

# Модификация полей оболочечных мод при растворении $H_2$ в волоконных световодах и ее влияние на спектральные характеристики длиннопериодных решеток

С.А.Васильев, О.И.Медведков, А.С.Божков, И.Г.Королев, Е.М.Дианов

*Подробно обсуждается влияние диффузии молекулярного водорода, используемого при записи фотоиндуцированных волоконных решеток показателя преломления, на их спектральные характеристики. Показано, что сформированная профилем концентрации растворенного молекулярного водорода дополнительная волноводная структура модифицирует пространственное распределение поля мод оболочки световода, приводя к значительному изменению коэффициента связи длиннопериодных решеток. Указанная модификация в наибольшей степени проявляется для мод оболочки с низкими радиальными числами.*

**Ключевые слова:** волоконный световод, длиннопериодная волоконная решетка, оболочечные моды.

## 1. Введение

Фотоиндуцированные волоконные решетки показателя преломления (ПП), как брэгговские, так и длиннопериодные, в настоящее время широко применяются в волоконно-оптических системах различного назначения в качестве спектрально-селективных элементов [1, 2]. Наиболее распространенным способом изготовления таких решеток в легированных кварцевых волоконных световодах (ВС) является наведение дополнительного ПП в сердцевине световода с помощью достаточно мощного УФ излучения. Конкретные методики записи фотоиндуцированных решеток весьма разнообразны, и их выбор продиктован требуемыми спектральными характеристиками записываемых решеток [1, 2].

Для повышения фоточувствительности наиболее распространенных германосиликатных ВС, исходная величина которой в большинстве случаев оказывается недостаточной для практических целей, как правило, используется низкотемпературная ( $T < 100^\circ\text{C}$ ) обработка ВС молекулярным водородом в камере при давлении 100–200 атм [3]. Такая обработка позволяет насытить ВС водородом, который находится в матрице стекла в физически растворенном состоянии, не образуя химические связи ни с регулярной матрицей стекла, ни с дефектными центрами. Для ВС со стандартным диаметром 125 мкм продолжительность обработки до полного насыщения составляет при комнатной температуре около двух недель. Время насыщения удается значительно снизить (до 10–12 ч) за счет повышения температуры до 80–100 °С, однако при этом результирующая концентрация  $H_2$  в матрице стекла заметно уменьшается [4].

При записи решетки растворенный молекулярный водород взаимодействует с дефектными центрами и регулярными связями сетки германосиликатного стекла, образуя водородные группы и являясь катализатором других фотоиндуцированных процессов, приводящих к стабильному в течение длительного времени изменению ПП стекла [5, 6]. Водородная обработка позволяет повысить величину наведенного УФ излучением ПП вплоть до  $10^{-2}$ , что примерно на порядок превышает значения, достигаемые в ВС, не подвергнутых такой обработке. После записи решетки ВС выдерживают при температуре 20–100 °С в течение определенного времени, для того чтобы молекулярный водород, не вступивший в реакцию, вышел из световода.

Применение водорода при записи решеток помимо указанных достоинств приводит к ряду трудностей, связанных с тем, что при такой значительной молярной концентрации (несколько процентов) водород заметно изменяет ПП кварцевого стекла (на  $10^{-3}$  и более [4, 7]). Это обстоятельство приводит к тому, что концентрацию  $H_2$ , а также ее пространственное распределение следует учитывать при создании решеток с желаемыми спектральными характеристиками, т. е. следует принимать во внимание диффузионные процессы как между различными областями внутри ВС, так и между ВС и внешней средой, протекающие при записи решеток и после ее завершения.

В настоящей работе впервые исследовано влияние пространственного распределения концентрации молекулярного водорода на распределение поля мод оболочки ВС и интенсивность межмодового взаимодействия в длиннопериодных волоконных решетках (ДВПР).

## 2. Характерные времена диффузии, влияющие на свойства волоконных решеток

При записи волоконных решеток ПП в динамике изменения их спектральных свойств можно выделить несколько характерных времен, которые связаны с размерами областей ВС, где протекает диффузия водорода. На

С.А.Васильев, О.И.Медведков, А.С.Божков, И.Г.Королев, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: sav@fo.gpi.ru

рис.1 приведена зависимость при комнатной температуре характерного времени диффузии  $\tau$  (время достижения концентрации водорода  $C_{H_2}$ , равной половине его концентрации в состоянии полного насыщения  $C_{H_2}^{max}$ ) от диаметра области, в которую или из которой происходит диффузия  $H_2$ . Расчет выполнялся для кварцевого цилиндра при коэффициенте диффузии  $D_{H_2}(25^\circ C) = 2.5 \times 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$  [8]. Штриховыми линиями показаны характеристики основных диффузионных процессов, которые наблюдаются в решетках, записанных в стандартном ВС с диаметром сердцевинки  $d_{core} = 9 \text{ мкм}$  и диаметром оболочки  $d_{clad} = 125 \text{ мкм}$ .

