

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

УДК 681.7.068

**СПЕКТРЫ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН
С ТОНКОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ И НАДОБОЛОЧЕЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

© 2020 г. О. В. Иванов^{a, b, c, *}, Л. И. Юсупова^{a, c}, А. М. Низаметдинов^a

^aУльяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Гончарова, 48/2, Ульяновск, 432071 Российская Федерация

^bУльяновский государственный университет,
ул. Л. Толстого, 42, Ульяновск, 432017 Российская Федерация

^cУльяновский государственный технический университет,
ул. Северный Венец, 32, Ульяновск, 432027 Российская Федерация

*E-mail: olegivvit@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.04.2019 г.

После доработки 08.08.2019 г.

Принята к публикации 09.08.2019 г.

Исследованы спектры пропускания волоконно-оптических структур, в которых происходит преобразование мод в отрезке волокна SM450 с малой сердцевинной при нанесении на оболочку волокна тонкопленочного покрытия. Рассчитаны моды и их дисперсионные зависимости для чистого волокна SM450 и для того же волокна с надоболочечным покрытием. Показан интерференционный механизм возникновения провалов в спектре пропускания. Создана установка для нанесения пленок поливинилового спирта на отрезок оптического волокна длиной до 20 см методом вытягивания из раствора, позволяющая производить вытяжку из раствора со скоростями от 0.1 до 1.7 мм/с. Экспериментально измерены спектры пропускания структуры при нанесении надоболочечных слоев. Обнаружено смещение спектров при нанесении тонких пленок. Измерена зависимость величины смещения по длине волны от скорости вытягивания из раствора, определяющей толщину пленки.

DOI: 10.31857/S0033849420070049

ВВЕДЕНИЕ

Оптоволоконные структуры, спектральные характеристики которых определяются взаимодействием и преобразованием нескольких волоконных мод различных типов, привлекают значительный интерес благодаря простоте их создания, компактностью, возможностью использования для измерения параметров внешней среды, таких как показатель преломления, химический состав, влажность и др. Можно выделить следующие структуры указанного вида: длиннопериодные волоконные решетки [1], тейперы [2, 3], смещенные стыки волокон [4], вставки специальных волокон. В качестве вставок применяются многомодовые [5] и маломодовые волокна [6], волокна с тонкой сердцевинной [7–10], без сердцевины [11], с депрессированной оболочкой [12, 13] и др. [14–16].

В волоконных структурах со вставками нестандартных волокон на стыке со стандартным волокном происходит преобразование моды сердцевины в различные моды волокон вставки, в том числе в моды оболочки, поле которых распространяется до внешней поверхности оболочки волокна. Эти моды обладают высокой чув-

ствительностью к различным физическим параметрам внешней среды. Волоконные структуры с такими особенностями находят применение в качестве датчиков, в частности, влажности [15], температуры [7], показателя преломления внешней среды [10, 16], уровня жидкости [17–19].

Вставки из волокон с малой сердцевинной отличаются тем, что сердцевина такого волокна не может удерживать моду и эта мода выходит в оболочку. Интерференция нескольких мод, возбуждаемых на первом стыке вставки и достигших второго стыка, приводит к возникновению достаточно сложных спектров с немонотонным распределением интенсивности по длине волны [17]. Положение спектральных пиков оказывается чувствительным к показателю преломления внешней среды. Ранее было показано, что чувствительность структур, возбуждающих оболочечные моды, может быть существенно увеличена путем нанесения покрытий на оболочку волокна с показателем преломления более высоким по сравнению с показателем преломления оболочки [20]. Увеличение чувствительности достигается за счет концентрации поля мод оболочки вблизи внешней границы волоконной структуры.

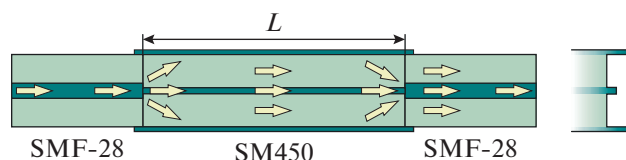


Рис. 1. Схема распространения световых лучей в волоконной структуре и профиль показателя преломления волокна SM450.

Цель данной работы — исследовать волоконно-оптическую структуру со вставкой волокна SM450 с тонкой сердцевиной и нанесенным на оболочку тонкопленочным покрытием на основе поливинилового спирта с показателем преломления более высоким, чем показатель преломления оболочки, проанализировать модовый состав и дисперсионные зависимости для чистого волокна и для того же волокна с надоболочечным покрытием, а также изучить зависимость величины смещения по длине волны от толщины волокна, определяемой скоростью вытягивания из раствора.

