

Плавно перестраиваемый волоконный аттенюатор для диапазона длин волн вблизи 1.5 мкм

О.И.Баум, Н.В.Варламова, Б.И.Западинский, Г.В.Мишаков, В.И.Соколов

Создан волоконный аттенюатор для телекоммуникационного диапазона длин волн вблизи 1.5 мкм, использующий одномодовое кварцевое волокно с боковой полировкой, на поверхность которого нанесен слой фторсодержащего полимерного материала с большим термооптическим коэффициентом. Принцип работы устройства основан на изменении условий полного внутреннего отражения для волоконной моды на сполитрованном участке за счет термоиндуцированного изменения показателя преломления фторполимерного слоя. Аттенюатор нечувствителен к поляризации света, имеет плавно регулируемый коэффициент ослабления в диапазоне 0.2–27 дБ и легко интегрируется в волоконно-оптические цепи.

Ключевые слова: оптические аттенюаторы, кварцевые волокна с боковой полировкой, фторсодержащие полимеры.

В последние годы полимерные материалы все более широко используются в различных устройствах для волоконно-оптических линий связи в силу их высоких функциональных возможностей, технологичности и относительной дешевизны. Среди различных видов оптических полимеров наиболее перспективными являются фторсодержащие полимерные материалы [1, 2]. Во-первых, в отличие от обычных углеводородных полимеров, таких как ПММА, фторполимеры обладают более низким поглощением во всех трех телекоммуникационных диапазонах длин волн вблизи 0.85, 1.3 и 1.5 мкм. Это связано с тем, что положения колебательных обертонов связи C–F сдвинуты в сторону больших длин волн по сравнению с положениями соответствующих обертонов связи C–H, ответственных за поглощение в указанных спектральных диапазонах [3]. Во-вторых, исходные фторсодержащие олигомеры обладают низким показателем преломления n (даже меньше 1.33). Это позволяет путем их сополимеризации с олигомерами, имеющими высокий показатель n , изменять в широких пределах показатель преломления n_p композиции, способной к полимеризации. Кроме того, фторполимеры имеют большой отрицательный термооптический коэффициент τ ($\tau = dn_p/d\theta$, где θ – температура). Это дает возможность использовать фторполимеры для создания таких устройств, как перестраиваемые оптические аттенюаторы, модуляторы, переключатели и сенсоры.

В работах [4–12] сообщалось о создании вышеупомянутых устройств для диапазонов длин волн вблизи 0.85, 1.3 и 1.5 мкм на основе одномодового кварцевого волокна с боковой полировкой, на поверхности которого расположена тонкая пленка из прозрачного материала с

показателем преломления, превышающим показатель преломления оболочки волокна. В качестве материалов пленки применялись ниобат лития [4], органические электрооптические кристаллы [5], специальные жидкости [6, 7] и углеводородные полимеры [8–12], способные изменять показатель преломления за счет электро- или термооптического эффектов.

В такой конструкции пленка представляет собой планарный волновод, имеющий собственный спектр дискретных направляемых мод, для которых эффективные показатели преломления n_{eff} определяются толщиной пленки и ее показателем преломления. Взаимодействие моды волокна с модами пленочного волновода имеет резонансный характер, когда значения n_{eff} для этих мод совпадают. При этом происходит туннелирование света из волокна в волновод. Таким образом, воздействуя на спектр направляемых мод волновода путем изменения показателя преломления пленки, можно модулировать интенсивность света, прошедшего через волокно. Устройства, описанные в работах [4–12], являются поляризационно-чувствительными, поскольку эффективные показатели преломления для ТЕ- и ТМ-мод в тонкопленочном волноводе различны.

В настоящей статье сообщается о создании поляризационно-нечувствительного оптического аттенюатора на основе одномодового кварцевого волокна с боковой полировкой и толстого покровного слоя из фторполимерного материала, обладающего квазинепрерывным спектром направляемых мод. В этом случае возможность управления интенсивностью света обусловлена восстановлением условий полного внутреннего отражения для волоконной моды на сполитрованном участке за счет уменьшения показателя преломления фторполимерного слоя от значений, больших n_{eff} , до значений, меньших n_{eff} , в процессе нагрева вследствие отрицательного термооптического коэффициента в полимерном материале.

Схема аттенюатора приведена на рис. 1. Для создания устройства использовалось стандартное одномодовое в диапазоне длин волн вблизи 1.5 мкм кварцевое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления, диа-

О.И.Баум, Г.В.Мишаков, В.И.Соколов. Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Россия, 142190 Троицк, Моск. обл., ул. Пионерская, 2; <http://www.laser.ru>

Н.В.Варламова, Б.И.Западинский. Институт химической физики им. Н.Н.Семенова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Косыгина, 4; <http://www.polymer.chph.ras.ru>

Поступила в редакцию 27 апреля 2004 г.