В частности, наиболее быстрый диффузионный процесс реализуется на расстояниях порядка периода волоконных брэгговских решеток (ВБР)  $A_{BG} \sim 0.5 \text{ мкм}$  и имеет характерное время  $\tau_{BG} \sim 5 \text{ с}$ . Эта диффузия происходит из необлученной области сердцевинки ВС в облученную, где концентрация  $H_2$  уменьшилась вследствие его взаимодействия с матрицей стекла, и проявляется в небольшом увеличении коэффициента отражения ВБР. Указанный процесс довольно редко наблюдается в чистом виде, т.к. типичное время записи решеток (несколько минут) значительно превышает  $\tau_{BG}$ . Отметим, что в ДПВР такой вид диффузии заметной роли не играет в силу относительно большого периода этих решеток.

Диффузия  $H_2$  из кварцевой оболочки в обедненную при облучении сердцевинку ВС влияет на спектральные свойства решеток обоих типов. Для стандартных световодов с  $d_{core} = 9 \text{ мкм}$  характерное время этой диффузии  $\tau_{core}$  при комнатной температуре составляет  $\sim 30 \text{ мин}$  (рис.1). Такой диффузионный процесс, повышая эффективный ПП основной моды ВС, приводит к сдвигу резонансной длины волны ВБР в сторону больших длин волн, обычно не превышающему  $0.1 - 0.2 \text{ нм}$  [9]. В ДПВР величину этого сдвига определить довольно трудно из-за протекающего одновременно процесса диффузии  $H_2$  из ВС в окружающую среду, в результате которого в ука-

занном диапазоне времен также увеличивается резонансная длина волны. Следует отметить, что при диффузии  $H_2$  из оболочки ВС в его сердцевину происходит увеличение коэффициента связи решеток, вызванное тем, что в облученную область сердцевинки по приведенным выше причинам диффундирует большее количество водорода [10–12].

В литературе подробно изучено влияние на спектральные характеристики решеток (спектры решеток) уже упомянутого процесса диффузии молекулярного водорода из ВС в окружающую среду, который является наиболее длительным из всех рассматриваемых процессов. Для стандартного ВС характерное время этого процесса  $\tau_{clad}$  составляет  $\sim 100 \text{ ч}$  (рис.1). В спектрах ВБР он проявляется в основном в сдвиге резонансной длины в коротковолновую часть спектра на величину, обычно не превышающую  $1 \text{ нм}$  [9]. Наблюдающиеся изменения в спектре ДПВР являются более сложными [13, 14]. Сначала резонансная длина волны увеличивается, что соответствует уменьшению эффективного ПП мод оболочки при выходе  $H_2$  из области оболочки ВС. Лишь когда концентрация  $H_2$  на оси ВС начинает уменьшаться (см. вставку на рис.1), происходит снижение эффективного ПП основной моды, что, в свою очередь, приводит к уменьшению резонансной длины волны ДПВР. Следует иметь в виду, что указанную динамику длины волны имеют нормальные резонансы ДПВР, в то время как для аномальных [15] резонансов характерны противоположные направления сдвигов.

Степень воздействия диффузионных процессов на спектральные свойства волоконных решеток может варьироваться в широких пределах, т.к. интенсивность этих процессов в значительной мере зависит от параметров записи решеток, исходной концентрации  $H_2$  и ее распределения в ВС, от температуры и ряда других факторов.

В следующих разделах детально рассматривается еще одно явление, которое, по-нашему мнению, еще не обсуждалось в научной литературе и на которое следует обращать внимание при анализе диффузионных процессов, происходящих в ВС при записи решеток ПП. Оказалось, что выход  $H_2$  из ВС приводит не только к смещению резонансной длины волны ДПВР, но и к значительному изменению глубины резонансов, причем величина этого изменения существенно зависит от номера возбуждаемой оболочечной моды. Максимальное изменение глубины резонансов наблюдается, когда концентрация  $H_2$  на оси ВС начинает уменьшаться, т.е. при комнатной температуре – через  $30 - 40 \text{ ч}$  после завершения водородной обработки ВС (пунктирная линия на вставке к рис.1).