1. ВОЛОКОННАЯ СТРУКТУРА

Для создания волоконно-оптической структуры был использован отрезок волокна SM450 (фирма Fibergore, Великобритания) с параметрами: радиус сердцевины $r_c = 1.75$ мкм, числовая апертура $NA = 0.12$, длина волны отсечки $\lambda_{отс} \sim 400$ нм. Данный отрезок вставляли между стандартными волокнами SMF-28 (фирма Corning, США) параметры которых: $r_c = 4.2$ мкм, относительная разница между показателями преломления сердцевины и оболочки $\Delta = 0.36\%$, $NA = 0.14$, $\lambda_{отс} = 1260$ нм. Оптические волокна соединяли с помощью автоматического сварочного аппарата. Длина отрезка волокна SM450 обычно составляет несколько сантиметров.

Малый радиус сердцевины волокна SM450 обусловлен тем, что рабочая длина волны этого волокна лежит в области длин волн около 450 нм. Структура на основе отрезка волокна SM450 была исследована в диапазоне длин волн 1100...1700 нм, на которых сердцевина малого размера удерживает моды достаточно слабо и значительная часть энергии поля фундаментальной моды распространяется через оболочку. При попадании моды волокна SMF-28 на первый стык с волокном SM450, вследствие несогласованности полей двух волокон, имеющих существенно различные параметры сердцевины, мощность из моды сердцевины волокна SMF-28 распределяется между различными модами волокна SM450.

От первого стыка моды распространяются по отрезку волокна SM450 ко второму стыку. Часть энергии рассеивается в результате ее передачи

модам высоких порядков и потерь на поверхности волокна. На втором стыке моды волокна SM450 преобразуются в различные моды сердцевины волокна SMF-28, при этом моды оболочки быстро затухают, а вклады от различных мод волокна SM450 распространяются далее в моде сердцевины волокна SMF-28, интерферируя друг с другом.

Для того чтобы повысить чувствительность созданной структуры к параметрам внешней среды, на оболочку волоконной структуры наносилось тонкопленочное покрытие, которое создавало дополнительный прозрачный надоболочечный слой толщиной от сотен до тысяч нанометров. Показатель преломления этого слоя должен быть больше показателя преломления кварцевой оболочки, чтобы подтягивать поле оболочечных мод от сердцевины к внешнему радиусу [20] и увеличивать поверхностное поле моды, распространяющееся во внешней среде. Покрытие может применяться не только для смещения поля в область границы с внешней средой, но служить в качестве элемента, чувствительного к химическому составу среды (кислотности, солёности и др.). Вид созданной структуры, ход световых лучей в ней и профиль показателя преломления показаны на рис. 1.

2. МОДЫ ВОЛОКОН SM450 И SMF-28

Спектральные свойства исследуемой структуры обусловлены в первую очередь свойствами мод волокна SM450. Проанализируем модовый состав этого волокна, рассчитаем дисперсию и профили распределения мод. Волокно SM450 имеет малую сердцевину, поэтому модовая структура этого волокна существенно отличается от структуры мод стандартного волокна. Расчет эффективных показателей преломления мод волокна SM450 ($n_{эф} = \beta/k_0$, где β — постоянная распространения моды и k_0 — волновое число в вакууме) был произведен в предположении, что волокно имеет ступенчатый профиль со следующими параметрами: радиус сердцевины $r_c = 1.75$ мкм, показатель преломления сердцевины $n_c = n_{об} + 0.0034$, радиус оболочки $r_{об} = 62.5$ мкм. Величину показателя преломления $n_{об}$ рассчитывали с использованием формулы Зельмейера, описывающей дисперсию кварцевого стекла [21].

Для расчета оболочечных мод использовали матричный метод, позволяющий находить моды многослойных цилиндрических световодов с произвольным числом слоев. Метод основан на преобразовании уравнений Максвелла к матричной форме для матриц 4×4 , задающих преобразование вектора поля, составленного из тангенциальных границ электрических и магнитных полей [1].

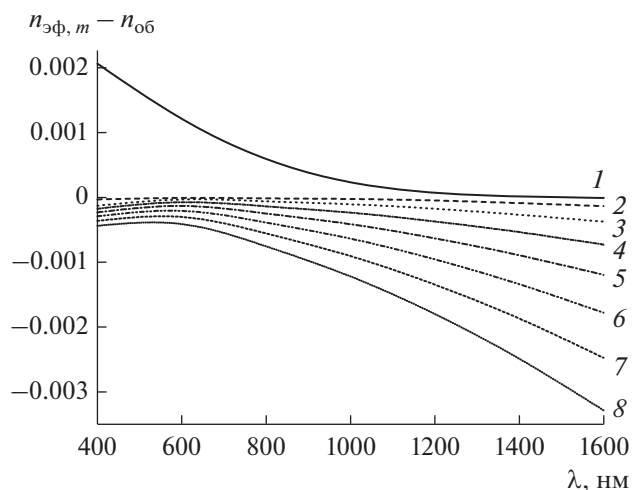


Рис. 2. Дисперсионные зависимости $n_{эф, m} - n_{об}$ для эффективных показателей преломления первых восьми мод LP_{0m} волокна SM450 от длины волны ($LP_{01} \dots LP_{08}$ — 1–8 соответственно).

