

МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОМОДОВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Волоконная оптика на сегодня является одной из наиболее быстро развивающихся областей техники. Ее столь быстрое развитие привело к явно наметившемуся разрыву между научными изысканиями и потребностями практики. Предлагаемая работа была проведена с целью, в некоторой мере, заполнить этот разрыв. Предприятия, выпускающие компоненты ВОСПИ, постоянно сталкиваются с задачей измерения параметров своих изделий. Достоверное измерение параметров (особенно, числовой апертуры волокна) требует учета модового состава излучения, передаваемого исследуемым световодом. Существующие методики измерения параметров световодов основаны на создании в волокне стандартного модового распределения [1]. Такой подход совершенно не снимает задачи о зависимости измеренных значений характеристик оптических волокон от модового состава излучения, а только переводит ее в другую плоскость, а именно: обеспечения и контроля заданного (например, «равновесного») модового распределения в волокнах, параметры которых подлежат определению. Предлагается альтернативный подход к решению этой задачи, заключающийся в одновременном измерении параметров волокна и модового состава излучения. Такой подход позволяет разработать методику измерения параметров многомодовых световодов при произвольных условиях возбуждения, либо дает возможность контролировать модовый состав излучения при использовании существующих методик измерений параметров волокон.

Основные уравнения. Для описания модового состава излучения в исследуемом волокне воспользуемся моделью, которая предполагает, что в волокне распространяется некоторое количество квазивырожденных модовых групп, характеризующихся параметром x [2]:

$$x = g\left(\frac{r}{a}\right) + \left(\frac{\theta}{NA}\right), \quad (1)$$

где $g\left(\frac{r}{a}\right)$ — функция профиля показателей преломления; θ — угол распространения луча, покинувшего волокно через торец; NA — числовая апертура.

В этой модели распределение интенсивности в ближней и дальней зонах описывается следующим образом:

$$P(\theta) = \int_{x < 1} Q(x) r dr; \quad p(r) = \int_{x < 1} Q(x) \theta d\theta, \quad (2)$$

где $P(\theta)$, $p(r)$ — распределение интенсивности излучения, измеренное в дальней и ближней зонах соответственно; $Q(x)$ — функция модового

состава (мощность, приходящаяся на одну квазивырожденную модовую группу x); r — радиальная координата.

Дальнейшее описание основано на том, что выражение (2) рассматривается как система интегральных уравнений, содержащая известные функции $P(\Theta)$ и $p(r)$ и неизвестные функции $Q(x)$, $g\left(\frac{r}{a}\right)$. Решая эту систему, можно одновременно определить функцию модового состава $Q(x)$ и все основные параметры волокна: числовую апертуру NA , диаметр сердцевины a , функцию профиля показателя преломления $g\left(\frac{r}{a}\right)$. Задача в такой постановке является некорректной, но если достаточно жестко ограничить множества функций, из которых выбирается $Q(x)$ и $g\left(\frac{r}{a}\right)$, то можно попытаться решить систему (2) приближенно с достаточной точностью. Здесь возникает вопрос об удачном выборе вида функций $Q(x)$ и $g\left(\frac{r}{a}\right)$, чтобы они адекватно описывали физику процесса, с одной стороны, а с другой — содержали жесткие ограничения, позволяющие решать уравнения.

Большинство известных способов определения модового состава основаны на приближении α -профиля показателя преломления [3—5], т. е.

$$g\left(\frac{r}{a}\right) \approx \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha, \quad (3)$$

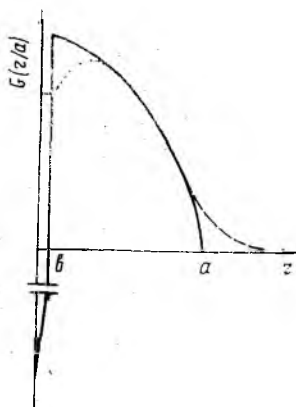
где a — радиус сердцевины; α — параметр профиля показателя преломления.

Однако эта модель, позволяющая получить аналитически многие результаты, неудовлетворительно описывает реально существующие профили. Оптические волокна, полученные методом MCVD, обладают двумя дефектами, которые не учитывает α -профиль. Это приосевой провал в профиле показателя преломления и «размытие» профиля на границе «сердцевина — оболочка». После проведения исследований и перебора различных вариантов была выбрана следующая функция описания профиля показателей преломления:

$$G_0\left(\frac{r}{a}\right) = \begin{cases} -b \cdot \delta(r)/r, & r = 0; \\ \left(\frac{r}{a}\right)^2, & b < r < a; \\ 0, & r \geq a, \end{cases} \quad (4)$$

где b — размер приосевого провала; $\delta(r)$ — дельта-функция.

