07

Влияние металлического покрытия на оптические потери при отжиге волоконных световодов

© В.В. Волошин, И.Л. Воробьев, Г.А. Иванов, В.А. Исаев, А.О. Колосовский, С.М. Попов, Ю.К. Чаморовский

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино
E-mail: popov@fryazino.net

Поступило в Редакцию 22 октября 2008 г.

Проведено исследование изменения оптических потерь от нагрева оптических волокон с металлическим покрытием. Изучались оптические волокна, изготовленные из одной заготовки с покрытиями из различных металлов. В качестве покрытий были выбраны медь и алюминий. Получены зависимости изменения оптических потерь от температуры в диапазоне от 20 до 400°C с шагом 50°C. При отжиге металлизированных световодов при температурах менее 300°C оптические потери изменяются за счет микроизгибных потерь. При температурах более 300°C основной вклад в увеличение оптических потерь составляют потери из-за поглощения на OH-группах. Впервые обнаружено, что у световода с покрытием из алюминия имеет место значительно больший рост оптических потерь, внесенных OH-группами, по сравнению со световодом с покрытием из меди. Также было обнаружено, что у световодов с покрытием из алюминия при температурах более 300°C имеет место рост оптических потерь, обусловленных молекулярным водородом.

PACS: 42.81.Cn

Последнее время в связи с развитием волоконных датчиков температуры появилась потребность в оптических волокнах, которые могут работать при температурах более высоких, чем обыкновенные связные волокна, т.е. более 85°C и даже более 500°C. Для этого были предложены оптические волокна, у которых покрытием является металл (алюминий, медь, олово, золото) [1].

Покрытие оптических световодов металлом позволяет поднять рабочие температуры волокон до величины, ограниченной температурой плавления металла покрытия. Кроме того, ввиду герметичности металлического покрытия возможно достижение величины прочности в

13 GPa (теоретическая прочность кварцевого стекла). Однако наличие металлического покрытия приводит к увеличению микроизгибных оптических потерь из-за разности коэффициентов линейных температурных расширений (КЛТР) кварцевого волокна и металлического покрытия, что приводит к равномерному увеличению спектральных оптических потерь у многомодовых световодов [2,3].

Гидроксильные группы (OH) — одни из главных технологических примесей, вызывающие дополнительные оптические потери на длинах волн 0.95, 1.24, 1.39 μm, которые являются производными основной длины волны поглощения, находящейся на длине волны 2.72 μm [4].

Известно, что в технологии химического модифицированного парофазного осаждения (MCVD), широко используемой при производстве волоконных заготовок, причины загрязнения OH-группами оптических волокон следующие:

1) диффузии паров воды из атмосферы в газовую систему в случае ее негерметичности;

2) диффузия паров воды и молекулярного водорода из пламени кислородно-водородной горелки в опорную кварцевую трубку;

3) диффузия гидроксильных групп, содержащихся в кварцевой трубке, в светоотражающую оболочку и сердцевину;

4) наличие водородосодержащих веществ, находящихся в исходных галогенидах и кислороде и поступающих в трубку.

Изучение механизмов увеличения потерь в волокнах с металлическим покрытием при работе их при высоких температурах ведется достаточно давно, однако до сих пор прямых сравнений величин прироста оптических потерь при использовании в качестве покрытия различных металлов не проводилось.

Для проведения этого сравнения из одной заготовки было вытянуто два многомодовых градиентных оптических волокна, которые были покрыты различными металлами. Заготовка для вытяжки была взята производства завода г. Гусь Хрустальный, изготовленная из кварцевого стекла марки КУВИ с высоким содержанием OH-групп (200−400 ppm) [3], на которую затем была нахлопнута труба методом жакетирования, также содержащая высокое количество OH-групп. Заготовка имела градиентный профиль показателя преломления. NA = 0.2, $\Delta n = 0.014$. Во время вытяжки волокна были покрыты последовательно сначала методом пиролиза подслоем углерода (толщина 20 nm), а затем методом напыления металлическим покрытием — алюминием или