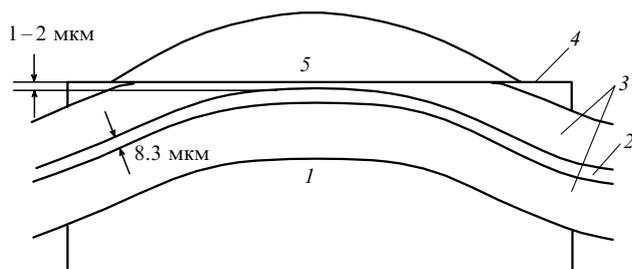


Рис.1. Схема аттенюатора:

1 – кварцевый блок; 2 – сердцевина; 3 – оболочка волокна; 4 – плоскость боковой полировки; 5 – слой фторполимерного материала.

метром сердцевины 8.3 мкм и числовой апертурой 0.13. Волокно клеивалось в изогнутую канавку в кварцевом блоке и полировалось сбоку до приближения к сердцевине на расстояние 1–2 мкм (использовалась методика, описанная в [13, 14]). Радиус кривизны волокна в канавке равнялся 0.8 м, что обеспечивало длину взаимодействия моды волокна со сполитрованным участком 3–5 мм.

Способная к полимеризации жидкая композиция изготавливалась из метакрилового фторсодержащего макромономера с показателем преломления $n_D = 1.39$ на длине волны 0.59 мкм. Сшивающим агентом являлся полифункциональный олигоглицеринметакрилат (ОГМ) с $n_D = 1.47$. Путем смешивания макромономера и ОГМ в пропорциях 1:3 показатель преломления композиции $n_p = 1.45$ (на длине волны 0.59 мкм) выбирался с таким расчетом, чтобы на рабочей длине волны 1.55 мкм он был близким к эффективному показателю преломления $n_{\text{eff}} = 1.446$ для моды кварцевого волокна, но несколько меньше его.

В волокно заводилось линейно поляризованное излучение (1.55 мкм) полупроводникового лазера, после чего композиция наносилась на сполитрованный участок волокна толстым (около 0.15 мм) слоем и полимеризовалась под действием УФ излучения. В процессе полимеризации происходила усадка фторполимера, сопровождаемая увеличением его показателя преломления n_p , который становился выше, чем n_{eff} для волоконной моды. При этом наблюдалось сильное уменьшение интенсивности прошедшего через волокно света за счет его туннелирования из сердцевины в полимер через тонкий слой оболочки в области боковой полировки. При нагреве фторполимера струей горячего воздуха происходило уменьшение его показателя преломления. В основе этого эффекта лежит тепловое расширение полимера, сопровождаемое уменьшением его плотности и, как следствие, показателя преломления [15]. По мере того как показатель преломления полимерного слоя становился меньше эффективного показателя преломления для моды волокна, происходило восстановление пропускания света через волокно.

Для измерения температурной зависимости коэффициента пропускания света T (отношение интенсивности света, прошедшего через волокно, к интенсивности света, проходящего через волокно в полностью открытом состоянии аттенюатора) сполитрованный участок волокна с полимерным слоем помещался в нагреваемый термостат. Температура в последнем измерялась с помощью термочувствительной микросхемы с погрешностью ± 0.09 К. Экспериментальная зависимость $T(\theta)$ приведена на рис.2, причем погрешность измерения T составляет 0.5 %.

Из рис.2 видно, что изменение пропускания света че-

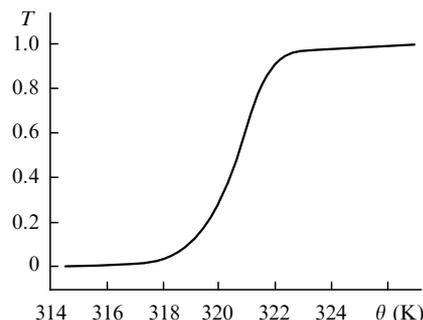


Рис.2. Температурная зависимость коэффициента пропускания аттенюатора на длине волны 1.55 мкм.

