

**ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ**

© 2005 г. М. В. Греков, С. А. Васильев, И. Г. Королев,
А. С. Божков, О. И. Медведков, А. К. Сенаторов

*Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38
E-mail: sav@fo.gpi.ru; тел. (095) 132-8306
Поступила в редакцию 10.06.2004 г.*

Описаны характеристики прибора, разработанного для измерения углового распределения интенсивности выходного излучения волоконных световодов в дальней зоне. Управление поворотным транслятором прибора осуществляется через стандартный параллельный порт персонального компьютера, а сбор и оцифровка экспериментальных данных выполняются с помощью стандартной звуковой платы. Проведены измерения с динамическим диапазоном более 50 дБ. Приведены примеры измерений, выполненных этим прибором для одномодовых волоконных световодов нескольких типов. Продемонстрировано хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных. Исследовано влияние динамического диапазона измерений в дальней зоне на точность вычисления распределения поля моды.

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределение электромагнитного поля мод волоконного световода имеет важное значение при анализе волноводных и диссипативных свойств световода, при оценке его эксплуатационных характеристик, потерь при соединении с другими световодами и т.д. Поэтому вопросам расчета и измерения указанного распределения уделяется большое внимание. Во многих практических приложениях, в том числе в линиях волоконно-оптической связи, используются одномодовые волоконные световоды, по сердцевине которых излучение распространяется лишь в основной (фундаментальной) моде. В данной работе будут рассматриваться волоконные световоды, которые являются одномодовыми в рабочем диапазоне длин волн.

Как правило, распределение поля моды волоконного световода рассчитывают исходя из заранее определенного радиального распределения показателя преломления путем решения волнового уравнения [1]. Вместе с тем, когда это распределение неизвестно или известно с недостаточной высокой точностью, а также некоторым образом модифицируется при том или ином воздействии на световод (например, диффузионное размывание легирующей примеси [2] или изменение упругих напряжений в области сердцевины [3]), возникает необходимость экспериментального определения этого распределения с высокой точностью.

Существует значительное число методов экспериментального измерения распределения поля моды в волоконном световоде [4]. Отметим, что

во всех случаях экспериментальных измерений речь идет об определении интенсивности оптического излучения, детектируемого приемными устройствами. Наиболее общим и прямым методом измерения радиального распределения интенсивности моды является измерение распределения интенсивности поля в увеличенном изображении торца волоконного световода (метод измерения в ближней зоне). В качестве приемников оптического излучения в этом методе могут использоваться электронно-лучевые приборы, инфракрасные п.з.с.-матрицы, также увеличенное изображение может быть просканировано точечным фотоприемником. Однако данный метод не обеспечивает высокого пространственного разрешения, необходимого для детального анализа распределений одномодовых волоконных световодов, размер которых может составлять ~1 мкм. Разрешение существующих приемных устройств требует значительного увеличения изображения торца световода, при этом становятся существенными абберрации оптических систем, приводящие к искажению измеряемого распределения.

Более простым и дающим более надежные результаты является измерение распределения интенсивности в дальней зоне (в дальнем поле) – углового распределения интенсивности излучения, выходящего из торца волоконного световода. Основным способом при таких измерениях является сканирование излучения фотоприемником по дуге вокруг оси, на которой расположен торец световода, или поворот световода вокруг этой оси при неподвижно закрепленном фотоприемнике.

Такая конфигурация позволяет измерить распределение с высоким угловым разрешением. Если распределение не является осесимметричным, то измерения проводят для нескольких углов поворота световода относительно своей оси.

В данной работе приведено подробное описание прибора, разработанного для измерения распределения интенсивности в дальней зоне; обсуждаются конкретные проблемы, возникающие при реализации такой методики и обработке полученных результатов; даны примеры конкретных измерений, проведенных для волоконных световодов нескольких типов.

2. СВЯЗЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ С ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ В СВЕТОВОДЕ

Распространяющееся по волоконному световоду излучение на выходе из него формирует в свободном пространстве расходящуюся электромагнитную волну. Угловое распределение этого излучения можно считать сформировавшимся и не зависящим от расстояния от торца световода до точки измерения r [4], если

$$r \gg z_R = \pi w^2 / \lambda, \quad (1)$$

где z_R – рэлеевское расстояние, w – характерный радиус поля моды волоконного световода, λ – длина волны, на которой проводится измерение.

Соотношение между распределениями электрического поля в ближней $E(\rho', \varphi')$ и дальней $E_f(r, \theta, \varphi)$ зонах в полярных координатах для произвольной моды может быть представлено в следующем виде:

$$E_f(r, \theta, \varphi) = \frac{j}{\lambda r} \exp(-jkr) \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E(\rho', \varphi') \times \exp[jk\rho' \sin\theta \cos(\varphi - \varphi')] \rho' d\rho' d\varphi'. \quad (2)$$

В случае осесимметричных мод, в том числе для основной моды волоконного световода, распределения не имеют зависимостей от азимутальных углов φ и φ' , и соотношение может быть переписано в виде:

$$E_f(r, \theta) = \frac{j2\pi}{\lambda r} \exp(-jkr) \int_0^\infty E(\rho') J_0(k\rho' \sin\theta) \rho' d\rho', \quad (3)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

Для математических вычислений удобно использовать нормализованную угловую координату, называемую пространственной частотой $q = \sin\theta/\lambda$, при этом уравнение записывается в виде так называемого преобразования Ганкеля:

$$E_f(r, \theta) = \frac{j}{\lambda r} \exp(-jkr) E_H(q), \quad (4)$$

$$\text{где } E_H(q) = 2\pi \int_0^\infty E(\rho') J_0(2\pi q\rho') \rho' d\rho'.$$

Использование обратного преобразования Ганкеля позволяет получить $E(\rho')$ из распределения, измеренного в дальнем поле:

$$E(\rho') = 2\pi \int_0^\infty E_H(q) J_0(2\pi q\rho') q dq, \quad (5)$$

где $E_H(q) = -j\lambda r \exp(jkr) E_f(r, \theta)$ при $\theta = 1/\sin(q\lambda)$.

Распределение интенсивности излучения в дальней зоне, как уже упоминалось, может быть относительно легко измерено, поэтому соотношение (5) обычно используется на практике для получения распределения поля моды волоконного световода.

3. РАЗЛИЧНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИУСА ПОЛЯ МОДЫ

Для практических целей (анализ, сравнение и т.д.) часто используют лишь значение радиуса или диаметра моды, измеренное или заданное определенным образом. В зависимости от задачи могут быть полезными радиусы моды, определенные различными способами. Детальное рассмотрение этого вопроса дано, например, в [4].

Наиболее простым способом определения ширины распределения поля является нахождение радиуса, при котором амплитуда электромагнитного поля уменьшается в e раз по отношению к ее максимальной величине. При этом интенсивность моды спадает в e^2 раз.

Для удобного представления распределения поля в ближней и дальней зонах часто используют функцию Гаусса, которая во многих случаях имеет приемлемую для практических приложений точность аппроксимации реального распределения поля основной моды волоконного световода:

$$E_G(\rho') \approx E_0 \exp[-(\rho'/w_G)^2], \quad (6)$$

где E_0 – амплитуда поля на оси световода $\rho' = 0$. Такое представление часто является удобным, так как содержит лишь один параметр, характеризующий его радиус w_G .

При преобразовании Ганкеля функция Гаусса преобразуется в функцию Гаусса, поэтому для нормированного распределения (6)

$$E_G(\rho') = \frac{2}{w_G} \exp[-(\rho'/w_G)^2] \quad (7)$$

распределение поля в дальней зоне имеет вид:

$$E_{GH}(q) = \frac{2}{W_G} \exp[-(q/W_G)^2], \quad (8)$$

причем ширина гауссового распределения в дальней зоне W_G связана с шириной распределения в световоде w_G соотношением $W_G = (\pi w_G)^{-1}$.

