Han, Zhizhuang Liang, Junfeng Jiang and Zhenzhou Cheng // Sensors. - 2023. - V. 23. - P. 2800.
6. Dhanalakshmi, S. Thermal management of solar photovoltaic panels using a fibre Bragg grating sensor-based temperature monitoring / S. Dhanalakshmi, V. Chakravartula, R. Narayananamoorthi, R. Kumar, G. Dooly, D.B. Duraibabu, R. Senthil // Case Studies in Thermal Engineering. - 2022. - P. 31101834.
7. Li, F. Simultaneous measurement of temperature and relative humidity using cascaded C-shaped Fabry-Perot interferometers / F. Li, X.G. Li, X. Zhou et al. // J. Lightwave Technol. 2022. V. 40. P. 1209-1215.
8. Min, R. Chirped POF Bragg grating production utilizing UV cure adhesive coating for multiparameter sensing / R. Min, L. Pereira, T.G. Paixao, et al. // Opt. Fiber Technol. - 2021. - V.65. - P. 7.
9. Tong, R.J. Simultaneous measurement of temperature and relative humidity by compact Mach-Zehnder interferometer and Fabry-Perot interferometer / R.J. Tong, Y. Zhao, H.K. Zheng, F. Xia // Measurement. - 2020. - V. 155. - P. 6.
10. Wang, Y. Simultaneous measurement of temperature and relative humidity based on FBG and FP interferometer / Y. Wang, Q. Huang, W.J. Zhu, M.H. Yang // IEEE Photonics Technol. Lett. - 2018. - V. 30. - P. 833-836.
11. Dan, Su. A fiber Fabry-Perot interferometer based on a PVA coating for humidity measurement / Su Dan, Qiao Xueguang, Rong Qiangzhou, et al. // Optics Communications. - 2013. - V. 311. - P. 107-110.
12. Мисбахов, Р.Ш. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей / Р. Ш. Мисбахов, Р. Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов и др. // Инженерный вестник Дона. - 2017. - № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343.
13. Морозов, О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазиаспределенных радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. - 2019. - Т. 43. № 4. - С. 535-543.
14. Аглиуллин, Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Труды учебных заведений связи. - 2020. - Т. 6. № 1. - С. 6–13.
15. Morozov, O. Multi-addressed fiber Bragg structures for microwave-photonic sensor systems / O. Morozov, A. Sakhabutdinov, V. Anfinogentov et al. // Sensors. - 2020. - Vol. 20. - P. 2693.

16. Сахабутдинов, А.Ж. Иерархический классификатор задач построения радиофотонных сенсорных систем на основе адресных волоконных брэгговских структур / А.Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. - 2018. - № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5141.
17. Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры на основе двух идентичных сверхузкополосных решеток / А.Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. - 2018. - № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5142.
18. Wu, C. High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry-Perot interferometer based on photonic crystal fiber / C. Wu, H.Y. Fu, K.K. Qureshi, B.-O. Guan, H.Y. Tam // Optics Letters. - 2011. - V. 36. № 3. - P. 412-414.
19. Li, Z. Highly-sensitive gas pressure sensor using twin-core fiber based in-line Mach-Zehnder interferometer / Z. Li, C. Liao, Y. Wang, et al. // Optics Express. - 2015. - Vol. 23. № 5. - P. 6673-6678.
20. Cao, Y. Optical fiber magnetic field sensors with peanut-shape structure cascaded with LPFG / Y. Cao, Y. Zhao, Z. Tong, Y. Wang // Optoelectronics Letters. 2016. V. 12. № 5. P. 358-360.
21. Wu, S. FBG incorporated side-open Fabry-Perot cavity for simultaneous gas pressure and temperature measurements / S. Wu, G. Yan, C. Wang, et al. // Journal of Lightwave Technology. - 2016. - V. 34. № 16. - P. 3761-3767.
22. Tian, K. Simultaneous measurement of displacement and temperature based on a balloon-shaped bent SMF structure incorporating an LPG / K. Tian, G. Farrell, W. Yang, et al. // Journal of Lightwave Technology. - 2018. - V. 36. № 20. - P. 4960-4966.
23. Liu, Y. Fabrication of dual-parameter fiber-optic sensor by cascading FBG with FPI for simultaneous measurement of temperature and gas pressure / Y. Liu, D. Yang, Y. Wang, et al. // Optics Communications. - 2019. - V. 443. - P. 166-171.
24. Шагидуллин, А.Р. Постановка задач проектирования волоконно-оптических комбинированных датчиков и многосенсорных систем для регионального мониторинга концентрации парниковых газов / А.Р. Шагидуллин, О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, Ю.А. Тунакова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2021. - № 4 (52). - С. 52-67.
25. Агравал Говинд П. Применение нелинейной волоконной оптики: учеб. пособие/ Г. П. Агравал. - С.-Пб.: Лань, 2011. -592 с.
26. Эшпай, Р.А. Радиофотонная многосенсорная система контроля положения иммобильных пациентов в инвалидной коляске на основе линейно-чирпированных волоконных брэгговских решеток с фазовым сдвигом / Р.А. Эшпай, В.И. Артемьев, Р.М. Муратов, Р.Ш. Мисбахов, А.Ф. Аглиуллин // Фотон-экспресс. - 2021. - № 5 (173). - С. 17-23.
27. Эшпай, Р.А. Радиофотонная многосенсорная система контроля положения иммобильных пациентов в инвалидной коляске на основе линейно-чирпированных волоконных брэгговских решеток / Р.А. Эшпай, В.И. Артемьев// Фотон-экспресс. - 2021. - № 4(172).- С. 11-17.

THE CONCEPT OF BUILDING INTEGRATED FIBER OPTIC SENSOR FOR SOLAR MONITORING

*K.A. Khodjanepesov¹, A. Niyazgulyeva¹,
D.N. Matveev², I.I. Nureev², E.V. Belov², T.A. Agliullin², Rus.Sh. Misbakhov²
V.Yu. Vinogradov², G.D. Coverin²*

¹Institute of Telecommunications and Informatics of Turkmenistan,
68, Magtymguly av., Ashgabat, Turkmenistan,

²Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx str., Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. The article proposes the concept of building a complex fiber-optic sensor for simultaneous measurement of relative humidity and air temperature, as well as the temperature of a solar battery. The sensor is represented by a double structure, consisting of a two-stage Fabry-Perot interferometer for measuring relative humidity and air temperature and a two-component wave addressable fiber Bragg structure for measuring the temperature of a solar battery. The sensor is inserted orthogonally to the plane of the photovoltaic panel of the solar battery into the technological hole formed in it so that the distance between the addressable fiber Bragg structure(s) and the Fabry-Perot interferometer module allows, without cross-distortions, to simultaneously measure the relative humidity and air temperature, as well as the temperature of the solar battery. A change in relative humidity only affects the refractive index of the outer interferometer, while a change in air temperature affects the refractive index of both interferometers. Changing the temperature of the solar battery affects only the central wavelength of the addressable fiber Bragg structure. By solving the system of equations for the specified parameters, relative humidity and air temperature, as well as the temperature of the solar battery can be controlled simultaneously. The article presents the structure and design of a complex fiber-optic sensor and the results of the first experiments, which confirmed the possibility of simultaneous measurement of the considered parameters that affect the efficiency of solar batteries.

Keywords: solar cell, conversion efficiency monitoring, complex fiber-optic sensor, two-layer Fabry-Perot interferometer, two-component wave addressable fiber Bragg structure, relative air humidity, air temperature, solar battery temperature.

Статья представлена в редакцию 30.06.2023