На рис. 2 приведены зависимости эффективных показателей преломления $n_{эф, m} - n_{об}$ первых восьми азимутально-симметричных мод волокна SM450 от длины волны. Номера кривых соответствуют индексу m , задающему радиальное модовое число линейно поляризованной моды LP_{0m} . Дисперсионные кривые становятся ниже с ростом модового числа. Фундаментальная мода LP_{01} выделяется среди остальных мод и является модой сердцевины до длин волн около 900 нм. Ее эффективный показатель преломления понижается от показателя преломления сердцевины и приближается к показателю преломления оболочки при увеличении длины волн. После 1200 нм она ведет себя аналогично другим оболочечным модам. Дисперсионные зависимости на длинах волн больше 600 нм все более сильно идут вниз с увеличением длины волны. Моды LP_{02}, \dots, LP_{08} во всем исследуемом диапазоне длин волн являются модами внешней оболочки.

Моды оболочки являются модами всего волокна — их поле распространяется как в сердцевине, так и во внешней оболочке волокна. Профили электрического поля E мод LP_{01}, \dots, LP_{04} волокна SM450 на длине волны 1500 нм показаны на рис. 3 (кривые 1–4). Профили нормированы на амплитуды поля в центре волокна. Видно, что с ростом радиального номера моды увеличивается число колебаний амплитуды поля от радиуса внутри оболочки, уменьшается доля поля, распространяющегося вблизи сердцевины волокна, и увеличивается амплитуда поля вблизи внешней поверхности оболочки.

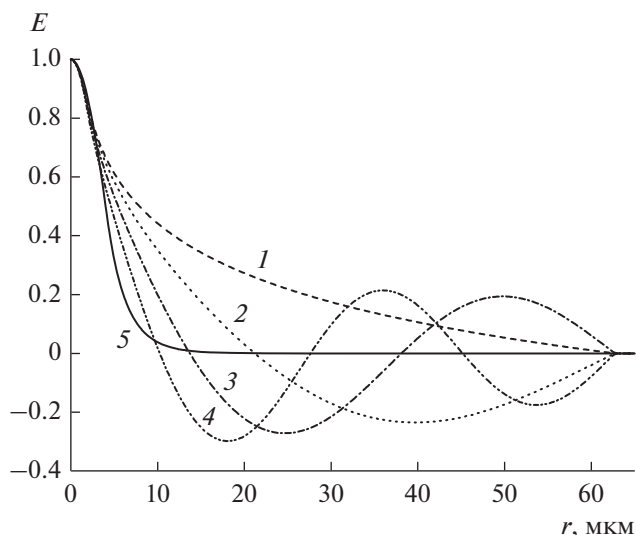


Рис. 3. Профили амплитуды электрического поля мод волокон SM450 ($LP_{01} \dots LP_{04}$ — кривые 1–4 соответственно) и SMF-28 (LP_{01} — кривая 5) на длине волны 1500 нм.

На стыке стандартного волокна и волокна с тонкой сердцевиной излучение из сердцевины волокна SMF-28 попадает в волокно SM450, при этом энергия излучения перераспределяется между модами волокна SM450. Эффективность передачи энергии определяется схожестью профиля поля принимающего волокна и поля моды сердцевины подводящего волокна (интегралом перекрытия мод). Профиль моды сердцевины волокна SMF-28 имеет существенно более узкое распределение по сравнению с модами волокна SM450 (см. рис. 3, кривая 5), поэтому не происходит передачи энергии в какую-то отдельную моду, а возбуждается сразу несколько мод.

3. МОДЫ ВОЛОКНА SM450 С ПОКРЫТИЕМ

При нанесении тонкопленочного покрытия на оболочку оптического волокна происходит добавление дополнительного оптического слоя, который может изменять постоянные распространения оболочечных мод или, если его показатель преломления выше показателя преломления оболочки, приводит к возникновению мод внешнего слоя. С точки зрения увеличения чувствительности оболочечных мод интерес представляет нанесение покрытий с показателем преломления выше показателя преломления оболочки, поэтому рассмотрим именно этот случай.