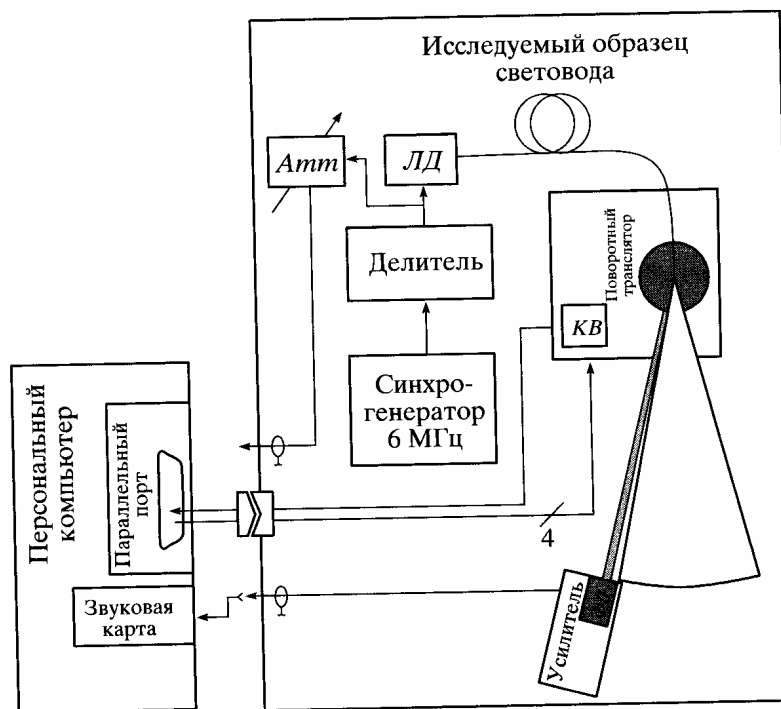


Рис. 1. Принципиальная схема прибора для измерения интенсивности излучения волоконного световода в дальней зоне. ЛД – лазерный диод, КВ – концевой выключатель, ФД – фотодиод, Атт – аттенюатор.

В ряде специальных задач используются соотношения, задающие радиус поля моды таким образом, чтобы отразить влияние распределения поля на ту или иную характеристику процесса распространения излучения по волоконному световоду.

В частности, при анализе относительной доли моды на больших расстояниях от оси (величина, важная, например, при вычислении микроизгибных потерь) полезным является радиус поля моды, задаваемый соотношением, которое было предложено Петерманом [5] и иногда называется радиусом Петермана I:

$$w_m^2 = 2 \int_0^{\infty} E^2(r) r^2 r dr \int_0^{\infty} E^2(r) r dr. \quad (9)$$

При расчете дисперсии оказывается полезным использовать радиус Петермана II [6], в который входит градиент электромагнитного поля по радиусу:

$$w_d^2 = 2 \int_0^{\infty} E^2(r) r dr \int_0^{\infty} (dE(r)/dr)^2 r dr. \quad (10)$$

Следует отметить, что все вышеприведенные радиусы равны между собой, если распределение поля описывается функцией Гаусса.

4. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Схема разработанного нами прибора приведена на рис. 1. Источником света является полупроводниковый лазерный диод, состыкованный с одномодовым волоконным световодом. Излучение лазерного диода модулируется методом прямой токовой модуляции на фиксированной частоте f , которая получается путем деления частоты задающего кварцевого генератора. Лазерное излучение вводится через волоконно-оптический адаптер в тестируемый волоконный световод. Выходной торец световода неподвижно закрепляется над осью вращения поворотного транслятора, перемещающего фотоприемник по дуге радиусом ~ 10 см вокруг торца световода. Перемещение фотоприемника осуществляется шаговым двигателем, который управляется фазовой последовательностью через параллельный порт персонального компьютера. Сигнал фотоприемника после усиления оцифровывается с помощью аналого-цифрового преобразователя звуковой карты компьютера. Таким образом измеряется угловая зависимость интенсивности излучения, выходящего из торца исследуемого световода. Дальнейшая обработка и преобразование измеренного углового распределения интенсивности излучения в радиальное распределение интенсивности излучения внутри волоконного световода выполняется численно с использованием соотношений (5)–(10).