### 3. Экспериментальные образцы и методики измерений

При постановке экспериментов мы исходили из того, чтобы по возможности отделить исследуемое явление от других диффузионных процессов. С этой целью водородной обработке подвергались ВС, в которых предварительно были записаны ДПВР, причем после изготовления решеток они дополнительно отжигались, чтобы оставшееся после отжига распределение наведенного УФ излучением ПП оставалось неизменным при проведении дальнейших исследований.

Решетки записывались пошаговым методом в стандартном ВС SMF-28 излучением второй гармоники ( $\lambda =$

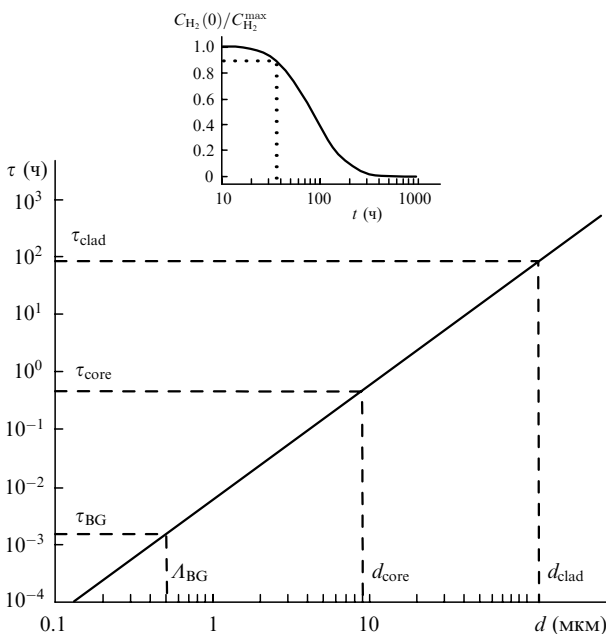


Рис.1. Зависимость характерного времени диффузии  $\tau$  молекулярного водорода от диаметра кварцевого цилиндра  $d$  при комнатной температуре. На вставке – зависимость относительной концентрации водорода на оси световода диаметром  $125 \text{ мкм}$  от времени после завершения его водородной обработки.

244 нм) аргонового лазера [16]. Плотность мощности при записи составляла 10 кВт/см<sup>2</sup>, а интегральная доза – 5 кДж/см<sup>2</sup>. Для повышения фоточувствительности ВС перед записью ДПВР его подвергали водородной обработке при давлении 125 атм и температуре 100 °С, в результате которой молярная концентрация H<sub>2</sub> в матрице стекла составляла ~ 1.1 % [7]. Решетки имели период 450 мкм и длину 40 мм. После записи и выхода оставшегося в ВС водорода решетки отжигались в резистивной печи при температуре 500 °С в течение 15 мин.

Подготовленные таким образом образцы ДПВР снова подвергались водородной обработке с указанными выше параметрами. Исследование выхода H<sub>2</sub> проводилось сразу после завершения обработки с помощью автоматизированной установки для линейного нагрева ВС [17] при скорости нагрева 0.05 °С/с в диапазоне температур 25–300 °С. Эта процедура измерений повторялась после полного остывания печи, для того чтобы зарегистрировать изменения свойств решеток при отсутствии в ВС растворенного H<sub>2</sub>. Спектры пропускания ДПВР измерялись в процессе нагрева через каждые 20 с. Отметим, что использование методики линейного нагрева позволило значительно уменьшить время проведения измерений по сравнению с временем измерений при комнатной температуре и таким образом повысить точность полученных результатов.

#### 4. Результаты и их обсуждение

На рис.2, иллюстрирующем динамику изменения спектральных характеристик ДПВР, приведены спектры пропускания решетки, измеренные при различных температурах в процессе линейного нагрева. Для упрощения анализа приведенных зависимостей спектральное смещение резонансных пиков схематически изображено стрелками. В исследуемом диапазоне спектра при указанных параметрах решетки реализуется резонансная связь основной моды световода HE<sub>11</sub> с модами оболочки HE<sub>12</sub>–HE<sub>15</sub>. Наибольшее смещение резонансных длин волн пиков ДПВР наблюдалось при температуре 170 °С (кривая 2). Глубина пиков в спектре отражения ДПВР достигала своего максимального значения также вблизи этой температуры.