На внешнюю оболочку волокна наносится покрытие из поливинилового спирта. При расчете мод волоконной структуры с покрытием необходимо учитывать зависимости показателей преломления от длины волны как самого волокна,

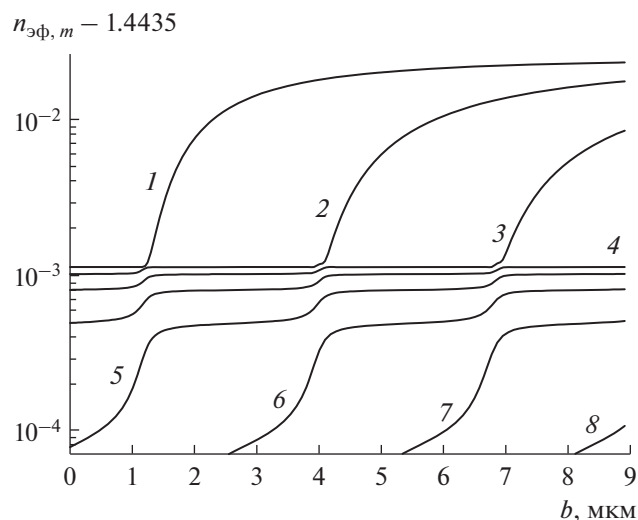


Рис. 4. Зависимости эффективных показателей преломления первых восьми мод LP_{0m} волокна SM450 от толщины надоболочечного покрытия (LP_{01}, \dots, LP_{08} – кривые 1–8 соответственно) на длине волны 1500 нм.

так и покрытия. Для дисперсии показателя преломления поливинилового спирта используем результаты работы [22]:

$$n^2 - 1 = \frac{1.1490\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1234783^2}. \quad (1)$$

На рис. 4 приведены зависимости эффективных показателей преломления первых восьми мод ($LP_{01} \dots LP_{08}$) волокна SM450 от толщины надоболочечного покрытия на длине волны 1500 нм. При нулевой толщине покрытия набор мод совпадает с набором мод волокна SM450. При увеличении толщины эффективные показатели преломления растут вследствие повышения среднего показателя преломления структуры. После достижения толщины 1 мкм покрытие захватывает первую моду LP_{01} и ее эффективный показатель преломления начинает стремиться к показателю преломления поливинилового спирта. Все остальные моды делают скачок на одну моду вверх: мода LP_{0m+1} продолжает идти по пути моды LP_{0m} с ростом толщины. На толщине 4 мкм следующая мода LP_{02} переходит в покрытие, а остальные моды делают скачок. Аналогичный перескок повторяется примерно через каждые 2.8 мкм прироста толщины пленки.

Посмотрим на этот процесс изменения мод с другой точки зрения – в зависимости от длины волны при фиксированной толщине пленки. На рис. 5 показаны эффективные показатели преломления $n_{эф, m} - n_{об}$ первых восьми мод LP_{0m} волокна SM450 с надоболочечным покрытием толщиной 2 мкм в зависимости от длины волны. Полученные кривые идут по длине волны в обратном порядке по сравнению с зависимостями от толщины, что

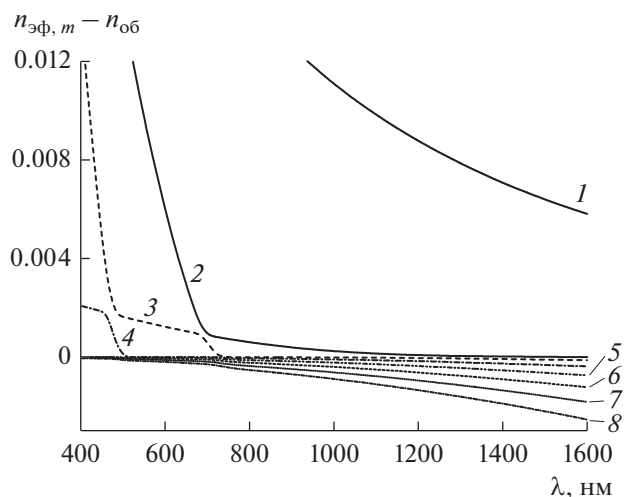


Рис. 5. Дисперсионные зависимости эффективных показателей преломления первых восьми мод LP_{0m} волокна SM450 с надоболочечным покрытием толщиной 2 мкм от длины волны (LP_{01}, \dots, LP_{08} – кривые 1–8 соответственно).

связано с уменьшением отношения толщины покрытия к длине волны при сдвиге в красную сторону спектра.

На длине волны 1600 нм одна мода LP_{01} является модой покрытия и отстоит достаточно далеко от остальных мод. При уменьшении длины волны ее эффективный показатель преломления сильно растет, тогда как другие моды ведут себя как обычные оболочечные моды. Рост эффективного показателя преломления моды внешнего покрытия с уменьшением длины волны вызван тем, что все большая часть этой моды расположена внутри слоя внешнего покрытия. На длине волны 700 нм вторая мода уходит в покрытие с перескоком на одну моду для мод LP_{03}, \dots, LP_{08} , и на длине волны 460 нм – третья мода. В ИК-диапазоне, используемом в волоконной оптике, для указанной толщины только одна мода является модой покрытия. Поле этой моды в основном распространяется по покрытию, поэтому интеграл перекрытия этой моды с модой сердцевины волокна SMF-28 пренебрежимо мал, и ее участие во взаимодействии мод можно не учитывать.