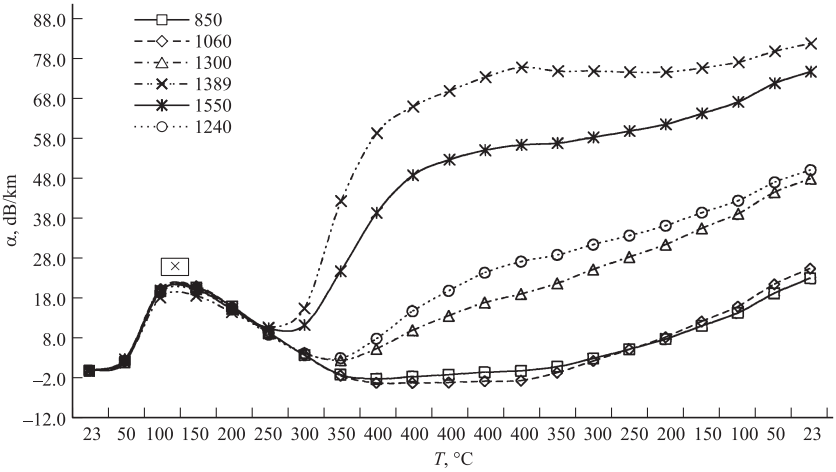

Рис. 1. Приращение оптических потерь в оптическом волокне с алюминиевым покрытием в зависимости от температуры (X — характерная температурная область).

медью. Толщина обоих покрытий составляла 25 μm. Диаметр кварцевого волокна составлял 200 μm. Таким образом, были вытянуты два куска волокна с длиной 240 m и с внешним диаметром 250 μm. Эти два волокна были перемотаны с катушки в бухты и помещены в электрическую печь для отжига. Оптические потери контролировались посредством спектр-анализатора S15 (фирмы YORK), работающего в диапазоне длин волн от 800 до 1600 nm. Отжиг обоих волокон производился в диапазоне температур от 20 до 400°C с шагом нагрева 50°C. Время выполнения одного шага — 15 min. При достижении температуры 400°C волокна выдерживались в течение 1 h при этой температуре (5 шагов измерения). Начальные потери в волокне с покрытием из меди составляли 2.4 dB/km на длине волны 1300 nm. Волокно с покрытием из алюминия имело несколько бóльшие потери.

Относительное изменение спектральных потерь оптических волокон в зависимости от температуры для алюминиевого и медного покрытия представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Из рис. 1 видно, что в оптическом волокне, имеющем алюминиевое покрытие, при отжиге до температуры до 300°C имеет место изменение

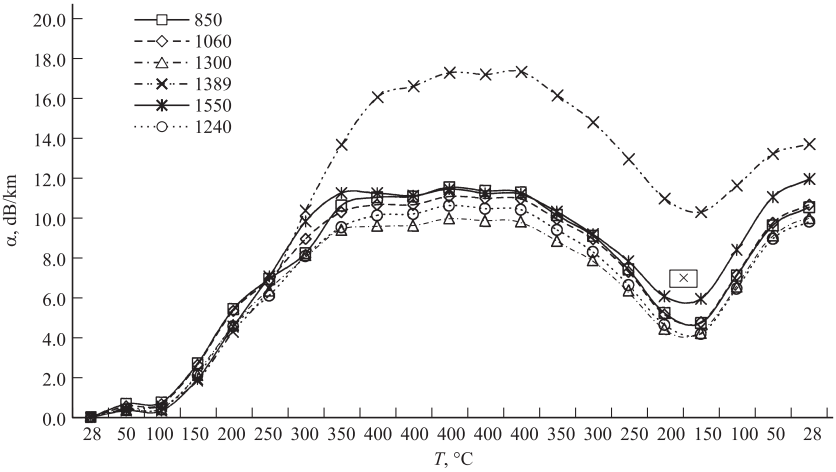

Рис. 2. Приращение оптических потерь в оптическом волокне с медным покрытием в зависимости от температуры (X — характерная температурная область).