Условно будем считать, что функция $G_0\left(\frac{r}{a}\right)$ описывает профиль



показателя преломления заготовки (см. рисунок, кривая 1). Для работы с этой функцией воспользуемся ее разложением в ряд Фурье—Бесселя:

$$G_0\left(\frac{r}{a}\right) = \sum_{n=0}^{50} \tilde{G}_n J_0\left(\gamma_n \frac{r}{R_0}\right),$$

$$\tilde{G}_n = \frac{2}{R_0^2 |J_0'(\gamma_n)|^2} \int_0^a G_0(r) \cdot J_0\left(\frac{\gamma_n r}{R_0}\right) r dr, \quad (5)$$

где γ_n — корни функции $J_0(r_i)$; R_0 — интервал разложения, $R_0 \gg a$; a — диаметр сердцевинны.

При вытяжке волокна за счет, в первую очередь, диффузии легирующих примесей, профиль показателя преломления «размывается» (см. рисунок, кривая 2). Учесть такое диффузионное размытие можно введя еще один сомножитель в формулу (5):

$$G_\tau\left(\frac{r}{a}, \tau\right) = \sum_{n=0}^{50} \tilde{G}_n J_0\left(\gamma_n \frac{r}{R_0}\right) e^{-\gamma_n \tau}, \quad (6)$$

где τ — некая «диффузионная» константа.

Таким образом, для описания функции профиля показателя преломления $g\left(\frac{r}{a}\right)$ используются три параметра: диаметр сердцевинны — a , размер приосевого провала — b , диффузионная константа — τ .

Функцию модового состава так же естественно представить в виде разложения по ортогональным функциям

$$Q(x) = q_1 \tilde{Q}_1(x) + q_2 \tilde{Q}_2(x) + q_3 \tilde{Q}_3(x) + \dots + q_n \tilde{Q}_n(x). \quad (7)$$

В качестве такой ортогональной системы нами были выбраны так называемые «статистические моды» [6].

Для идеального параболического профиля Q_i имеют простой вид [3; 7]:

$$\tilde{Q}_i = \frac{\gamma_i}{2} \frac{J_1(\gamma_i \sqrt{x})}{\sqrt{x}}.$$

Можно предположить, что такое представление достаточно хорошо и для реального волокна.

Удерживая три первых слагаемых и учитывая условие нормировки амплитудных коэффициентов $q_1 + q_2 + q_3 = 1$, функция модового состава запишется следующим образом:

$$Q(x) = q_1 \tilde{Q}_1(x) + q_2 \tilde{Q}_2(x) + (1 - q_1 - q_2) \tilde{Q}_3(x). \quad (8)$$

Следовательно, предлагаемая модель содержит шесть параметров, которые подлежат определению: a , b , τ , NA , q_1 , q_2 .

Наиболее подходящим методом определения параметров оказался метод подбора по критерию минимума χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_r (P_\tau(r_i) - P_s(r_i))^2 + \sum_\theta (P_\tau(\theta_j) - P_s(\theta_j))^2,$$

где $P_\tau(r_i)$, $P_\tau(\theta_j)$ — распределения интенсивности излучения в ближнем и дальнем поле, рассчитанные в соответствии с (2), с учетом (6) и (8);

$p_3(r_i), P_3(\theta_j)$ — измеренные экспериментально распределения интенсивности излучения в ближнем и дальнем поле для значений переменных r_i и θ_j .

Для обработки результатов была составлена программа, которая позволяет сравнительно быстро определить необходимые параметры исследуемых волокон и модовый состав излучения.

Экспериментальная проверка работоспособности метода. С помощью предложенного метода было исследовано градиентное оптическое волокно длиной 20 м при двух условиях возбуждения: исследуемое волокно подключалось непосредственно к источнику излучения ИЛПН-109; излучение вводилось через трехзвенный смеситель мод. Полученные результаты приведены в таблице.

Характер возбуждения исследуемого волокна	Исследуемые параметры				
	a	NA	q_1	q_2	χ^2
1	$25,34 \pm \pm 0,1 \text{ мкм}$	$0,185 \pm 0,01$	0,68	0,45	1,78 %
2	$25,45 \pm 0,1 \text{ мкм}$	0,189	1,03	0,02	2,1 %

Анализируя приведенные данные, можно отметить, что параметры, характеризующие оптическое волокно (a, NA) оказались в пределах точности измерений равными. Отличны только параметры, характеризующие модовый состав излучения (q_1, q_2), что подтверждает правильность выбранной модели. Правомерность использования разложения (7) подтверждается тем, что при использовании смесителя, дающего модовый состав, близкий к равновесному, $q \approx 1$, а q_2 и $q_3 \approx 0$.