На длинах волн, соответствующих сближению дисперсионных зависимостей двух мод, эти моды имеют схожие профили: поле присутствует и в сердцевине и в оболочке, а осцилляции их поля по радиусу происходят в противофазе [12]. На стыке со стандартным волокном мода сердцевины преобразуется в волокне-вставке в несколько мод высоких порядков, возвращение которых в сердцевину происходит со значительными потерями и сопровождается их интерференцией между собой.

4. НАНЕСЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ВОЛОКНО

Для нанесения на волоконные световоды полимерных покрытий на основе поливинилового спирта был использован метод погружения и вытягивания из раствора. Сначала волоконную структуру из отрезка волокна SM450, зачищенного от полимерного покрытия и сваренного между зачищенными на концах стандартными волокнами, погружали в емкость с заранее приготовленным водным раствором поливинилового спирта. Затем волокно вытягивали вертикально вверх из раствора, остатки которого стекают под действием сил поверхностного натяжения и силы тяжести. Часть раствора остается на волокне в виде тонкой жидкой пленки, толщина которой определяется скоростью вытягивания, после чего пленка высыхает, закрепляясь на поверхности волокна. Чем быстрее волокно вытягивают из раствора, тем толще оказывается слой материала, осаждающийся на волокне. Толщина пленки также может контролироваться изменением вязкости (концентрации) раствора. В некоторых случаях в процессе высыхания происходит стекание раствора под действием силы тяжести, что приводит к меньшей толщине пленки в верхней части волокна. После вытягивания поливиниловая пленка покрывает всю структуру, включая места сварки и зачищенные концы стандартных волокон, однако наличие покрытия на этих концах никак не сказывается на спектрах структуры, так как оболочечные моды из стандартного волокна остаются только в оболочке и теряются, не проникая в сердцевину.

Как уже отмечалось, для увеличения поверхностного поля мод волокна показатель преломления пленки должен быть больше показателя преломления оболочки волокна. Показатель преломления поливинилового спирта на длине волны около 1500 нм примерно равен 1.47, а кварца – 1.44, т.е. требуемое соотношение выполняется. Раствор поливинилового спирта приготавливали растворением порошка поливинилового спирта в дистиллированной воде на паровой бане в течение 1 ч. Концентрация поливинилового спирта в растворе может варьироваться в пределах от 3.5 до 15 (мас. %). Мы использовали раствор с концентрацией спирта 4%.

Скорость вытягивания из раствора может варьироваться от десятков микрон до нескольких миллиметров в секунду. После нанесения пленки образцы сушили при комнатной температуре в течение нескольких минут. Указанные выше параметры приготовления раствора и режима нанесения позволяют получить пленки толщиной от сотен до тысяч нанометров.

Для погружения и вытягивания оптического волокна из раствора была создана установка

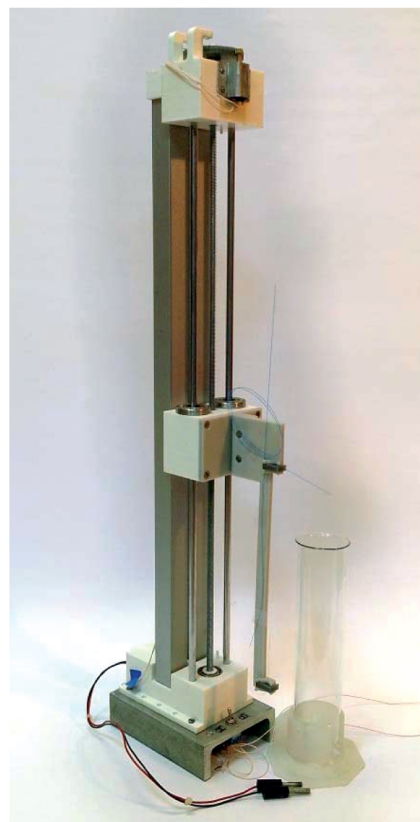


Рис. 6. Фотография установки для нанесения покрытий на волокно.

(рис. 6), на которой волокно закрепляется и равномерно движется вдоль вертикальной оси. В установке имеется шаговый двигатель с понижающим редукторным механизмом, который через редукторный механизм крутит опорный вал,двигающий каретку со скоростью 0.1...1.7 мм/с. Для уменьшения биений, люфтов и улучшения плавности хода в каретке установлены три линейных подшипника. На каретке через специальные отверстия закреплен держатель волокна. Отрезок волокна с двойной оболочкой длиной 20 см, зачищенный от полимерного покрытия, зажимали с небольшим натяжением между двумя фиксаторами на держателе. С помощью переключателя меняли направление вращения винта и направление движения держателя с волокном вверх или вниз.