потерь только за счет микроизгибных потерь. Подтверждается это тем, что изменения потерь при температуре $0-250^\circ$C имеют постоянную величину и не зависят от длины волны, что является отличительной особенностью микроизгибных потерь [2,3]. В области температур $150-200^\circ$C (рис. 1, характерная температурная область) имеет место уменьшение оптических потерь. Согласно [5], эта область температур является областью перекристаллизации алюминия.

При температуре более 300°C происходит увеличение оптических потерь, обусловленных OH-группами ($\lambda = 1389$ nm, 1240 nm), до величины 75 dB/km на 1389 nm, причем „хвост“ полосы поглощения на $1.39\,\mu$m вызывает рост потерь и на длинах волн 1.24, 1.3 и $1.55\,\mu$m. О величине микроизгибных потерь можно судить по потерям на длине волны 0.85 и $1.06\,\mu$m, которые не подвержены влиянию потерям на OH-группах. В конце цикла при охлаждении до 20°C имеет место рост потерь, обусловленных микроизгибами.

При отжиге оптического волокна с медным покрытием (рис. 2) изменение потерь имеет место в основном за счет микроизгибных потерь, величина которых также независима от длины волны. Кроме того, в

области температур 200−250°C имеет место минимум микроизгибных потерь (рис. 2, характерная температурная область). Данная точка, согласно источнику [5], является точкой перекристаллизации меди.

При температуре более 300°C также имеет место рост потерь за счет OH-групп (1389 nm), которые при температуре 400°C достигают относительной величины 18 db/km (с учетом микроизгибных потерь). Величину микроизгибных потерь можно видеть по изменению оптических потерь на длинах волн 0.85, 1.06, 1.3, 1.55 μm.

Как видно из рис. 1, для световода с алюминиевым покрытием характерен более сильный рост оптических потерь на OH-группах (более 70 dB/km на 1389 nm). Напротив, у световода с медным покрытием имеется достаточно незначительное увеличение потерь (не более 6 dB/km на 1389 nm).

Для обработки результатов, полученных в ходе эксперимента, был проведен математический анализ. Известно [6], что интенсивность величин потерь на длинах волн 1.39 и на 1.24 μm соотносится как 23 : 1. С другой стороны, пик поглощения, обусловленный присутствием молекулярного водорода, также находится на $\lambda = 1.24\,\mu$m. Поэтому, если экспериментальные данные пересчитать в виде

$$\Delta\alpha = \alpha_{1240} - \frac{\alpha_{1389}}{23}, \tag{1}$$

где $\Delta\alpha$ — величина отклонения, dB/km; α_{1240} — оптические потери на 1240 nm, λ_{1389} — оптические потери на 1389 nm, то в случае поглощения только гидроксильных ионов $\Delta\alpha \sim 0$, а при наличии к тому же водорода $\Delta\alpha > 0$. Результат расчетов приведен на рис. 3. Видно, что для волокна с покрытием из меди, действительно, $\Delta\alpha \sim 0$, а для волокна с покрытием из алюминия имеет место рост $\Delta\alpha$ при температуре более 350°C. Это свидетельствует, по нашему мнению, об увеличении количества молекулярного водорода.

Оценить количество молекулярного водорода можно на основе литературных данных о зависимости дополнительных потерь в волокне при его насыщении водородом от внешнего давления водорода в камере и температуры нагрева волокна [7,8]:

$$\Delta\alpha(\mathrm{H_2}) = A(\lambda)\exp\left(\frac{8670\,\mathrm{J/mol}}{RT}\right), \tag{2}$$

где $\Delta\alpha(\mathrm{H_2})$ — дополнительные потери, обусловленные молекулярным водородом, $A(\lambda)$ — спектральная зависимость этих потерь. На