Все электронные и механические узлы прибора расположены внутри светонепроницаемого корпуса размерами 30 × 30 × 12 см.

На рис. 2, на котором представлено рабочее пространство прибора, видно взаимное расположение основных элементов: адаптера с волоконным световодом, фотоприемника, расположенного на штанге и перемещающегося по дуге вокруг торца световода. Механизмы и электронные компоненты закрыты неотражающими панелями.

5. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАБОТЫ С ПРИБОРОМ

Разработанное для работы с прибором программное обеспечение рассчитано на использование в компьютере с характеристиками не хуже следующих: тактовая частота процессора 700 МГц; объем оперативной памяти 128 Мбайт; операционная система Windows 98/Me; свободный LPT-порт.

Программа управления Mode_Field.exe позволяет:

- проводить калибровку углового положения фотодиода по встроенному концевому выключателю;
- проводить измерения углового распределения интенсивности излучения волоконного световода в заданном диапазоне углов при заданном количестве точек в распределении;
- варьировать время измерения сигнала в каждой точке и количество необходимых усреднений, задавать желаемую погрешность измерений;
- сохранять измеренные распределения на диске, а также считывать измеренные ранее или рассчитанные численно распределения;
- выводить на экран от 1 до 4 распределений (графический интерфейс снабжен многочисленными опциями для удобного просмотра и анализа данных);
- сохранять служебные настройки в файл и считывать их из файла, что позволяет фиксировать определенные режимы работы прибора;
- осуществлять обработку углового распределения, измеренного в дальней зоне, с целью получения распределения интенсивности излучения в световоде и определения характеристических модовых радиусов в соответствии с формулами (6), (9), (10).

Технические характеристики прибора. Максимальный динамический диапазон ≥50 дБ; диаметр диафрагмы, расположенной перед фотодиодом, ≈1 мм; расстояние от торца световода до поверхности фотодиода ≈100 мм; угловое разрешение ≈0.01 рад, минимальное угловое перемещение транслятора $2.6 \cdot 10^{-4}$ рад, диапазон сканирования ≈2.75 рад. Максимальная амплитуда напряжения выходного сигнала 1 В; частота модуляции опти-

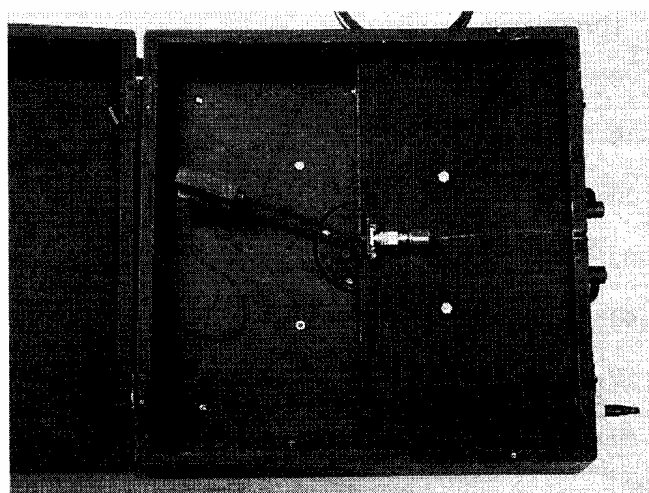


Рис. 2. Вид прибора в открытом состоянии.