Удобной характеристикой глубины пиков решетки является произведение коэффициента связи решетки  $\kappa$  на ее длину  $L$ , которое для ДПВР связано с глубиной пика  $S$  соотношением  $\kappa L = \arcsin \sqrt{S}$  [18]. На рис.3 приведены температурные зависимости величины  $\kappa L$ , а также резо-

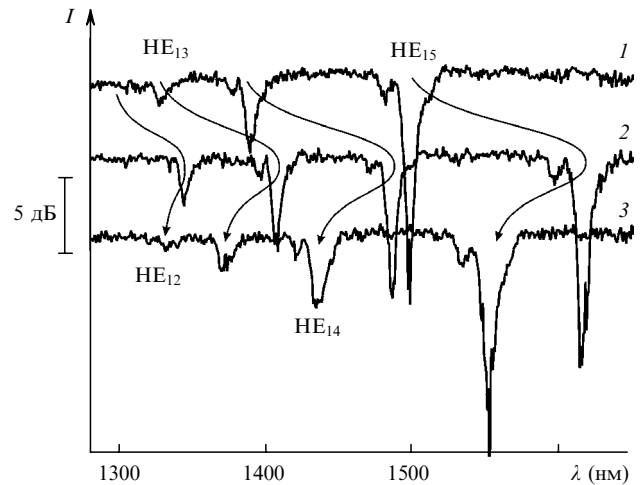


Рис.2. Спектры пропускания ДПВР после водородной обработки ВС при температурах 25 (1), 170 (2) и 300 °С (3), измеренные в процессе линейного нагрева.

нансных длин волн  $\lambda^{\text{res}}$ , полученные для четырех исследованных пиков ДПВР после водородной обработки ВС и в отсутствие водорода в матрице стекла.

Обратим внимание на ряд обстоятельств, которые следуют из рис.2 и 3. В результате водородной обработки ВС резонансные длины волн пиков ДПВР сместились в коротковолновую часть спектра ( $\Delta\lambda_{\text{H}_2}^{\text{res}}$  на рис.3,б). Кроме того, заметно некоторое уменьшение глубины резонансов ( $\Delta(\kappa L)_{\text{H}_2}$  на рис.3,а). Природа этих изменений в настоящее время не вполне ясна и требует дальнейших исследований. По-видимому, это явление связано с различной степенью растворимости H<sub>2</sub> в разных областях ВС.

На рис.3,б хорошо видна немонокотонная динамика смещения резонансных длин волн, характерная для ДПВР при выходе водорода из ВС [13]. Помимо этого наблюдается значительное изменение глубины резонансных пиков для низших мод оболочки, причем относительная величина этого изменения уменьшается при возрастании номера моды. Отметим, что температура, при которой происходит максимальное смещение  $\lambda^{\text{res}}$ , для всех пиков ДПВР одинакова (~ 170 °С), в то время как величина  $\kappa L$  для разных резонансов достигает максимума при разных температурах, находящихся в диапазоне 130–170 °С (рис.3,а).

Обратим внимание на то, что коэффициент связи в ДПВР, не подвергавшейся водородной обработке (штриховые кривые на рис.3,а), практически не изменяется при

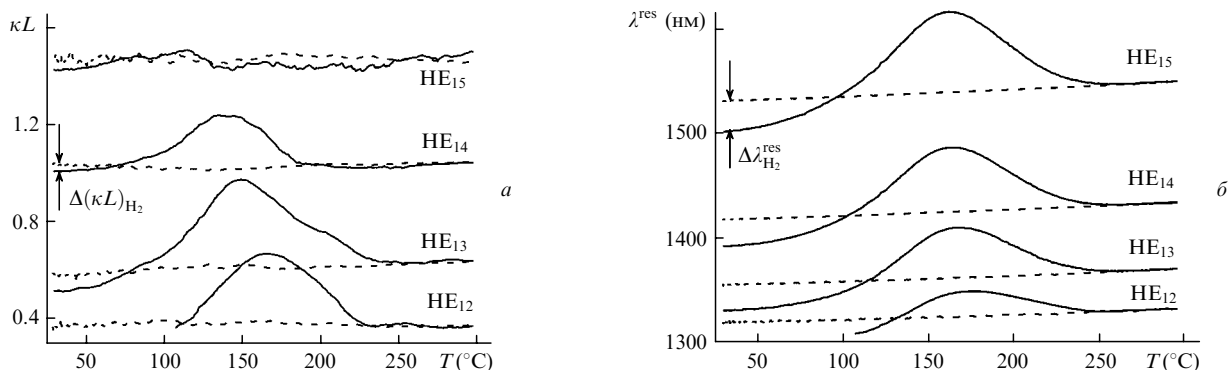


Рис.3. Зависимости величины  $\kappa L$  (а) и длин волн  $\lambda^{\text{res}}$  (б) резонансов ДПВР от температуры  $T$  при линейном нагреве решетки после водородной обработки ВС (сплошные кривые) и в отсутствие водорода в матрице стекла (штриховые кривые) для различных мод.