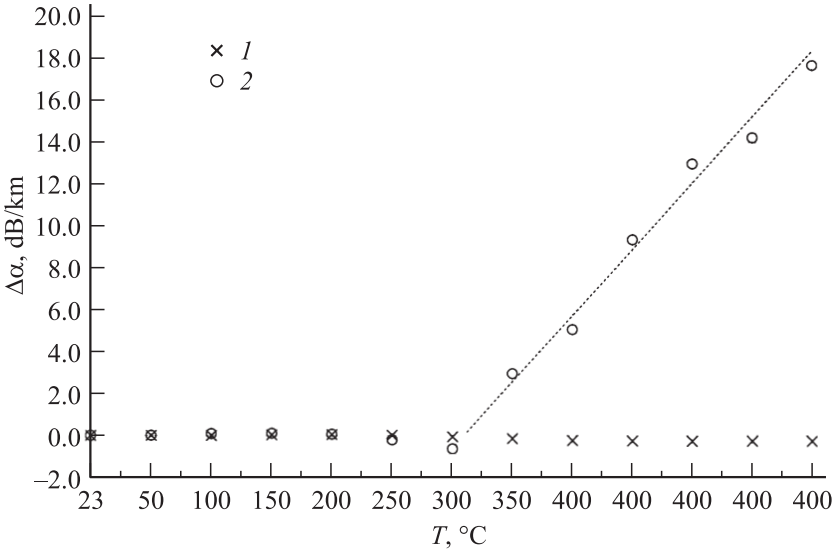

Рис. 3. Изменение отношения потерь для волокон с различным металлом покрытия: *1* — медное волокно, *2* — алюминиевое волокно.

$\lambda = 1.24\,\mu$m $A(1.24) = 0.27\,\text{dB/(km}\cdot\text{atm)}$ и при температуре 400°C $\Delta\alpha = 1.27\,$dB/km. Поскольку в нашем случае величина дополнительных потерь составляет $\sim 19\,$dB/km (рис. 3), то эквивалентное внешнее давление должно составлять $\sim 15\,$atm, и в этом случае, согласно [8], концентрация молекулярного водорода будет составлять $\sim 7.5 \cdot 10^{18}\,\text{mol/cm}^3$ или $\sim 2800\,$ppm, т. е. величину, значительно большую, чем концентрация гидроксильных ионов в объеме опорной трубки исходной заготовки.

Таким образом, проведено исследование спектрального изменения оптических потерь при отжиге на воздухе до 400°C кварцевых волокон, покрытых металлами: алюминием или медью. Установлено, что в отличие от волокна с медным покрытием при нагреве волокна с алюминиевым покрытием наблюдается значительный рост потерь, обусловленных поглощением гидроксильными ионами на $\lambda = 1.39$ и $1.24\,\mu$m, а также появление дополнительного поглощения на $\lambda = 1.24\,\mu$m, обусловленного, на наш взгляд, молекулярным водородом. Следует отметить, что

качественно такое поведение отмечалось для многих образцов. Для выявления причины этой аномалии проводятся дальнейшие исследования.

Список литературы

[1] *Robert W. Pilas* // Proc. Materials Research Society Symposium. 1998. V. 531. P. 263–272.
[2] *Nayoya Uchisa, Naoshi Uesugi* // J. Lightwave Tech. 1986. V. 4. P. 1132–1138.
[3] *Takao Shiota, Hiroshi Hidaka* et al. // J. Lightwave Tech. 1986. V. 4. P. 1151–1156.
[4] *Plotnichenko V.G., Ivanov G.A.* et al. // J. Lightwave Tech. 2005. V. 23. P. 341–347.
[5] *Bogatyrev V.A., Semjonov S.* // Chapter 15 in Specialty Optical Fibres Handbook / Ed. by Alexis Mendez and T.F. Morse. Elsiver: Academic Press, 2007. ISBN-10: 012369406X, ISBN-13: 978-0123694065. 2007. P. 491–512.
[6] *Humbach O., Fabian H., Grzesik U.* et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. 1996. V. 203. P. 19–26.
[7] *Kazuhiro Noguchi, Nori Shibata, Naoshi Uesugi* et al. // J. Lightwave Tech. 1985. V. 2. N 3. P. 236–243.
[8] *Косолапов А.Ф., Семенов С.Л.* Работоспособность волоконных световодов в экстремальных условиях эксплуатации. Препринт НЦВО РАН. 2006. № 12.