

Тепловой отклик микросферических халькогенидных резонаторов

Х.Ахмад, И.Арьянфар, К.С.Лим, В.И.Чонг, С.В.Харун

Рассмотрена возможность использования микросферического халькогенидного резонатора (МХР) для измерения температуры. Продемонстрирована простая технология его изготовления из расплава халькогенидного стекла на перешейке конического кварцевого волокна. Исследован тепловой отклик такого МХР, который сравнивается с тепловым откликом микросферического резонатора на основе одномодового волокна (ОМВ). Обнаружено, что чувствительность МХР к изменению температуры окружающей среды в восемь раз превышает чувствительность микросферического резонатора на ОМВ. Инъектирование в резонатор модулированного по интенсивности непрерывного лазерного излучения позволило оценить время температурного отклика в 55 мс.

Ключевые слова: халькогенидное стекло, микросферический резонатор, температурный датчик.

1. Введение

Недавно микросферические резонаторы оказались в центре обширных исследований, что обусловлено возможностью их применения в нелинейной оптике и при создании оптических датчиков. Микросферические резонаторы обладают множеством уникальных и интересных свойств, например способностью существенно «запирать» излучение внутри себя. Это приводит к усилению взаимодействия между циркулирующим в резонаторе излучением и его материалом, что в свою очередь важно для изучения различных линейных и нелинейных оптических явлений, таких, например, как рамановские процессы [1–3]. Переменное поле затухающих колебаний, окружающее микросферу, также можно использовать для различного рода измерений, к примеру для обнаружения биологических компонентов [4], поскольку сильное взаимодействие таких полей с микроорганизмами в непосредственной близости к микросфере может проявляться в виде резонансных сдвигов спектра пропускания [5]. Кроме того, с помощью микросферических резонаторов можно реализовать множество других методик, используемых, например, для определения состава газов или измерения температуры [6]. Микросферический резонатор обладает высокой чувствительностью к изменению температуры газа, и прямой контакт резонатора с окружающим его газом позволяет оценить ее изменения исходя из величины резонансного сдвига спектра пропускания [7]. Следует отметить, кроме

того, что резонансная длина волны микросферического резонатора также изменяется с температурой, и, нагревая резонатор периодическим амплитудно-модулированным лазерным излучением, можно оценить тепловую релаксацию резонатора [8].

Обычно микросферические резонаторы изготавливаются с использованием кварцевых одномодовых волокон (ОМВ). Однако имеются сведения об изготовлении микросферических резонаторов из других материалов, например свинцово-силикатных волокон [9], халькогенидных волокон [10, 11] и кварцевых волокон в полимерной оболочке [6]. Термооптические свойства, тепловые расширения и нелинейно-оптические характеристики микросферических резонаторов, изготовленных из этих материалов, отличаются от аналогичных свойств и параметров микросфер, изготовленных из кварцевых ОМВ. Изготовление микросферических резонаторов из халькогенидного стекла представляет особый интерес. Халькогенидное стекло состоит из смеси халькогенидов (S, Se или Te) и связующих элементов (As, Ge, Si, Sb и P). Этот материал широко применяется в спектроскопии, для быстрой обработки оптических сигналов в волоконных линиях связи, при создании промышленных ИК датчиков. Большой коэффициент преломления халькогенидного стекла (от 2.4 до 2.7) позволяет использовать его для производства микросферических резонаторов, хорошо удерживающих излучение внутри микросферы.

В настоящей работе демонстрируется использование комбинации кварцевого конического разветвленного волокна с микросферическим халькогенидным резонатором (МХР) в качестве температурного датчика. Показано, что температурный отклик и чувствительность МХР гораздо выше аналогичных параметров кварцевого микросферического резонатора. Тепловая релаксация МХР была исследована с применением техники периодического амплитудно-модулированного нагрева, модифицированной по сравнению с подходом Самецкого и соавторов [8], в работе которых МХР нагревался периодическим амплитудно-модулированным лазерным излучением.

* Перевод с англ. В.В.Кошечкиной.