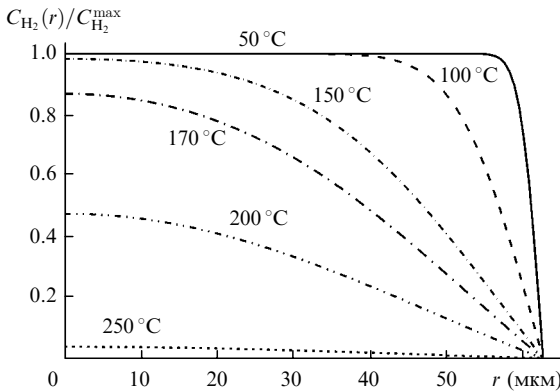


Рис.4. Расчетные радиальные распределения относительной концентрации  $H_2$  при линейном нагреве стандартного ВС со скоростью  $0.05^\circ C/c$ .

нагреве, что свидетельствует об отсутствии обратимого по температуре изменения наведенного ПП, исследованного в работе [19], и хорошо согласуется с результатами этой работы. Монотонное возрастание  $\lambda^{res}$  данной решетки при нагреве отражает температурную чувствительность резонансных пиков, увеличивающуюся с ростом номера оболочечной моды [20, 21]. Тот факт, что при температурах более  $250^\circ C$  сплошные и штриховые кривые на рис.3,б совпадают, свидетельствует о полном выходе  $H_2$  из ВС при таких температурах.

Для объяснения изменения глубины резонансов ДПВР рассмотрим динамику выхода  $H_2$  из ВС. На рис.4 приведены радиальные распределения относительной концентрации  $H_2$ , рассчитанные для указанных параметров нагрева. При расчете использовалась температурная зависимость коэффициента диффузии молекулярного водорода в кварцевом стекле, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными во многих работах:

$$D_{H_2} = 2.83 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{40.19 \text{ кДж/моль}}{RT}\right), \quad (1)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная [8];  $D_{H_2}$  имеет размерность  $cm^2/c$ . Полагалось также, что исходная концентрация водорода  $C_{H_2}^{max}$  является постоянной по радиусу ВС, т.е. степень растворимости  $H_2$  одинакова во всех областях световода. Видно, что в условиях нашего эксперимента до температуры  $\sim 150^\circ C$  водород выходит главным образом из области оболочки ВС и лишь при дальнейшем повышении температуры его концентрация уменьшается в области сердцевинки ВС.

Как уже отмечалось, ПП кварцевого стекла увеличи-

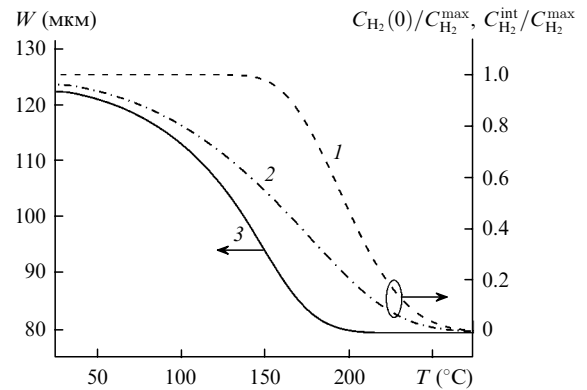
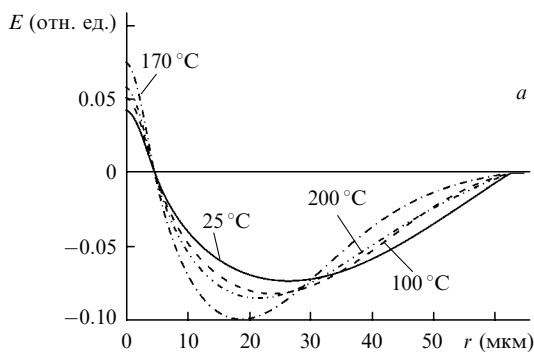


Рис.5. Расчетные температурные зависимости относительной концентрации  $H_2$  на оси ВС (1), относительной интегральной концентрации  $H_2$  в ВС (2) и полной ширины пространственного распределения концентрации  $H_2$  на полувысоте  $W$  (3) при линейном нагреве стандартного ВС со скоростью  $0.05^\circ C/c$ .

вается пропорционально концентрации растворенного в нем водорода, поэтому показанные на рис.4 распределения по существу являются дополнительной волноводной структурой с градиентным профилем ПП, созданной растворенным в ВС водородом. Такая индуцированная водородом «волноводность» может не только изменять эффективный ПП моды, но и модифицировать распределения модовых полей.

