

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНОСТНОГО СПЕКТРА МОД ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ

© 2013 г. Д. В. Свистунов, канд. физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург

E-mail: svistunov@mail.ru

Предлагается включить построение и анализ разностного спектра мод в обычную процедуру определения параметров планарных волноводов по результатам измерений спектра волноводных мод. Показано, что анализ разностного спектра мод позволяет эффективно выявлять ошибочные результаты измерений и выбирать наиболее подходящую для исследуемого образца методику расчета распределения показателя преломления. Использование результатов анализа повышает достоверность реконструкции профиля планарного волновода и определяемых по нему параметров кинетики процесса формирования градиентного слоя, что особенно полезно при создании волноводов на базе новых материалов.

Ключевые слова: планарные волноводы, спектр мод, профиль показателя преломления, разностный спектр мод.

Коды OCIS: 230.7390, 130.0130, 160.3130, 120.3940

Поступила в редакцию 11.07.2012

Введение

При разработке новых планарных устройств часто требуется формирование оптических волноводов с заданными параметрами, обеспечивающими оптимальные функциональные характеристики всего устройства. Для этого, особенно в случаях использования новых материалов, изготавливаются опытные образцы волноводов, по результатам исследования которых корректируется технология изготовления, а иногда и состав используемых материалов.

При исследовании образцов планарных волноводов особый интерес представляет профиль распределения показателя преломления (ПП) в поперечном сечении волновода. Профиль ПП задает собой важные оптические характеристики – спектр мод волновода и поперечное распределение световой мощности мод, а также может служить источником информации о реальных значениях параметров, характеризующих кинетику процесса формирования волноводного слоя. Поскольку малые толщины волноводных слоев приводят к серьезным затруднениям при прямых измерениях профиля, обычно реконструкция профиля ПП в планарном волноводе проводится расчетным пу-

тем с использованием результатов измерения спектра мод в образце. При этом достоверность реконструкции профиля ПП в значительной степени определяется уровнем ошибок измерений спектра мод волновода. Поэтому, сразу по окончании измерений не извлекая образец из измерительной установки, следует проводить контроль полученных данных и при обнаружении явно ошибочных измерений проводить их точечный перезамер. Надо заметить, что обычная методика контроля по степени гладкости огибающей спектра мод часто не выявляет ошибок, которые в ходе дальнейшего определения профиля ПП по этим данным приводят к искажениям искомого профиля.

В данной работе предлагается включить в процедуру определения параметров планарных волноводов анализ так называемого разностного спектра мод, позволяющий эффективно выявлять сомнительные данные и повысить достоверность реконструируемого профиля ПП.

Контроль результатов измерений

Измерение спектра волноводных мод обычно проводится методом спектроскопии m -линий (например, [1]). При этом измеряют угол па-

дения светового пучка, возбуждающего моду волновода, на призму, прижатую к поверхности образца (или угол выхода из призмы пучка, оптически связанного с распространяющейся в волноводе модой). Затем рассчитывают набор эффективных показателей преломления мод N^* по формуле $N^*(m) = N_p \sin[\alpha_p + \arcsin(i_m/N_p)]$, где m – порядок моды, N_p и α_p – показатель преломления и угол при основании призмы соответственно, i_m – угол падения (или выхода из призмы) светового пучка, связанного с m -ой модой. Угол i_m считается положительным, если этот световой пучок проходит между нормалью к входной (выходной) грани призмы и поверхностью волновода.

Ошибки измерений спектра мод возникают в основном из-за отклонений от идеального вида регистрируемых картин так называемых m -линий мод. Причинами этих отклонений являются рассеяние света в волноводе и качество контакта призмы ввода/вывода излучения из волновода с его поверхностью. Особенно часто эти отклонения возникают при анализе опытных образцов в процессе разработки волнопроводов, изготовленных на основе новых материалов и технологических приемов. В ходе отработки технологии возможно возникновение неровностей поверхности образцов (вследствие частичного растрыва в солевых ваннах при ионном обмене или из-за остаточных островков пленки диффузанта при твердотельной диффузии). Кроме того, возможно появление оптических неоднородностей внутри формируемого градиентного слоя (например, коллоидное серебро, образующееся в процессе ионообменной диффузии ионов серебра при наличии в материале подложки даже малого количества нежелательных примесей – ионов железа, меди и некоторых других металлов). Все это приводит к повышенному уровню рассеяния модового светового пучка. Помимо этого, местные неровности поверхности сильно влияют на качество контакта поверхности волновода с прижимаемой призмой. Область контакта становится островковой, и продольный размер получаемых локальных областей оптической связи волноводной моды и внешнего светового пучка будет значительно меньше оптимального. Влияние всех этих факторов часто приводит к тому, что на выходе из призмы вывода излучения m -линии представляют собой не узкие (в поле зрения зрительной трубы гониометра) световые пятна с поперечными (относительно плоскости измерения углов)

слабыми световыми линиями, а широкие световые полосы (иногда шириной до нескольких угловых минут), имеющие структуру спекл-картины и состоящие из отдельных световых пятен разной формы. При этом яркость этих пятен зависит от измеряемой угловой координаты и может плавно меняться как симметрично, так и асимметрично относительно центра полосы, в зависимости от радиуса кривизны основания призмы. В этих условиях трудно избежать ошибок при измерениях углов выхода света из призмы.