H.Ahmad, K.S.Lim, W.Y.Chong. Photonics Research Centre, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia; e-mail: harith@um.edu.my
I.Aryanfar. Electrical Engineering Dept. University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia
S.W.Harun. Photonics Research Centre, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia, Electrical Engineering Dept. University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia

2. Формирование халькогенидной микросферы

При производстве МХР короткий (~ 0.5 мм) сегмент халькогенидного волокна размещается на чистой стеклянной пластине и нагревается до температуры выше температуры плавления, которая составляет примерно 350°C . Через минуту после начала нагрева халькогенидное волокно превращается в расплавленное стекло. После этого часть конического кварцевого волокна длиной 3–4 см, произведенного по технологии горячего вытягивания, погружается в небольшой объем расплавленного халькогенидного стекла, которое перетекает на волокно. На рис. 1, *a* показано изображение халькогенидного стекла, перетекшего на коническое волокно с диаметром сердцевинки ~ 7 мкм. Для улучшения сферической геометрии халькогенидной микросферы на конце волокна халькогенидное стекло устанавливается на расстоянии 5–8 мм от электрического нагревателя, температура которого на 50°C превышает точку плавления стекла, снова нагревается и затем расплавляется. Благодаря сильному поверхностному натяжению расплава капля халькогенидного стекла приобретает сферическую форму после нескольких секунд нагрева, а поддерживающее волокно оказывается на оси микросферы (рис. 1, *б*). При производстве МХР его размер можно контролировать, выбирая начальный объем халькогенидного стекла, и, если необходимо, уменьшать его, деля расплавленную массу с помощью другого кварцевого конического волокна.

Изображение присоединенного к коническому волокну МХР показано на рис. 2.

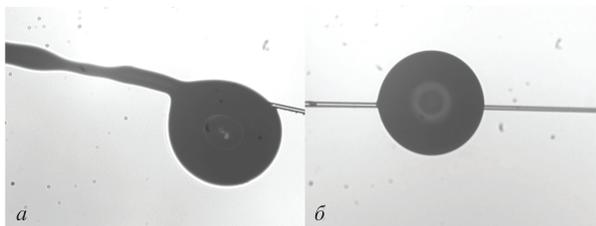


Рис. 1. Адгезия халькогенидного стекла на поддерживающее коническое волокно (*a*) и улучшенная сферическая форма МХР диаметром ~ 178 мкм (*б*).

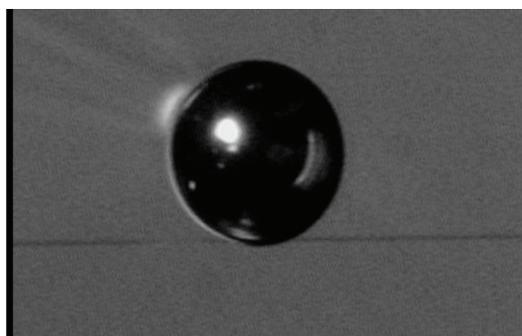


Рис. 2. Изображение под микроскопом присоединенного к коническому волокну МХР.

3. Температурный отклик

Хорошо известно, что оптические характеристики стекла зависят от температуры [12]. В связи с этим изменение температуры окружающей среды приводит к сдвигу резонансной

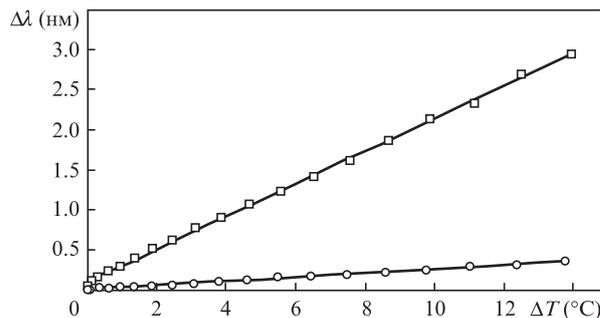


Рис. 3. Зависимости сдвига резонанса $\Delta\lambda$ от изменения температуры для халькогенидного (квадраты) и кварцевого (кружки) микросферических резонаторов. Сплошные линии – линейная аппроксимация экспериментальных данных.

нансной длины волны в спектре пропускания вследствие термооптического эффекта и теплового расширения [12, 13]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (\alpha_{\text{ТОС}} + \alpha_{\text{ТЕС}})\Delta T, \quad (1)$$

где λ_0 – рабочую длину волны; $\Delta\lambda$ – сдвиг резонансной длины волны резонатора; ΔT – изменение температуры; $\alpha_{\text{ТОС}}$ и $\alpha_{\text{ТЕС}}$ – термооптический коэффициент и коэффициент теплового расширения соответственно. Термооптический эффект обладает меньшим временным откликом по сравнению с эффектом теплового расширения [14], что учитывается в данном исследовании.