На рис.5 показаны расчетные температурные зависимости исследуемых параметров для использованного нами режима нагрева. Отметим, что приведенные на рис.5 зависимости 1 и 2 характеризуют индуцированные водородом изменения эффективных ПП мод ВС. Действительно, изменение эффективного ПП основной моды ВС пропорционально молярной концентрации  $H_2$  на оси ВС:  $\delta n_{eff}^{core} \approx \alpha_{H_2} C_{H_2}(0)$ , где  $\alpha_{H_2} = dn/dC_{H_2} = 4.42 \times 10^{-4}$  обратных процента [7]. Вместе с тем, положив для оценки, что амплитуда поля оболочечных мод является постоянной по радиусу ВС, можно получить, что изменение эффективного ПП мод оболочки пропорционально интегральной концентрации  $H_2$  в ВС с тем же коэффициентом пропорциональности:  $\delta n_{eff}^{clad} \approx \alpha_{H_2} C_{H_2}^{int}$ .

На рис.6 приведены радиальные распределения полей  $E$  мод оболочки  $HE_{12}$  (а) и  $HE_{15}$  (б), рассчитанные для разных температур, т.е. для соответствующих этим температурам распределений концентраций  $H_2$  в ВС (рис.4). Индуцированные водородом изменения наиболее велики для первой моды оболочки и уменьшаются при увеличении радиального модового числа, причем максимальные изменения распределений

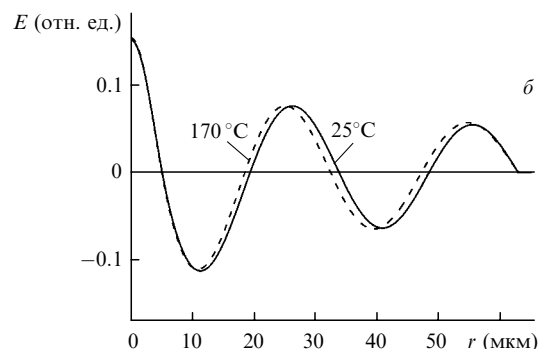


Рис.6. Радиальные распределения полей  $E$  мод оболочки  $HE_{12}$  (а) и  $HE_{15}$  (б), рассчитанные для разных температур при линейном нагреве ДПВР после водородной обработки ВС.

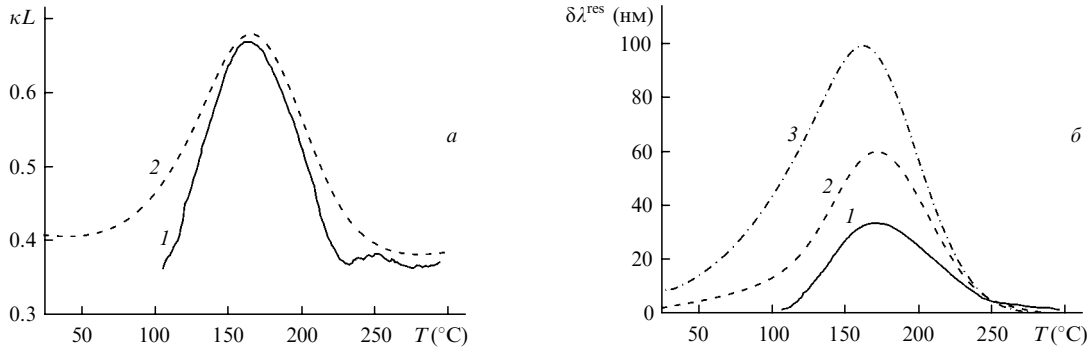


Рис.7. Экспериментальные (1) и расчетные (2, 3) температурные зависимости величины  $\kappa L$  (а) и сдвига резонансной длины волны  $\delta\lambda^{\text{res}}$  (б) для пика, соответствующего связи мод HE<sub>11</sub> – HE<sub>12</sub>, при линейном нагреве ВС. Кривая 3 – расчет по формуле (2).

для всех оболочечных мод наблюдаются в области температур 150–170 °С. Как показано на рис.5, при таких температурах индуцированная водородом структура ПП имеет максимальную амплитуду при минимальной ширине.

Основным фактором, приводящим к возрастанию коэффициента связи ДПВР, является значительное увеличение амплитуды поля моды оболочки в области сердцевинной ВС (рис.6,а) и соответствующее увеличение интеграла перекрытия между модами сердцевинной и оболочки [18]. Все эти факты хорошо отвечают приведенным выше экспериментальным результатам (рис.3).