Окружающая среда оказывает влияние на испарение растворителя и может влиять на процесс формирования прозрачной пленки, поэтому необходимо контролировать состояние окружающей среды. Для этого установка была размещена в специальной камере, которая позволяла стабилизировать условия вытяжки – поддерживать постоянную температуру, влажность, отсутствие воздушных потоков. Это давало возможность

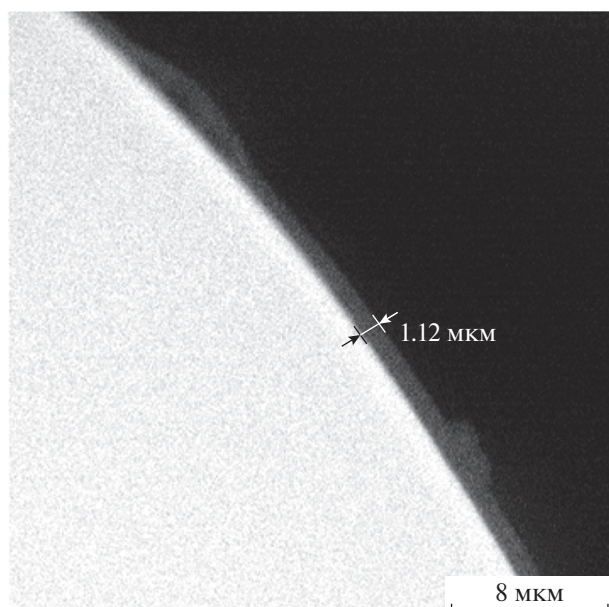


Рис. 7. Изображение торца волокна с надоболочечным слоем толщиной 1.12 мкм, полученного вытягиванием из раствора на скорости 1.632 мм/с.

улучшить однородность толщины и качества покрытия по длине волокна.

С помощью сканирующего электронного микроскопа была измерена толщина пленки, нанесенной вытягиванием волокна со скоростью 1.632 мм/с. Изображение торца волокна, полученное на микроскопе, представлено на рис. 7. Измеренная толщина пленки составила 1.12 мкм.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ

Для измерения спектра пропускания структуры свет от широкополосного источника (лампа накаливания или суперлюминесцентный диод) запускается в стандартное волокно, проходит через исследуемую структуру снова в стандартное волокно и направляется в спектральный анализатор. Структуру на основе отрезка вставки волокна длиной 88 мм, зачищенного от полимерного покрытия, с приваренными с двух его концов стандартными волокнами фиксировали между двумя держателями в слегка натянутом положении. При этом по возможности были исключены деформации структуры, такие как изгиб или скрутка вдоль продольной оси волокна.

Вытягиванием из раствора на волокно наносили тонкопленочное покрытие поливинилового спирта. Измерение спектра производили через 5 минут после окончания вытяжки в положении, когда все волокно находилось в воздухе. После измерения спектра волокно промывали в воде и протирали этиловым спиртом. Данную процедуру повторяли несколько раз для различных ско-

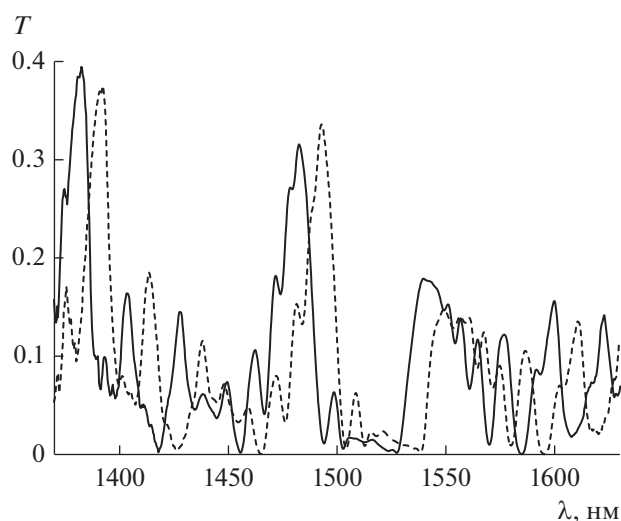


Рис. 8. Спектры структуры без покрытия (сплошная кривая) и с поливиниловым надоболочечным слоем, нанесенным вытягиванием из раствора на скорости 1.51 мм/с (штриховая).

ростей вытягивания. Таким образом, скорость вытяжки уменьшали от 0.5 до 1.6 мм/с. Эксперимент был закончен измерением спектра пропускания структуры без покрытия.

На рис. 8 показаны измеренные спектры пропускания структуры без покрытия (сплошная кривая) и с поливиниловым надоболочечным слоем, нанесенным вытягиванием из раствора на скорости 1.51 мм/с (штриховая). Спектры представляют собой серию пиков с расстоянием порядка нескольких десятков нанометров между ними. Видно, что при нанесении пленки на поверхность оболочки имеет место смещение всего спектра в область больших длин волн, при этом в целом его форма сохраняется. Сдвиг спектра в среднем происходит на величину около 10 нм. Причиной сдвига спектра — изменение профиля показателя преломления волокна в результате нанесения пленки — приводит к смещению профилей оболочечных мод и изменению их постоянных распространения.