При определении теплового отклика МХР, присоединенного к перешейку биконического волокна, малый нагревательный элемент был размещен на расстоянии 1 мм от него. Температура управлялась изменением электрического тока нагревательного элемента. Температурные отклики МХР и микросферического резонатора на ОМВ приведены на рис. 3.

Изначально температура устанавливалась равной 24°C (комнатная температура) и достигала максимума в 39°C при управляющем токе $I = 2.0$ А. Экспериментальные данные наглядно показывают, что сдвиг длины волны линейно пропорционален изменению температуры, поэтому измеренная температурная чувствительность МХР была оценена в 205 пм/ $^\circ\text{C}$. Для сравнения: температурная чувствительность микросферического резонатора на ОМВ в восемь раз меньше и составляет примерно 26 пм/ $^\circ\text{C}$.

4. Тепловая релаксация

Так же как и чувствительность, время отклика, или тепловая релаксация, предложенного температурного датчика, является критическим параметром в случае мониторинга температуры в режиме реального времени. Для исследования тепловой релаксации МХР использовался лазер, генерирующий излучение на длине волны 532 нм с диаметром пучка 2.3 ± 0.2 мм и прямоугольной модуляцией мощности со скважностью 33%. Лазерный пучок направлялся на МХР для его периодического нагрева и охлаждения. Выходная мощность лазера составляет 0.15 Вт при периоде модуляции 0.94 с. Предполагалось, что вследствие малости размера МХР по сравнению с диаметром лазерного пучка лазерное излучение, освещающее резонатор, имеет прямоугольную модуляцию. Поскольку халькогенидное стекло обладает высоким коэффициентом поглощения излучения в видимом диапазоне, лазерное излучение с длиной волны 532 нм будет поглощаться в МХР

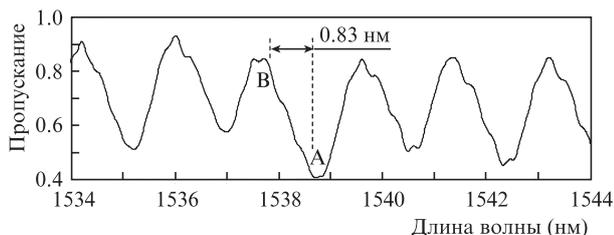


Рис.4. Спектр пропускания МХР при комнатной температуре.

и преобразовываться в тепло. Во время фазы облучения температура МХР растет и спектр пропускания сдвигается в красную область примерно на 0.83 нм – от длины волны, соответствующей точке В, к точке А (рис.4), что отвечает увеличению температуры на 4°C. Когда нагревающее излучение отсутствует, по мере рассеяния тепла температура МХР снижается до комнатной и спектр возвращается в исходное состояние. Источником пробного сигнала при оценке изменения температуры служил одночастотный непрерывный лазер, облучающий МХР на выбранной резонансной длине волны 1538.6 нм (точка А на рис.4).

Если предположить, что переход между точками А и В в спектре пропускания является линейным, то мощность прошедшего лазерного излучения также линейно модулирована за счет изменения температуры. Сигнал на рис.5 отражает изменение температуры МХР. Тепловую релаксацию МХР можно адекватно описать уравнениями для системы с сосредоточенными параметрами [15]:

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau}(T(t) - T_r) + A(t), \quad (2)$$

$$T(t) = T_r + \int_0^t dt' A(t') \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau}\right), \quad (3)$$

где $A(t)$ – модулированный нагрев как функция времени; $T(t)$ – температура МХР; T_r – комнатная температура; τ – время релаксации. Экспериментальные данные на рис.5 аппроксимируются теоретической кривой с $\tau = 55$ мс. Видно небольшое расхождение, в частности на спадающей части температурной кривой, которое можно отнести к неидеальному линейному переходу между точками А и В (см. рис.4). Полученный температурный отклик не является мгновенным, поскольку распределение тепла и

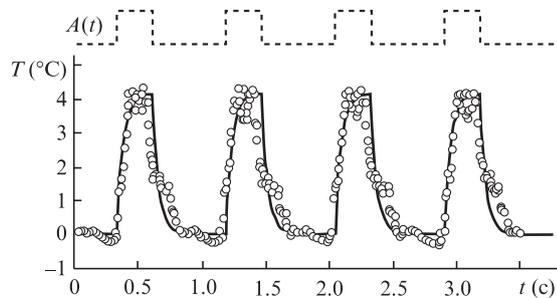


Рис.5. Изменение температуры МХР во времени – экспериментальные данные (кружки) и аппроксимационная кривая (сплошная кривая) при прямоугольной модуляции мощности греющего излучения со скважностью 33% (верхняя кривая).

