

07;12

## Радиочастотная спектроскопия кварцевых световодов с полимерным покрытием

© Р.И. Шайдуллин, О.А. Рябушкин

Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный  
НТО „ИРЭ-Полюс“, Фрязино  
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино  
E-mail: rs-mipt@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 октября 2012 г.

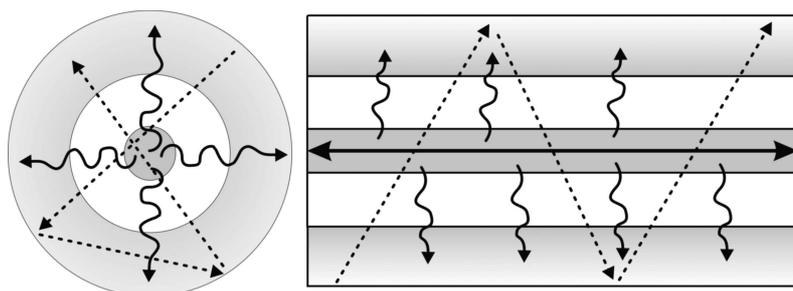
Радиочастотная импедансная спектроскопия используется для измерения диэлектрической проницаемости защитного полимерного покрытия волоконных световодов. Обнаружено, что температурные зависимости диэлектрической проницаемости в радиочастотном диапазоне у полимеров и плавленного кварца значительно отличаются. Доказана принципиальная возможность независимого измерения температуры полимерного покрытия и кварцевой сердцевины волоконного световода.

Плотность непрерывной оптической мощности в кварцевых световодах с полимерным покрытием в иттербиевых волоконных лазерах в настоящее время превышает  $800 \text{ kW/cm}^2$ , что позволяет достигать выходной мощности одномодового излучения  $17 \text{ kW}$  [1]. При преобразовании оптической накачки многомодового объединенного излучения от полупроводниковых лазеров с длиной волны  $940\text{--}970 \text{ nm}$  в кварцевом световоде помимо одномодового излучения (длина волны генерации  $1020\text{--}1100 \text{ nm}$ ) часть оптической мощности переходит в излучение люминесценции, а часть рассеивается. При этом существенная доля мощности излучения накачки преобразуется в тепло за счет нескольких механизмов: а) разности энергий квантов накачки и генерации, б) безызлучательной релаксации, в) рассеяния и поглощения излучения спонтанной люминесценции в световоде. Повышение плотности мощности излучения в световоде приводит к значительному росту разогрева активной среды (сердцевины кварцевого световода, легированного резкоземельными (РЗ) ионами). Понимание механизмов

разогрева оптических световодов — важная и актуальная проблема для научных и прикладных исследований.

Повышение температуры активной среды волоконных лазеров существенно меняет сечения поглощения и люминесценции РЗ-ионов, что приводит к изменению длины волны свободной генерации и эффективности преобразования излучения накачки [2,3]. В одной из первых работ по тепловым эффектам в волоконных лазерах [4] были сделаны теоретические расчеты тепловых эффектов в волокне и приведен температурный профиль кварцевого световода. При этом в данной работе единственным механизмом разогрева активной среды принимался обмен энергией квантов накачки и генерации в сердцевине световода. Однако только в последние годы стало уделяться внимание разработке экспериментальных методик измерения температуры волоконного лазера. В работе [5] был предложен метод измерения температуры активного волокна Yb/Er-лазера при помощи сенсорного волокна с записанными в нем волоконными брэгговскими решетками (ВБР), находящимся в тепловом контакте с исследуемым. По спектру отражения ВБР определялась температура сенсорного волокна, а температура в сердцевине активного волокна рассчитывалась теоретически. В работе [6] для определения температуры активного волокна использовался инфракрасный тепловизор, при этом при расчете температурного профиля волокна учитывались термодинамические свойства полимерного покрытия световода, а также определены оптимальные параметры геометрии и внешнего охлаждения волокна. Недостаток этих работ состоял в том, что в них измерялась температура либо внешней поверхности волокна либо прилегающей среды, а температура в сердцевине рассчитывалась теоретически. Только недавно в работе [7] был предложен метод измерения температуры непосредственно в сердцевине волокна по температурной зависимости спектра пропускания ВБР, записанных непосредственно в активном волокне.

