

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы является, прежде всего, создание новых физико-математических моделей для описания свойств волоконных световодов, улучшающих понимание физических процессов при распространении излучения по ВС и являющихся основой для развития теоретических представлений, методик численного моделирования и расчетов параметров волоконно-оптических устройств. Это позволяет создать принципиально новые волоконно-оптические системы и методики измерений параметров световодов, выработать научно обоснованные технические требования к элементам волоконно-оптических устройств в зависимости от решаемой технической задачи.

Как наиболее значимые, можно выделить следующие результаты.

1. Получены асимптотические формулы для собственных чисел волноводных мод волоконного световода со ступенчатым профилем показателя преломления, в частности, для расчета разности собственных чисел и постоянных распространения мод, образующих линейно поляризованные модовые группы, описания напряженностей электромагнитного поля излучения волноводных мод и оптических вихрей в дальней зоне дифракции в виде простых арифметических выражений. Что послужило основой для теоретического исследования поляризационных свойств и разработки методики численного моделирования, описанных выше.

2. Создана волновая теория деполяризации излучения в многомодовых ВС со ступенчатым ППП, позволяющая корректно описать все известные в настоящее время закономерности. В частности, показано, что гипотеза о частичном сохранении интегральной степени линейной поляризации выходящего излучения ($p = 1/2$) при бесконечно большой длине световода является следствием неточности физической модели распространения и интерференции выходящего излучения. Теоретически и экспериментально показано существование угла, названного углом отсечки линейной поляризации γ_d , обладающего указанными ниже свойствами, и определена взаимосвязь угла отсечки с параметрами световода. Если наведенное двулучепреломление и перераспределение энергии волноводных мод при распространении в ВС сравнительно малы, то при углах ввода γ меньше γ_d выходящее излучение сохраняет параметры поляризации вводимого излучения, а при $\gamma > \gamma_d$ - излучение можно считать деполяризованным. Аналогично, в случае равномерного возбуждения волноводных мод на входе световода линейно-поляризованным излучением, излучение, выходящее из ВС по углам θ менее γ_d , сохраняет линейную поляризацию, а при $\theta > \gamma_d$ - является

деполяризованным. Предложена аппроксимация зависимости интегральной степени линейной поляризации выходящего излучения от угла выхода, пригодная для практического использования. Показана возможность использования одного из коэффициентов аппроксимации в качестве объективной численной оценки влияния внутренних дефектов световода, обусловленных наведенным двулучепреломлением и эффектом взаимосвязи мод на поляризационные свойства ВС. Выявленные теоретические закономерности, подтвержденные результатами экспериментальных исследований и методом численного моделирования, открывают новые возможности использования многомодовых ВС для передачи мощного поляризованного излучения.

3. Получены аналитические формулы для описания спектрально-поляризационных биений в одномодовом двулучепреломляющем световоде с локальным дефектом. Установлено, что в случае, если локальный дефект, расположенный на расстоянии L_1 от входного торца, приводит к перераспределению энергии между модами двух ортогональных поляризаций, то при выполнении условия $L_1 \ll L$, где L – длина световода, на выходе ВС наблюдается модуляция амплитуды спектрально-поляризационных биений с периодом, обратно пропорциональным разности $L - L_1$, а при выполнении условия $|L/2 - L_1| \ll L$ – биения наблюдаются на периодически изменяющемся уровне интенсивности с периодом, обратно пропорциональным разности $|L/2 - L_1|$. Разработана методика и выполнено численное моделирование спектрально-поляризационных биений для случая большого количества локальных дефектов (N_d) со случайным расположением по длине. Показано, что при $N_d \gg 1$ спектрально-поляризационные биения на выходе ВС наблюдаются независимо от плоскости поляризации излучения на входе в ВС, а амплитуда биений практически не зависит от длины волны. На основании полученных данных объяснены спектрально-поляризационные зависимости реальных световодов, измеренные экспериментально. Использование представленных зависимостей расширяет возможности методов измерения параметров одномодовых двулучепреломляющих волокон.