достижение равновесной температуры внутри объема МХР требует времени. В связи с этим время релаксации МХР можно уменьшать и далее, используя халькогенидные сферы с меньшим объемом для более быстрого достижения температурного равновесия. Тем не менее малое время релаксации (55 мс) означает, что предложенный МХР пригоден для мониторинга температуры в реальном времени.

5. Выводы

Продемонстрирована простая технология изготовления МХР и исследован его тепловой отклик. По аналогии с микросферическим резонатором на ОМВ при увеличении температуры спектр МХР сдвигается в красную область. Однако скорость смещения длины волны в восемь раз выше, чем в случае микросферического резонатора на ОМВ. Кроме того, для возбуждения сдвигово-колебательной модуляции спектра МХР подвергался периодическому нагреву модулированным лазерным излучением, при этом была измерена модуляция интенсивности непрерывного излучения пробного лазера, пропущенного через МХР. Выбранная длина волны пробного лазерного излучения находилась внутри диапазона линейного пропускания МХР. Наблюдалась линейная модуляция интенсивности непрерывного пробного излучения. Аппроксимация выходного отклика МХР теоретической кривой позволила оценить время температурной релаксации в 55 мс. Важным преимуществом МХР при измерении изменения температуры является его чувствительность, в восемь раз большая, чем у ОМВ.

Авторы выражают благодарность Brain Gain Malaysia Fellowship и Министерству науки, технологии и инноваций Малайзии за финансирование проведенных исследований.

- Braunstein D., Khazanov A.M., Koganov G.A., Shuker R. *Phys. Rev. A*, **53**, 3565 (1996).
- Dantham V.R., Bisht P.B., Dobal P.S. *J. Raman Spectr.*, **6**, 1373 (2011).
- Kouno T., Kishino K., Suzuki T., Sakai M. *IEEE Photon. J.*, **2**, 1027 (2010).
- Soria S., Berneschi S., Brenci M., Cosi F., Nunzi Conti G., Pelli S., Righini G.C. *Sensors*, **11**, 785 (2011).
- Ren H.-C., Vollmer F., Arnold S., Libchaber A. *Opt. Express*, **15**, 17410 (2007).
- Choi H.S., Armani A.M. *App. Phys. Lett.*, **97**, 223306 (2010).
- Gregor M., Pyrlík C., Henze R., Wicht A., Peters A., Benson O. *App. Phys. Lett.*, **96**, 231102 (2010).
- Sumetsky M., Dulashko Y., Fini J.M., Hale A., DiGiovanni D.J. *J. Lightwave Technol.*, **24**, 242 (2006).
- Wang P., Murugan G.S., Lee T., Feng X., Semenova Y., Wu Q., Loh W., Brambilla G., Wilkinson J.S., Farrell G. *App. Phys. Lett.*, **98**, 181105 (2011).
- Broadbent D.H., Foster M.A., Agha I.H., Robinson J.T., Lipson M., Gaeta A.L. *Opt. Express*, **17**, 5998 (2009).
- Grillet C., Bian S.N., Magi E.C., Eggleton B.J. *App. Phys. Lett.*, **92**, 171109 (2008).
- Lim K.S., Harun S.W., Damanhuri S.S.A., Jasim A.A., Tio C.K., Ahmad H. *Sensors and Actuators A: Physical*, **167**, 60 (2011).
- Wu Y., Rao Y.-J., Chen Y.-h., Gong Y. *Opt. Express*, **17**, 18142 (2009).
- Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S. *Laser Phys.*, **2**, 1004 (1992).
- Grellier A.J.C., Zayer N.K., Pannell C.N. *Opt. Commun.*, **152**, 324 (1998).