Еще в 2006 году нами был разработан метод, основанный на интерферометре Маха–Цандера, позволяющий измерять температуру с точностью выше 0.1 К непосредственно в активной сердцевине волокна, состоящего из нескольких оболочек (легированной активными ионами сердцевины, кварцевой оболочки и защитной полимерной оболочки) [8]. Оказалось, что температура сердцевины активного волокна нелинейно увеличивается с повышением мощности накачки. Мы предположили,



**Рис. 1.** Поперечное и продольное сечения волокна. Пунктирными линиями обозначено распространение излучения накачки, сплошными прямыми — лазерной генерации, а волнистыми — спонтанной люминесценции.

что такое поведение объясняется дополнительным разогревом полимерной оболочки активного волокна люминесцентным излучением, распространяющимся изотропно от сердцевины волокна (рис. 1).

Для подтверждения этого предположения мы измерили оптические спектры полимеров, используемых для покрытия волокна. Оказалось, что характерные пики поглощения лежат в том же диапазоне, что и спектральные особенности полимеров (полисилоксанов), представленные в литературе [9], где эти пики поглощения сопоставляются с обертонами колебательных степеней свободы в группах  $\text{CH}_3$  и  $\text{Si-OH}$ . Главная особенность этих спектральных пиков в том, что они попадают в диапазон длин волн излучения накачки и люминесценции иттербиевых волоконных лазеров. Нами была предложена и рассчитана новая коаксиальная модель разогрева волокна, в которой учитывалось, что помимо размена квантов накачки и генерации большую роль в разогреве световода играет поглощение рассеянного излучения и люминесценции в полимерной оболочке волокна [10].

Развиваемый нами интерференционный метод позволяет измерять только температуру сердцевины волокна и лишь косвенно судить о температуре в полимерной оболочке. В то же время температурный скачок на границе раздела кварц–полимер остается неопределенным. Для количественной проверки модели мы предлагаем измерять температуру полимера по изменению его диэлектрической проницаемости

при помощи радиочастотной (РЧ) импедансной спектроскопии, которая широко используется для исследования свойств как оптических кристаллов [11], так и полимеров [12]. В основе данного метода лежит измерение диэлектрической проницаемости исследуемого образца в радиочастотном диапазоне от 1 кГц до 100 МГц. Для этого был разработан экспериментальный стенд на основе радиочастотного анализатора цепей (рис. 2, *a*).

Образцы полимеров, обычно используемых в волоконной оптике (PS-200 и Sylgard), помещаются в конденсатор, расположенный в термостате, позволяющем разогреть образцы до 90°C. С помощью термостата образцы были термополимеризованы по общепринятой технологии полимеризации. Конденсатор подключается к анализатору цепей Anritsu, синхронизированному с РЧ-генератором, с помощью которых снимается частотная зависимость адмиттанса конденсатора в диапазоне частот от 5 до 10 МГц. Комплексный импеданс  $\hat{Z}$ , состоящий из активной  $Z_r$  и реактивной  $Z_i$  частей, и адмиттанс  $\hat{Y}$  системы на частоте  $F$  вычисляются по формуле