На рис.7 показаны экспериментальные (кривые 1) и расчетные (кривые 2) температурные зависимости величины  $\kappa L$  и сдвига длины волны  $\delta\lambda^{\text{res}}$  для резонанса, соответствующего связи мод HE<sub>11</sub> – HE<sub>12</sub>. Методика расчета спектральных характеристик ДПВР, использованная нами, описана в работе [18]. Наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и расчетных температурных зависимостей  $\kappa L$  как по положению, так и по амплитуде их максимумов (рис.7,а). Положения максимумов экспериментальной и расчетной зависимостей  $\delta\lambda^{\text{res}}(T)$  на рис.7,б также хорошо совпадают. Отметим, что кривая 1 на рис.7,б скорректирована с учетом температурной чувствительности пика, а также индуцированного водородом начального смещения длины волны  $\Delta\lambda_{\text{H}_2}^{\text{res}}$  (рис.3,б). Расхождения между абсолютными величинами  $\delta\lambda^{\text{res}}$ , полученными в эксперименте и расчете (рис.7,б), по-видимому, связаны с тем, что нам не удалось с достаточной степенью точности учесть дисперсионные характеристики мод ВС.

Приближенную оценку динамики резонансной длины волны можно получить, используя условие фазового синхронизма для мод ДПВР [18]:  $\lambda^{\text{res}} = (n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}})A$ , где  $A$  – период ДПВР. Если предположить, что разность эффективных ПП рассматриваемых мод не зависит от длины волны (в общем случае эту зависимость следует учитывать [22]), то с использованием полученных выше соотношений выражение для индуцированного водородом изменения  $\lambda^{\text{res}}$  можно представить в виде

$$\delta\lambda^{\text{res}} = (\delta n_{\text{eff}}^{\text{core}} - \delta n_{\text{eff}}^{\text{clad}})A \approx \alpha_{\text{H}_2} [C_{\text{H}_2}(0) - C_{\text{H}_2}^{\text{int}}]A. \quad (2)$$

Приведенная на рис.7,б зависимость 3 является результатом вычислений, выполненных в соответствии с выражением (2). Видно, что она качественно правильно описывает наблюдаемые явления и может быть использована для их приближенной оценки. Важно отметить, что эта приближенная зависимость может быть использована для любой моды оболочки ВС, а также то, что для ее получения не требуется решать волновое уравнение.

Отметим, что изменение профиля концентрации H<sub>2</sub> и связанное с ним изменение амплитуды пиков ДПВР происходят при произвольном режиме хранения или отжига ДПВР. С практической точки зрения представляет интерес вопрос о том, какова будет динамика изменения спектра ДПВР при постоянной температуре. Для сопоставления результатов, полученных нами при линейном нагреве с изотермическим режимом выдержки решеток, на рис.8 представлены расчетные зависимости времени выдержки ВС при постоянной температуре от температуры при нагреве ВС со скоростью 0.05 °С/с. Так, например, температуре 170 °С, при которой в нашем случае наблюдается максимальная глубина резонанса мод HE<sub>11</sub> – HE<sub>12</sub>, соответствует время выдержки ~40 ч при температуре 25 °С и ~1.5 ч при температуре 100 °С.

### 5. Заключение

Приведенные в работе экспериментальные и расчетные зависимости однозначно свидетельствуют о том, что обнаруженное явление изменения глубины пиков длиннопериодных решеток при выходе водорода из ВС объясняется изменением интеграла перекрытия мод сердцевинной и оболочки световода. Изменение интеграла перекрытия происходит из-за модификации полей оболочечных мод, вызванной изменением профиля концентрации растворенного в ВС молекулярного водорода. Особенно существенно этот эффект проявляется для резонансов, обусловленных связью основной моды с модами с низкими радиальными числами.

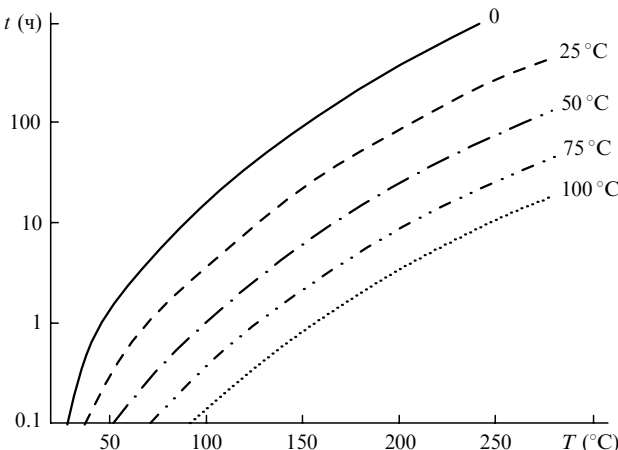


Рис.8. Зависимости времени выдержки ВС в изотермическом режиме от температуры при его линейном нагреве со скоростью 0.05 °С/с.