ческого сигнала 1465/2930 Гц. Выходная мощность лавинного диода ~1 мВт, ее стабильность ~0.3%. Потребляемая мощность ~2 Вт; время прогрева 10 мин.

6. ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОДНОМODOVЫХ СВЕТОВОДОВ

Для проверки прибора, в частности линейности системы регистрации оптического сигнала в широком динамическом диапазоне, был выполнен эксперимент, результат которого приведен на рис. 3.

На рис. 3а представлены угловые распределения интенсивности излучения одномодового волоконного световода со смещенной дисперсией DSF (см. табл. 1), измеренные при разном уровне входного оптического сигнала (интенсивность входного сигнала изменялась примерно на 10 дБ при переходе от одной кривой к другой). На рис. 3б эти же кривые приведены после нормирования на их максимальное значение. Степень совпадения нормированных распределений при этом характеризует линейность системы регистрации. Как видно, наблюдается хорошее совпадение всех экспериментальных зависимостей, что позволяет сделать

Таблица 1. Параметры исследованных образцов волоконных световодов (λ_c – длина волны отсечки первой высшей моды, Δn – разность показателей преломления между сердцевинной и оболочкой)

Название световода	λ_c , мкм	Δn
Corning SMF-28	1.25	0.0043
DSF	1.05	0.010
SM-179	1.05	0.017

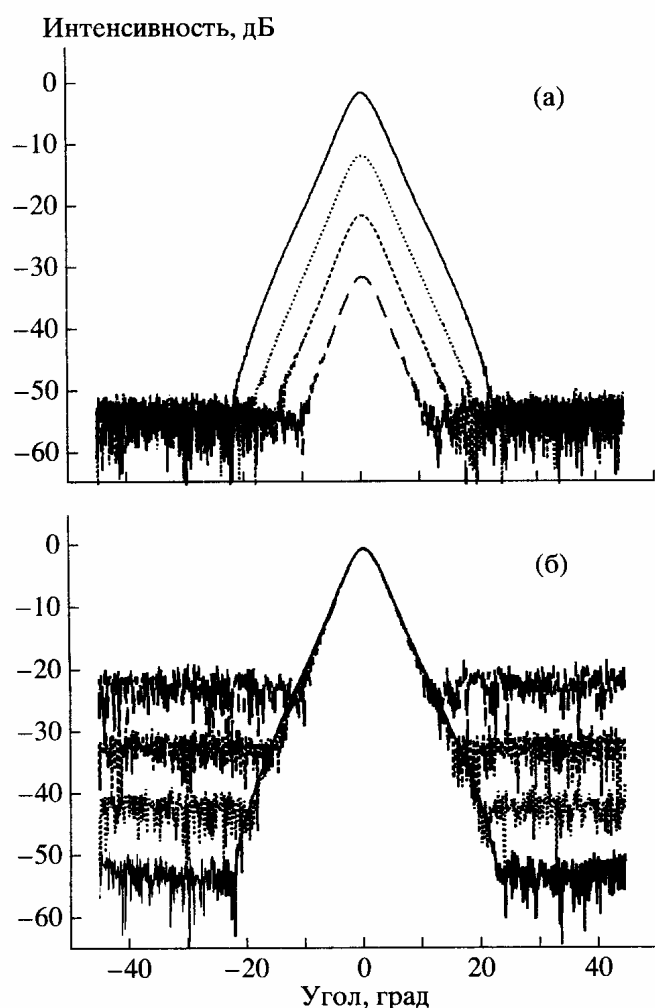


Рис. 3. Проверка линейности системы регистрации сигнала.

вывод о высокой линейности системы регистрации в динамическом диапазоне ~ 50 дБ.