4. Разработана методика численного моделирования распределений интенсивности выходящего из ВС когерентного излучения, позволяющая корректно описать как образующуюся спекл-структуру, так и усредненное по фазам интерферирующих волн заданное угловое распределение интенсивности. Выполнено исследование пространственных статистических характеристик спекл-структур излучения волоконных световодов со ступенчатым профилем ППП методом численного моделирования как для волноводных мод, так и для оптических вихрей,

распространяющихся в ВС. Определены корреляционные расстояния спекл-структур при постоянном азимутальном ΔL_r ($\varphi = const$) и аксиальном ΔL_φ ($r = const$) углах. Установлено, что при возникновении в ВС оптических вихрей с одним направлением вращения волнового фронта величина ΔL_φ возрастает, а СПС становится анизотропной. Смоделировано пространственное изменение спекл-структур ВС при изменении длины волны излучения. Теоретически и методом ЧМ показано, и экспериментально подтверждено, что СПС, сформированных излучением оптических вихрей, в отличие от СПС, образованных излучением волноводных мод, при изменении длины волны имеют преимущественное азимутальное направление движения, что можно рассматривать как вращение СПС. Рассчитаны функции взаимной корреляции спекл-структур, измеренных экспериментально, а также полученных методом ЧМ, при различных длинах волн и различных углах выхода излучения. Определены условия возникновения оптических вихрей при распространении линейно-поляризованных групп по световоду, а также при вводе излучения в ВС.

5. Создана методика, позволяющая различать спекл-структуры, сформированные оптическими вихрями с одинаковым направлением вращения от СПС, образованных преимущественно волноводными модами со сравнительно малыми значениями азимутальных индексов, при постоянной длине волны излучения, посредством разделения выходящего излучения на два пучка, которые далее, с помощью оптической системы, совмещаются таким образом, что перекрываются диаметрально противоположные участки каждого распределения, соответственно, изменяются пространственные характеристики СПС в зависимости от типа интерферирующих волн. Предложенная методика была проверена методом численного моделирования и подтверждена экспериментально.

6. Обнаружена новая разновидность эффекта вращения спекл-структуры выходящего излучения при изгибе световода одновременно в двух плоскостях. Используя выявленный эффект, был создан лабораторный макет принципиально нового волоконно-оптического датчика угла поворота. Основным достоинством датчика является возможность использования корреляционного анализа движения спекл-пятен для выделения полезного сигнала на фоне помех, возникающих при случайных деформациях световода и изменении длины волны излучения.

7. Разработана методика измерения угловых передаточных характеристик (УПХ) волоконных световодов, позволяющая оценить влияние неточности юстировки оптической системы на параметры измеряемых зависимостей. Экспериментально

измерены УПХ различных волоконных световодов. Предложена простая физическая модель, объясняющая выявленные закономерности и позволяющая получить простые аналитические выражения для описания УПХ хорошо согласующиеся с экспериментом.

8. Разработан квазилучевой подход для решения задач ввода-вывода излучения, сохраняющий простоту классической лучевой модели, но позволяющей формально учесть влияние энергообмена между модами и дифференциальное модовое затухание.

9. Создана теоретическая основа для расчета влияния оптических неоднородностей входной торцевой поверхности волоконного световода на параметры вводимого излучения. Получены простые формулы для оценки изменения эффективности ввода, модового состава, угловых передаточных характеристик, диаграммы направленности, а также величины обратно отраженного излучения. Показано, что имеет место хорошее соответствие теории и полученных экспериментальных данных. Из представленных оценок следует, что рассеяние на входном торце ВС наиболее сильно влияет на модовый состав, соответственно на поляризационные характеристики вводимого излучения, а дефекты выходного торца ВС – на величину обратно отраженного излучения.

10. Предложен способ равномерного возбуждения волноводных мод при проведении измерений параметров волоконных световодов, заключающийся в последовательном нанесении слоев светорассеивающего лака с одновременным контролем рассеивающих свойств покрытия. Экспериментально подтверждена возможность использование предложенной методики для стандартизации измерений параметров световодов с параболическим и ступенчатым профилями показателя преломления.

11. Исследованы параметры модового шума при пространственной фильтрации выходящего из ВС излучения, обусловленные изменением фаз интерферирующих мод или оптических вихрей. Сопоставлением пространственных характеристик спекл-структур и параметров шума установлено, что СПС, формируемая группой оптических вихрей с одинаковыми направлениями вращения волновых фронтов, создает модовый шум приблизительно в два раза больший, чем аналогичная группа волноводных мод. Экспериментально показана возможность снижения модового шума, обусловленного излучением оптических вихрей, посредством использования диффузного рассеивателя на выходном торце световода или за счет рассеяния распространяющегося в ВС излучения на искусственно созданном изгибе световода.