Рассмотрим интерференцию мод в структуре немного более подробно. Предположим, что в волокне преимущественно происходит взаимодействие некоторых мод из всего набора мод волокна. Условие конструктивной интерференции двух мод имеет вид

$$(n_{\text{эф},i} - n_{\text{эф},j})L = p\lambda, \quad (2)$$

где $n_{\text{эф},i}$ и $n_{\text{эф},j}$ — эффективные показатели преломления двух мод, λ — длина волны света в вакууме, L — длина волокна-вставки и p — целое число. После нанесения покрытия толщиной Δb

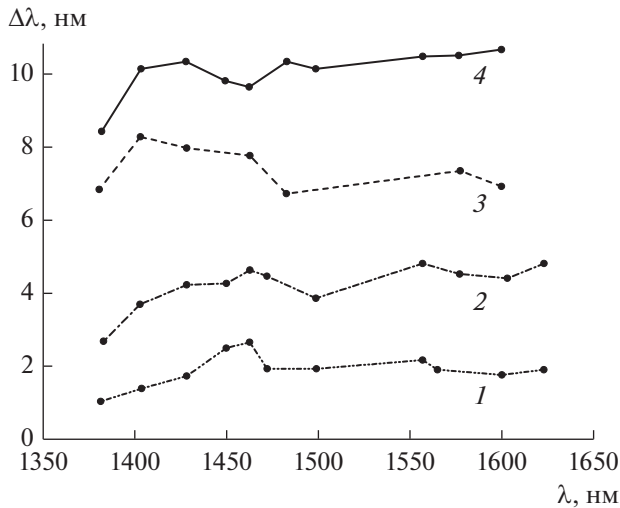


Рис. 9. Зависимость сдвига длины волны пиков спектра пропускания при различных скоростях вытягивания волокна из раствора 0.59 (1), 0.87 (2), 1.31 (3) и 1.51 мм/с (4).

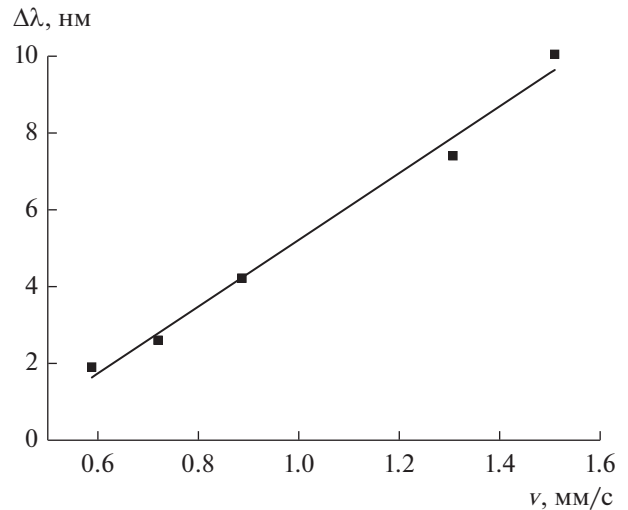


Рис. 10. Зависимость усредненного сдвига длины волны от скорости вытягивания волокна из раствора.

условие конструктивной интерференции выполняется уже на другой длине волны $\lambda + \Delta\lambda$:

$$\left(n_{\text{эф},i} + \frac{dn_{\text{эф},i}}{d\lambda} \Delta\lambda + \frac{dn_{\text{эф},i}}{db} \Delta b - n_{\text{эф},j} - \frac{dn_{\text{эф},j}}{d\lambda} \Delta\lambda - \frac{dn_{\text{эф},j}}{db} \Delta b \right) L = p(\lambda + \Delta\lambda). \quad (3)$$

Вычитая из последнего выражения уравнение (2), получим

$$\Delta\lambda \left(\frac{dn_{\text{эф},i}}{d\lambda} - \frac{dn_{\text{эф},j}}{d\lambda} \right) + \Delta b \left(\frac{dn_{\text{эф},i}}{db} - \frac{dn_{\text{эф},j}}{db} \right) L = p\Delta\lambda, \quad (4)$$

откуда, снова используя (2), найдем смещение интерференционного максимума по длине волны:

$$\Delta\lambda = \frac{\frac{dn_{\text{эф},i}}{db} - \frac{dn_{\text{эф},j}}{db}}{\frac{n_{\text{эф},i} - n_{\text{эф},j}}{\lambda} - \frac{dn_{\text{эф},i}}{d\lambda} + \frac{dn_{\text{эф},j}}{d\lambda}} \Delta b. \quad (5)$$

Производные эффективных показателей преломления по длине волны можно получить из дисперсионных кривых (см. рис. 5), а производные по толщине – из аналогичных зависимостей от толщины (см. рис. 4). Оценка показывает, что расчетный сдвиг длины волны составляет от нескольких до десятка нанометров для толщины пленки 1 мкм, что близко к значениям сдвига, наблюдаемым экспериментально.