Были проведены измерения трех образцов волоконных световодов, которые являются одномодовыми на используемых длинах волн. Световоды были отобраны таким образом, чтобы покрыть практически весь диапазон апертур, используя

Таблица 2. Измеренные и расчетные (в скобках) значения мод исследованных волоконных световодов (погрешность измерения радиусов мод ~ 0.05 мкм)

Название световода	Радиус поля моды, мкм					
	$\lambda \approx 1.32$ мкм			$\lambda \approx 1.53$ мкм		
	$1/e^2$	w_d	w_m	$1/e^2$	w_d	w_m
Corning SMF-28	4.74 (4.71)	4.74	4.78	5.17 (5.11)	5.41	5.60
DSF	2.83 (2.87)	3.20	3.46	3.32 (3.21)	3.89	4.31
SM-179	2.20 (2.19)	2.30	2.38	2.44 (2.44)	2.69	2.86

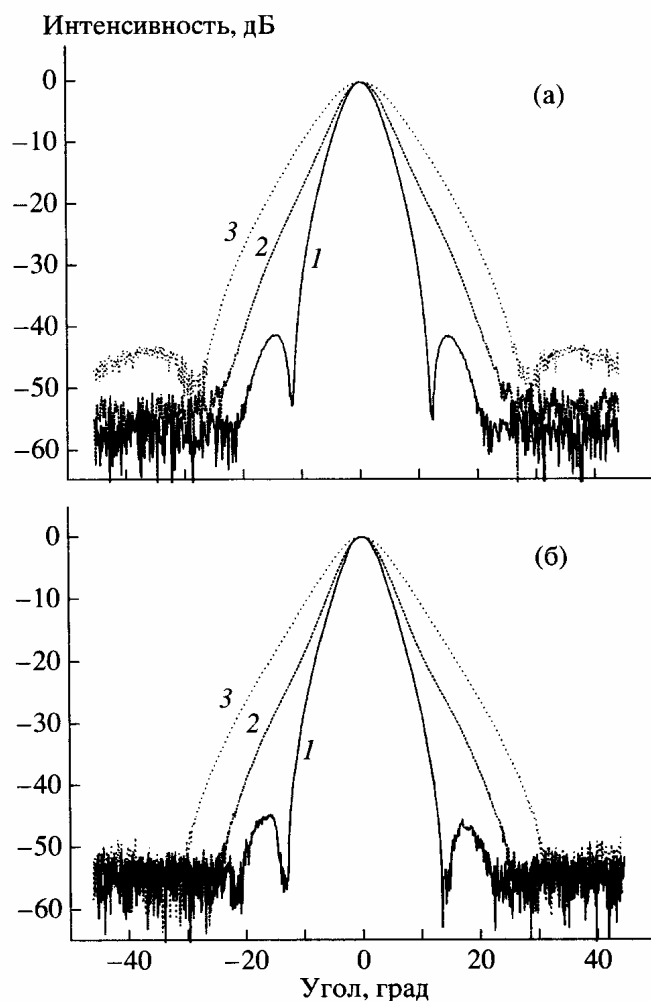


Рис. 4. Угловые распределения интенсивности излучения в дальнем поле, измеренные на длинах волн 1.32 мкм (а) и 1.53 мкм (б) для световодов: 1 – Corning SMF-28, 2 – DSF, 3 – SM-179.

щихся в современной волоконной оптике, их основные параметры приведены в табл. 1.

Распределения интенсивности в дальней зоне, измеренные для этих световодов на длинах волн 1.32 и 1.53 мкм, приведены на рис. 4.

Отметим, что при выполнении преобразования (5) следует соблюдать определенные предосторожности, связанные с правильным учетом уровня шумового сигнала. Дело в том, что даже при низком уровне шума по отношению к сигналу в максимуме ($-50 \dots -60$ дБ) его наличие при больших углах измерения ($>20^\circ$) может приводить к значительному искажению расчетного распределения поля в световоде. В связи с этим, при выполнении преобразования следует рассматривать лишь область углов, в которой присутствует реальный сигнал, и, кроме того, вычитать из экспериментальных данных уровень шумовой составляющей.