Таким образом, присутствие в ВС молекулярного водорода создает дополнительную волноводную структуру, характеристики которой меняются в соответствии с изменением профиля концентрации водорода и которую надо учитывать при записи волоконных решеток ПП.

Приведенное объяснение позволило улучшить понимание сложной динамики изменения спектральных характеристик ДПВР при выходе водорода из ВС. Кроме того, оно дает возможность учесть условия хранения ВС после водородной обработки при формировании решеток с заданными спектральными характеристиками. Рассмотренное явление может быть использовано для диагностики текущего распределения растворенного в ВС водорода.

Отметим в заключение, что результаты, полученные нами при исследовании диффузии молекулярного водорода, при соответствующем изменении коэффициентов диффузии и растворимости могут быть применены и для молекулярного дейтерия, который так же, как и молекулярный водород, широко используется для повышения фоточувствительности ВС [23].

Работа была частично поддержана РФФИ (грант № 04-02-17025), а также Московским комитетом по науке и технологиям (грант № 1.2.2, 2005 г.).

1. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings* (San Diego, London: Acad. Press, 1999).
2. Othonos A., Kalli K. *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing* (Norwood, Mass.: Artech House, 1999).
3. Lemaire P.J., Atkins R.M., Mizrahi V., Reed W.A. *Electron. Lett.*, **29**, 1191 (1993).
4. Swart P.L., Chtcherbakov A.A. *J. Lightwave Technol.*, **20**, 1933 (2002).
5. Tsai T.-E., Williams G.M., Friebele E.J. *Opt. Lett.*, **22**, 224 (1997).
6. Cordier P., Dalle C., Depecker C., Bernage P., Douay M., Niay P., Bayon J.-F., Dong L. *J. Non-Cryst. Solids*, **224**, 277 (1998).
7. Васильев С.А., Рыбалтовский А.О., Колташев В.В., Соколов В.О., Клямкин С.Н., Медведков О.И., Рыбалтовский А.А., Малосиев А.Р., Плотниченко В.Г., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 278 (2005).
8. Lemaire P.J. *Opt. Eng.*, **30**, 780 (1991).
9. Malo B., Albert J., Hill K.O., Bilodeau F., Johnson D.C. *Electron. Lett.*, **30**, 442 (1994).
10. Guan B.O., Tam H.Y., Ho S.L., Liu S.Y., Dong X.Y. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **12**, 642 (2000).
11. Guan B., Tam H., Chan H., Choy C., Demokan M.S. *Meas. Sci. Technol.*, **12**, 818 (2001).
12. Mizunami T., Fukuda T., Hayashi A. *Meas. Sci. Technol.*, **15**, 1467 (2004).
13. Bhakti F., Larrey J., Sansonetti P., Poumellec B. *Proc. Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides Conf.* (Washington, DC: OSA, 1997, BSuD4, p. 55).
14. Jang J.N., Kwack K.H. *Proc. Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides Conf.* (Washington, DC: OSA, 1997, BMG10, p. 213).
15. Shu X., Zhang L., Bennion I. *J. Lightwave Technol.*, **20**, 255 (2002).
16. Дианов Е.М., Васильев С.А., Стародубов Д.С., Фролов А.А., Медведков О.И. *Квантовая электроника*, **24**, 160 (1997).
17. Божков А.С., Васильев С.А., Медведков О.И., Греков М.В., Королев И.Г. *ИТЭ*, **48**, 491 (2005).
18. Васильев С.А., Дианов Е.М., Курков А.С., Медведков О.И., Протопопов В.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 151 (1997).
19. Hidayat A., Wang Q., Niay P., Douay M., Poumellec B., Kherbouche F., Riant I. *Appl. Opt.*, **40**, 2632 (2001).
20. Dianov E.M., Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Vasiliev S.A. *Proc. X Eurosensors European Conf. on Solid-State Transducers* (Leuven, Belgium, 1996, P5.1-128).
21. Bhatia V., Vengsarkar A.M. *Opt. Lett.*, **21**, 692 (1996).
22. Erdogan T., Stegall D. *Proc. Optical Fiber Communication Conf.* (Washington, DC: OSA, 1998, ThG5, p. 280).
23. Mizrahi V., Lemaire P.J., Erdogan T., Reed W.A., DiGiovanni D.J. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 1727 (1993).