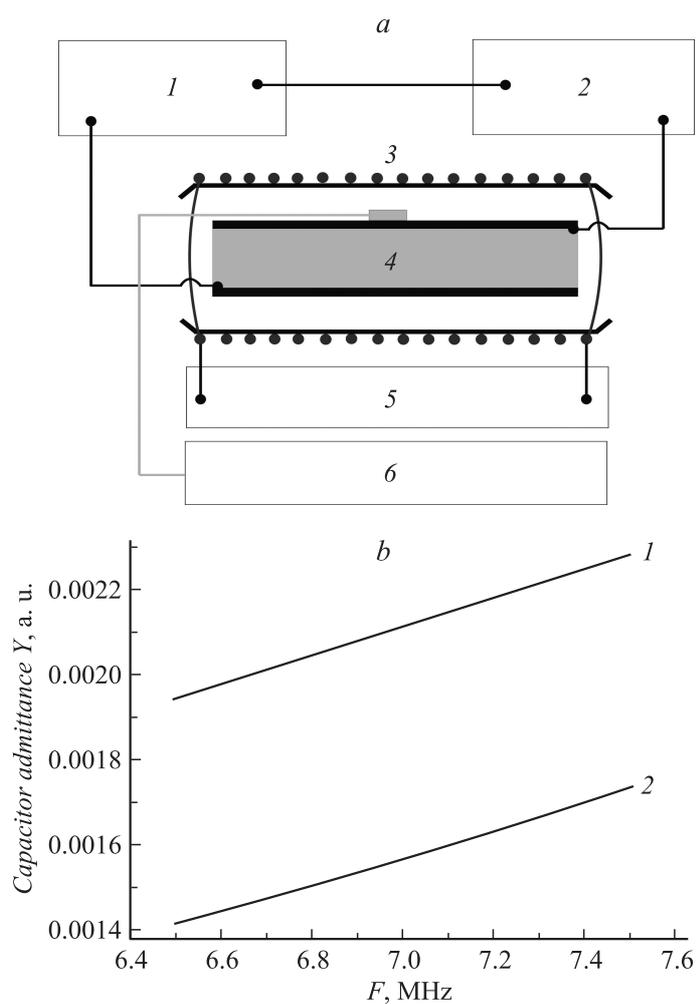
$$\hat{Z}(F) = \frac{1}{\hat{Y}(F)} = Z_r + iZ_i = \frac{\hat{U}(F, t)}{\hat{I}(F, t)} = \frac{U_0}{I_0} e^{-i\varphi}, \quad (1)$$

где  $t$  — время,  $U_0$  и  $I_0$  — амплитуды переменного напряжения  $\hat{U}$  и тока  $\hat{I}$ , а  $\varphi$  — сдвиг по фазе между ними.  $U_0$  задается генератором, а  $I_0$  и  $\varphi$  измеряются при помощи анализатора. Так как в нашей схеме активными потерями в конденсаторе можно пренебречь, то по наклону зависимости адмиттанса  $Y$  от частоты (рис. 2, *b*) можно рассчитать диэлектрическую проницаемость полимера  $\varepsilon$  по формуле

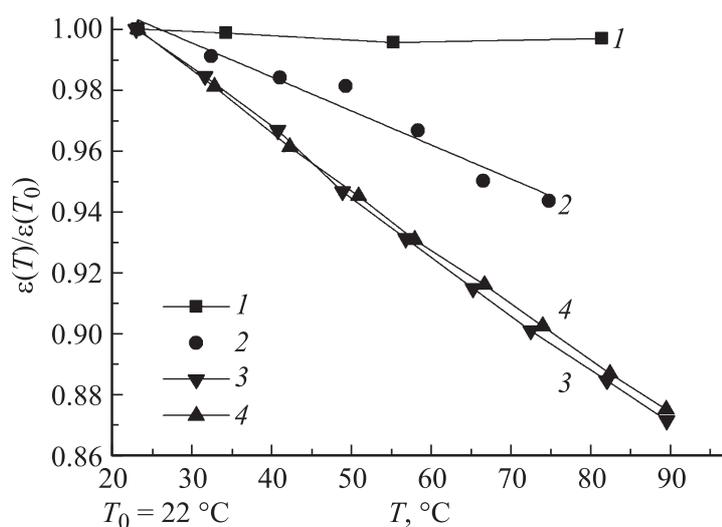
$$\varepsilon = \frac{Y}{2\pi F C_0}, \quad (2)$$

где  $C_0$  — емкость плоского конденсатора без полимера. С помощью термостата подобные измерения были проведены для нескольких значений температуры. Аналогичный эксперимент был проведен и для образцов плавленого кварца (стеклянная пластина).

По этим значениям была построена зависимость диэлектрической проницаемости в радиочастотном диапазоне полимеров и кварца от температуры (рис. 3). Оказалось, что относительное изменение этого параметра от температуры примерно одинаково для обоих типов



**Рис. 2.** *a* — блок-схема экспериментальной установки: 1 — анализатор цепей Anritsu MS4630B, 2 — РЧ-генератор, 3 — стеклянная труба с нихромовой намоткой, 4 — исследуемый образец, 5 — источник питания, 6 — термоконтроллер SRS PTC10. *b* — частотная зависимость адмиттанса конденсатора: 1 — для полимера ПС-200, 2 — для плавленого кварца.