рез аттенюатор плавно происходит вблизи температуры перехода $\theta_0 \approx 320.7$ К. Температуру перехода можно увеличивать или уменьшать за счет изменения процентного содержания ОГМ в композиции, что изменяет ее исходный показатель преломления. Зависимость коэффициента пропускания T от температуры при нагреве и остывании устройства была одинакова и не менялась после многократных циклов нагревания/остывания. При увеличении температуры на 10 К (от 316 до 326 К) пропускание возрастало от 0.2 % до 99.9 %, что соответствует глубине модуляции 27 дБ. При этом для увеличения T от 5 % до 95 %, соответствующего глубине модуляции 13 дБ, требовалось изменить температуру на 4.2 К (от 318.6 до 322.8 К). Характеристики аттенюатора сохранялись неизменными при вращении плоскости поляризации входного излучения, что свидетельствует о его поляризационной нечувствительности. Из рис.2 следует, что для поддержания коэффициента пропускания T в диапазоне 316–326 К с погрешностью ± 1 % следует стабилизировать температуру с погрешностью ± 0.03 К. Измеренные внутренние потери в полностью открытом состоянии аттенюатора составили менее 0.2 дБ.

Оценим термооптический коэффициент τ композиции из фторсодержащего метакрилового полимера. Поскольку для перехода аттенюатора на основе одномодового кварцевого волокна с числовой апертурой 0.13 и диаметром сердцевины 8.3 мкм из полностью закрытого в полностью открытое состояние необходимо изменить показатель преломления внешнего полимерного слоя на $\Delta n \approx -0.004$ [16], что достигается при увеличении температуры на $\Delta \theta = 10$ К (от 316 до 326 К), имеем $\tau = \Delta n / \Delta \theta = -4 \times 10^{-4} \text{ К}^{-1}$. Это хорошо согласуется с данными для термооптического коэффициента $\tau = -(2 \div 4) \times 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ в акриловых фторполимерах, полученными в [2].

Скоростные характеристики аттенюатора измерялись путем нагрева образца излучением галогенной лампы через оптический прерыватель с регулируемой скоростью вращения. По мере увеличения частоты прерывания глубина модуляции прошедшего сигнала уменьшалась от 3 дБ при 2 Гц до 0.3 дБ при 20 Гц. Это связано с инерционностью процессов нагрева и остывания толстого полимерного слоя. Глубина модуляции и быстродействие могут быть увеличены при использовании фторполимеров с большим термооптическим коэффициентом, а также путем оптимизации конструкции устройства.

Итак, созданный плавно перестраиваемый аттенюатор для телекоммуникационной области длин волн вблизи 1.5 мкм нечувствителен к поляризации света, имеет

глубину ослабления сигнала до 27 дБ и легко интегрируется в волоконно-оптические цепи. Устройство может также использоваться в качестве датчика температуры и низкочастотного модулятора оптических сигналов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 02-02-16929 и № 04-02-97252, а также гранта НШ-1633.2003.2. Авторы выражают благодарность В.Я.Панченко, В.Н.Семиногову за полезные обсуждения и В.Т.Шашковой за ГПХ-анализ олигомеров.

1. Zhou M. *Opt. Eng.*, **41**, 1631 (2002).
2. Eldada L., Shacklette L.W. *IEEE J. Selected Top. Quantum Electron.*, **6**, 54 (2000).
3. Groh W. *Macromol. Chem.*, **189**, 2861 (1988).
4. Johnstone W., Moodie D., Thursby G., Murray S., Gill M., McDonach A., Culshaw B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1580**, 259 (1991).
5. Pan F., McCallion K., Chiappetta M. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 492 (1999).
6. Millar C.A., Brierley M.C., Mallinson S.R. *Opt. Lett.*, **12**, 284 (1987).
7. Panajotov K.P., Andreev A.T. *J. Opt. Soc. Am. B*, **11**, 826 (1994).
8. Lee S.G., Sokoloff J.P., McGinnis B.P., Sasabe H. *Appl. Opt.*, **37**, 453 (1998).
9. Fawcett G., Johnstone W., Andonovic I., Bone D.J., Harvey T.G., Carter N., Ryan T.G. *Electron. Lett.*, **28**, 985 (1992).
10. Hamilton S.A., Yankelevich D.R., Knoesen A., Weverka R.T., Hill R.A., Bjorklund G.C. *J. Opt. Soc. Am. B*, **15**, 740 (1998).
11. Jung W.G., Kim S.W., Kim K.T., Kim E.S., Kang S.W. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **13**, 1209 (2001).
12. Kim K.T., Song J.W. *Opt. Commun.*, **205**, 113 (2002).
13. Mishakov G.V., Sokolov V.I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4644**, 498 (2001).
14. Соколов В.И., Худобенко А.И. *Квантовая электроника*, **33** (6), 545 (2003).
15. Moshrefzadeh R.S., Radcliffe M.D., Lee T.C., Mohapatra S.K. *J. Lightwave Techn.*, **10**, 420 (1992).
16. Солимено С., Крозиньяни Б., Ди Порто П. *Дифракция и волноводное распространение оптического излучения* (М.: Мир, 1989).