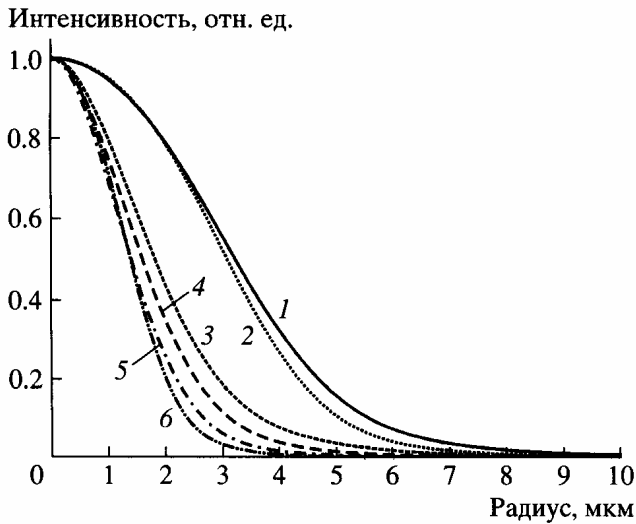


Рис. 5. Рассчитанные распределения интенсивности в основной моде исследованных волоконных световодов: 1, 2 – SMF-28 (1.53 и 1.32 мкм соответственно), 3, 4 – DSF (1.53 и 1.32 мкм), 5, 6 – SM-179 (1.53 и 1.32 мкм).

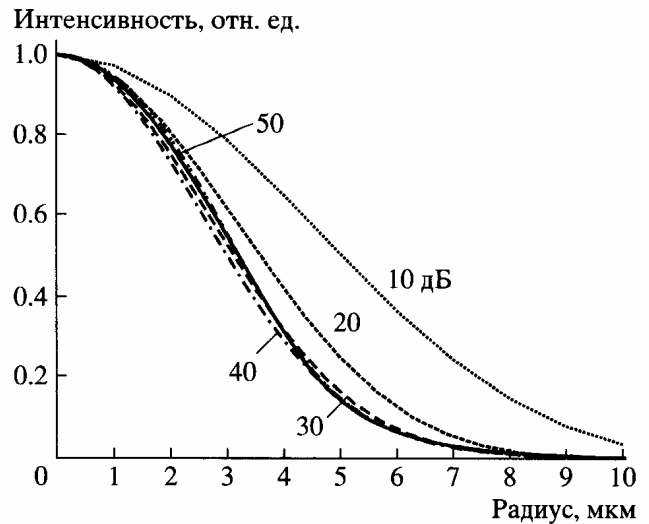


Рис. 6. Радиальные распределения интенсивности основной моды световода SMF-28 на длине волны 1.53 мкм, полученные при различных динамических диапазонах измерений. Сплошная линия – расчет.

На рис. 5 представлены распределения интенсивности электромагнитного поля в основных модах, полученные на основании данных рис. 4 с соблюдением при обработке указанных выше процедур.

В табл. 2 приведены радиусы мод, полученные исходя из экспериментальных данных. Кроме того, приведены радиусы мод по уровню $1/e^2$, рассчитанные по параметрам световодов, приведенным в табл. 1.

Отметим согласие экспериментальных и расчетных радиусов на обеих длинах волн для всех использованных нами световодов, а в случае стандартного световода SMF-28 и хорошее совпадение со справочными данными: 4.6 ± 0.2 мкм ($\lambda \approx 1.31$ мкм), 5.2 ± 0.25 мкм ($\lambda \approx 1.55$ мкм).

7. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Для световода SMF-28 с использованием его параметров, приведенных в табл. 1, были выполнены расчеты распределения интенсивности основной моды в световоде и в дальней зоне. Расчеты проводились путем решения волнового уравнения в приближении ступенчатого профиля показателя преломления сердцевины световода [7].

На рис. 6 представлено сравнение результатов расчета (сплошная линия) с распределениями интенсивности основной моды, полученными с использованием соотношения (5) исходя из измеренного распределения интенсивности в дальней зоне.