**Рис. 3.** Относительное изменение радиочастотной диэлектрической проницаемости от температуры для разных образцов (1 — плавленного кварца, 2 — кварцевого волокна с полимерной оболочкой, 3 — полимера ПС-200, 4 — полимера Sylgard).

полимеров, при этом аналогичный эксперимент для плавленного кварца заметной зависимости его диэлектрической проницаемости от температуры не обнаружил. Следовательно, измерение данного параметра помогает разделить по своим свойствам полимерную оболочку от кварцевой.

С целью исследования составного диэлектрика был проведен эксперимент с оптическим волокном с полимерным покрытием. В конденсатор было уложено около 21 м активного Yb-волокна (при этом коэффициент заполнения конденсатора волокном составил около 60%: 55% для полимера, 3% для плавленного кварца). Аналогичная методика измерения показала, что коэффициент относительного изменения радиочастотной диэлектрической проницаемости такой системы кварц–полимер–воздух лежит между чистым кварцем и чистым полимером (рис. 3) и соответствует коэффициенту объемного заполнения

конденсатора. Из приведенных результатов видно, что при разогреве кварцевого волокна изменение диэлектрической проницаемости в РЧ-диапазоне зависит только от температуры полимерной оболочки.

Экспериментально установлено, что метод радиочастотной импедансной спектроскопии позволяет отдельно определить разогрев полимерной оболочки оптического волокна. При этом комбинация интерференционного и импедансного методов позволит экспериментально определить разогрев разных оболочек волокна и определить температурный профиль волокна. В данной работе подтверждена важная роль спектральных оптических свойств полимеров, используемых в качестве защитного покрытия активных волокон световодов. Представленная в работе методика позволяет измерять температуру в условиях прохождения оптического излучения не только в полимерной оболочке пассивных и активных волокон, но и исследовать другие типы световодов, включая полимерные оптические волокна (POF).

## Список литературы

- [1] *Ferin A., Gapontsev V., Fomin V. et al.* // 6<sup>th</sup> International Symposium on High Power Laser and their Applications. St. Petersburg, Russia. 2012. Session HPFL-1. Report TuSY1-1.2.
- [2] *Вяткин М.Ю., Грабарник С.П., Рябушкин О.А.* // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 4. С. 323–327.
- [3] *Brilliant N., Lagonik K.* // Opt. Lett. 2001. V. 26. N 21. P. 1669.
- [4] *Davis M.K., Digonnet M.J.F., Pantell R.H.* // J. Lightwave Tech. 1998. V. 16. P. 1023.
- [5] *Jeong Y., Baek S., Dupriez P. et al.* // Opt. Express. 2008. V. 16. N 24. P. 19 865.
- [6] *Lapointe M.A., Chatigny S., Piche M. et al.* // Proc. SPIE — Int. Opt. Soc. Eng. 2009. Rf6873, 687819-1.
- [7] *Fiebrandt J., Leich M., Rothhardt M., Bartelt H.* // Proc. of SPIE. 2012. V. 8426. 84260B-1.
- [8] *Гайнов В.В., Демьянков Д.Т., Рябушкин О.А.* // Труды 49-й науч. конф. МФТИ „Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук“. Москва–Долгопрудный, Россия, 2006. Факультет физической и квантовой электроники. С. 52.
- [9] *Efimenko K., Wallace W.E., Genzer J.* // J. Colloid and Interface Science. 2002. V. 254. P. 306–315.

- [10] *Гайнов В.В., Шайдуллин Р.И., Рябушкин О.А.* // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. С. 637–643.
- [11] *Ryabushkin O.A., Myasnikov D.V., Konyashkin A.V., Tyrtysnyy V.A.* // J. European Optical Society–Rapid publications. 2011. V. 6. P. 11 032.
- [12] *Дрокин Н.А., Федотова А.В., Глуценко Г.А., Чурилов Г.Н.* // ФТТ. 2010. Т. 52. В. 3. С. 607–611.