Зависимости сдвига длины волны нескольких пиков спектра пропускания при различных скоростях вытягивания волокна из раствора приведены на рис. 9. Видно, что при увеличении скорости вытягивания сдвиг растет от 2 до 10 нм, что связано с соответствующим увеличением толщи-

ны пленки. В то же время есть некоторый рост величины сдвига для пиков на больших длинах волн. На рис. 10 показана зависимость усредненного сдвига длины волны для измеренных пиков от скорости вытягивания волокна из раствора. Полученная зависимость близка к линейной с коэффициентом наклона 8.7 нм/(мм/с).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования волоконно-оптической структуры, основанной на вставке волокна SM450 с малой сердцевиной и нанесенным тонкопленочным покрытием из поливинилового спирта, показали, что при увеличении толщины покрытия возникают моды внешнего слоя. При этом на определенной толщине или длине волны происходит перескок мод, когда вторая мода занимает место моды, перешедшей во внешний слой, а каждая следующая мода – место предыдущей. Спектры пропускания структуры содержат пики, обусловленные интерференцией оболочечных мод волокна с расстоянием порядка нескольких десятков нанометров между ними. При увеличении толщины покрытия до 1 мкм происходит смещение провалов в спектрах в длинноволновую область. Величина сдвига монотонно растет при увеличении скорости вытягивания, определяющей толщину покрытия. Расчетная оценка сдвига по длине волны совпадает по порядку величины с результатами, полученными в эксперименте.

Волоконные структуры исследованного типа с нанесенным тонкопленочным покрытием из поливинилового спирта могут использоваться в сенсорных приложениях в качестве элемента,

чувствительного к влажности или химическому составу внешней среды, благодаря зависимости показателя преломления поливинилового спирта от указанных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов О.В., Никитов С.А.* Оболочечные моды волоконных световодов и длиннопериодные волоконные решетки. М.: Физматлит, 2012.
2. *Frazaõ O., Falate R., Fabris L. et al.* // Opt. Letters. 2006. V. 31. № 20. P. 2960.
3. *Tong C., Chen X., Zhou Y. et al.* // Optical Review. 2018. V. 25. № 3. P. 295.
4. *Dong X., Su L., Shum P. et al.* // Opt. Commun. 2006. V. 258. № 2. P. 159.
5. *Silva S., Frazao O., Viegas J. et al.* // Meas. Sci. Technol. 2011. V. 22. № 8. P. 085201.
6. *Li A., Wang Y., Hu Q., Shieh W.* // Opt. Express. 2015. V. 23. № 2. P. 1139.
7. *Bao W., Hu N., Qiao X. et al.* // IEEE Photonics Technol. Lett. 2016. V. 28. № 20. P. 2245.
8. *Li L., Xia L., Xie Z., Liu D.* // Opt. Express. 2012. V. 20. № 10. P. 11109.
9. *Huang X., Li X., Yang J. et al.* // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 44994.
10. *Xia T.-H., Zhang A.P., Gu B., Zhu J.-J.* // Opt. Commun. 2010. V. 283. № 10. P. 2136.
11. *Novais S., Ferreira M.S., Pinto J.L.* // Coatings. 2018. V. 8. P. 453.
12. *Иванов О.В.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 10. С. 1041.
13. *Ivanov O.V., Yang F., Tian F., Du H.* // Opt. Express. 2017. V. 25. № 25. P. 31197.
14. *Pang F., Liang W., Xiang W. et al.* // IEEE Photonics Technol. Lett. 2009. V. 21. № 2. P. 76.
15. *Akita S., Sasaki H., Watanabe K. et al.* // Sensors and Actuators B: Chem. 2010. V. 147. № 2. P. 385.
16. *Zhao Y., Pang F., Dong Y. et al.* // Opt. Express 2013. V. 21. № 22. P. 26136.
17. *Ben X.U., Jian-Qing L.I., Yi L.I., Dong X.-Y.* // Chin. Phys. Lett. 2012. V. 29. №. 10. P. 104209.
18. *Antonio-Lopez J.E., Sanchez-Mondragon J.J., LiKamWa P., May-Arrijoja D. A.* // Opt. Lett. 2011. V. 36. № 17. P. 3425.
19. *Gu B., Qi W., Zhou Y. et al.* // Opt. Express. 2014. V. 22. № 10. P. 11834.
20. *Villar I.D., Achaerandio M., Matías I.R. et al.* // Opt. Lett. 2005. V. 30. № 7. P. 720.
21. *Fleming J.W.* // Appl. Opt. 1984. V. 23. № 24. P. 4486.
22. *Bodurov I., Vlaeva I., Viraneva A. et al.* // Nanosci. Nanotechnol. 2016. V. 16. P.31.