Возможные применения метода комплексного исследования многомодовых волоконных световодов. Предложенный в работе подход позволяет разработать методику одновременного определения всех основных параметров оптических волокон независимо от условий ввода излучения, при этом определяется реальный профиль показателя преломления и модовый состав излучения. Реализуется предлагаемый метод на стандартном оборудовании, что особенно ценно при использовании его в условиях заводских лабораторий.

Данный подход позволяет оценить необходимость применения смесителей мод при измерениях параметров и передающих характеристик многомодовых оптических волокон. На его основе можно разработать методику метрологической аттестации смесителей и модовых фильтров.

Список литературы: 1. Котюк А. Ф. Введение в технику измерений оптико-физических параметров световодных систем. М., 1987. 223 с. 2. Кузусев А. И., Исаков В. П., Керимов А. А., Расчет трансформации модового состава в многомодовых световодах // Электросвязь. 1988. № 3. С. 17 — 20. 3. Кузусев А. И., Керимов А. А., Яковлев М. Я., Дифференциальные характеристики многомодовых градиентных волоконных световодов и методы их измерения // Зарубеж. радиоэлектроника. 1983. № 7. С. 28 — 53. 4. Hockert M. J. Development of Equi-

librium mode Distribution (EMD) in Fiber — a Characterization of the Transient Behavior and steady state Mandrel (SSM) for Corning Data Broad — band Fiber (dBf). Proceeding of the Society of Photo — Optical Instrumentation Engineers, 1985. Vol. 584. P. 181 — 188. 5. Pohl V. Vergleich Verschiedener Verfahren zur Erzielung linear Modengleichgewichtsverteilung in Gradienten — dichwellenleitern- // nachrichtentechn. Elektron. 1987. 36. S. 452 — 454. 6. Унгер Г. Х. Планарные и волоконные оптические волноводы: Пер. с англ. / Под ред. В. В. Шевченко. М., 1980. 195 с. 7. Колмада Я., Херигути Ц., Токуда М. Теоретический анализ оптоволоконных модовых возбудителей на основе чередующихся звеньев из градиентного и ступенчатого волокна // Дэнси цусин гаккай ромбун си. 1984. Т. 67, № 7. С. 722 — 729.

Поступила в редколлегию 20. 07. 90

УДК 621.317.799

Ю. Е. ГОРДИЕНКО, Б. Г. БОРОДИН, В. И. КРИВОРУЧКО

О СИНТЕЗЕ СВЧ РЕЗОНАТОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ФОТОМОДУЛЯЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Заметным достижением в развитии микроволновой диагностики полупроводниковых материалов явилось создание СВЧ фотомодуляционного метода контроля параметров эпитаксиальных структур [1—4]. В числе несомненных достоинств этого метода, таких как безэлектродность измерений и их неразрушающий характер, безусловно, следует назвать также его универсальность (то есть применимость для определения большинства электрофизических параметров полупроводниковой слоистой структуры [4—7]) и легко реализуемую возможность высоколокальных измерений. В то же время необходимо отметить, что наряду с принципиальной проработанностью основных положений фотомодуляционного метода в литературе практически отсутствуют сведения о выборе оптимальных технических решений при создании устройств, основанных на использовании фотомодуляционного метода. Некоторые аспекты синтеза измерительных преобразователей для таких устройств рассмотрены в настоящей статье. При этом круг исследуемых вопросов ограничивается рамками разработанного авторами [2; 4] метода двухпараметрового контроля (толщины h и электропроводности σ) полупроводниковых пластин и эпитаксиальных пленок в структурах с высокоомными подложками.

Теоретической основой для развития указанного метода явились исследования возмущения H_{01n} мод цилиндрического СВЧ резонатора аксиально расположенным фотопроводящим полупроводниковым диском. При этом исследуемый образец, как показано на рис. 1, а, размещается внутри резонатора, состоящего из двух соосных частей, перпендикулярно его оси, полностью перекрывая поперечное сечение резонатора. Сущность метода заключается в исследовании гармонического сигнала фотопроводимости, измеренного при СВЧ смещении, в зависимости от уровня включения