Для того чтобы оценить влияние динамического диапазона измерений на получаемое распределение поля моды в волоконном световоде, рас-

четы были выполнены для экспериментальных кривых, отличающихся друг от друга диапазоном измерений на 10 дБ. Результаты, представленные на рис. 6, показывают, что измерения, выполненные с динамическим диапазоном 10 и 20 дБ, приводят к значительному расхождению с реальным распределением, в то время как для кривых с диапазоном ≥ 30 дБ расхождение укладывается в пределы 10–20% и является приемлемым во многих практических случаях. Увеличение соотношения сигнал/шум (расширение динамического диапазона) позволяет улучшать точность полученных распределений.

Анализ относительных отклонений распределений, полученных при различных динамических диапазонах, от расчетной кривой позволяет сделать вывод о том, что при проведении измерений с диапазоном 50 дБ и выше можно добиться точности лучше 5% и, что особенно важно, появляется возможность достоверно измерять периферийную область распределения поля, где измерение с меньшим динамическим диапазоном не дает точного результата. Это представляет особый интерес при решении ряда научных и технологических задач, например, при изучении электрострикционного отклика от импульсных сигналов, распространяющихся по световоду. Как было показано в [8, 9], интенсивность этого отклика определяется радиальным градиентом электрического поля. Следует отметить, что выполненная нами процедура сравнения полученных кривых с распределением, рассчитанным в предположении ступенчатого профиля показателя преломления, является не вполне корректной, поскольку реальное распределение показателя преломления может быть более сложным. Однако такое сравне-

ние, на наш взгляд, весьма полезно, так как хорошо иллюстрирует общую тенденцию, которую можно ожидать при расширении динамического диапазона измерений, а также дает представление о величине погрешности результата, полученного в том или ином случае.

8. ВЫВОДЫ

На основе автоматизированного поворотного транслятора разработан прибор для измерения углового распределения интенсивности выходного излучения волоконных световодов. Управление сканером осуществляется через параллельный порт, а сбор и оцифровка экспериментальных данных выполняется с помощью стандартной звуковой платы персонального компьютера. Такая конфигурация позволила добиться высокой воспроизводимости и линейности измерений, а также достаточно большого динамического диапазона (более 50 дБ). Это позволяет эффективно использовать разработанный прибор для исследования угловых диаграмм излучения волоконных световодов различных типов, параметров линз, сформированных на торце световодов. Кроме того, прибор может быть легко адаптирован для измерения параметров излучения неволоконных источников, например полупроводниковых лазерных и люминесцентных диодов.

Авторы выражают глубокую благодарность директору Научного центра волоконной оптики Е.М. Дианову, а также сотрудникам А.С. Куркову, В.Н. Протопопову и М.А. Солодянкину за всестороннюю поддержку проведенных работ и полезные обсуждения результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980. С. 656.
2. Karpov V.I., Grekov M.V., Dianov E.M. et al. // Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference OFC'98. Paper ThG4. 1998.
3. Limberger H.G., Fonjallaz P.-Y., Salathe R.P., Cochet F. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. № 22. P. 3069.
4. Neumann E.-G. // Single-mode fibers: Fundamentals. Springer Series in Optical Sciences. Berlin-N.Y.: Ernst-Georg Neumann Publisher, 1988. V. 57.
5. Petermann K. // Electron. Lett. 1976. V. 12. P. 107.
6. Petermann K. // Electron. Lett. 1983. V. 19. P. 712.
7. Васильев С.А., Дианов Е.М., Курков А.С. и др. // Квантовая электрон. 1997. Т. 24. № 2. С. 151.
8. Fellegara A., Wabnitz S. // Opt. Lett. 1998. V. 23. № 17. P. 1357.
9. Бирюков А.С., Сухарев М.Е., Дианов Е.М. // Сб. трудов УНЦ волоконно-оптических материалов и устройств. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2001. № 4. С. 6.