Первичный контроль качества измерений обычно проводят по виду зависимости $N^*(m)$. Действительно, рассмотрение дисперсионных кривых планарных волнопроводов приводит к выводу о плавном уменьшении эффективного показателя преломления с ростом порядка мод для всех типов профиля ПП [1, 2 и др.]. Поэтому для контроля результатов можно использовать условие гладкости огибающей измеренного спектра мод.

На вставке рис. 1а приведен результат измерений спектра мод планарного волновода, полученного в опытном оптическом стекле в процессе ионного обмена $Ag^+ - Na^+$ при обработке в расплаве нитрата серебра при температуре 400 °С в течение 30 мин. Все измерения и расчеты проводились в данной работе с использованием света длиной волны 633 нм.

Огибающая полученного спектра мод кажется вполне гладкой, за исключением некоторого сдвига при $m = 68$, однако при проведении на основании этих данных расчета профиля ПП по традиционной методике [3] оказывается, что профиль заметно негладкий и даже имеет участки обратных петель. Этот профиль ПП показан на рис. 1б. Появление подобных обратных петель в рассчитанных профилях при ошибках измерений спектров мод отмечено и в литературе (например, [4]). В данном случае волновод поддерживает распространение очень большого числа мод и имеет глубокий градиентный профиль. Здесь, проведя аппроксимацию всего сомнительного участка единой гладкой кривой, можно рассчитывать на реконструкцию профиля ПП с не слишком большой общей ошибкой по глубине, поскольку локальные ошибки профиля не очень велики относительно общей глубины градиентного слоя. Однако, при анализе обычно используемых на практике маломодовых волнопроводов относительные локальные ошибки глубины искомого профиля ПП резко возрастают, и общая ошибка

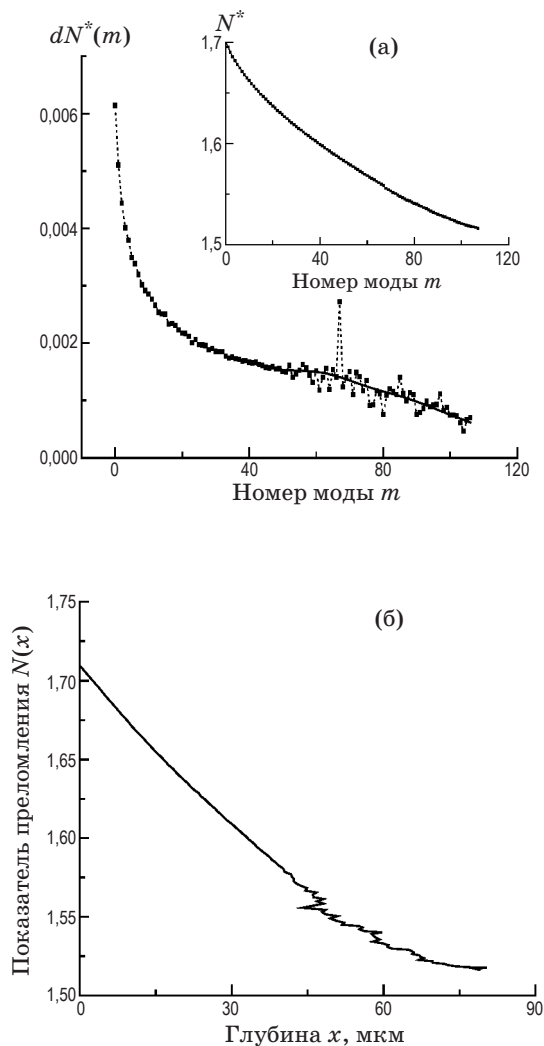


Рис. 1. Выявление ошибочных измерений характеристик планарного волновода. а – измеренный $dN^*(m)$ спектр ТЕ мод, а также аппроксимация участка $dN^*(m)$ (сплошная линия); на вставке измеренный $N^*(m)$ спектр ТЕ мод. б – профиль ПП по глубине слоя.

глубины профиля становится значительной. Следовательно, требуется более надежная методика контроля непосредственно в процессе измерений спектров мод, чтобы иметь возможность оперативно, даже не извлекая образец из установки, проводить точечный перемер сомнительных участков спектра.

Такую возможность дает использование разностного спектра мод $dN^*(m)$, который показывает распределение по спектру мод быстроты изменения эффективного показателя преломления и рассчитывается как

$$dN^*(m) = N^*(m) - N^*(m+1)$$

в пределах от $m = 0$ до $m = M - 2$, где M – общее число мод волновода. Условие плавного

изменения эффективных показателей преломления в спектре мод планарного волновода приводит к выводу о том, что огибающая разностного спектра мод должна быть гладкой. При этом, поскольку разностный спектр мод $dN^*(m)$ фактически ассоциируется с производной к огибающей спектра $N^*(m)$, то даже малое отклонение от гладкости кривой $N^*(m)$ приводит к заметным изменениям в ходе кривой $dN^*(m)$. Действительно, построив разностный спектр мод анализируемого образца (представлен на рис. 1а), видим резкие измерения хода этой зависимости в области $m > 50$, как раз соответствующей сомнительному участку профиля ПП. Заметим, что при контроле ошибок по огибающей спектра мод отмеченный сдвиг кривой $N^*(m)$ позволял предположить получение в расчетном профиле ПП самой большой обратной петли, но наличие остальных искажений профиля было неочевидным. Таким образом, анализ разностного спектра мод позволяет надежнее выявлять значимые ошибки измерений, чем контроль по огибающей спектра мод.

Анализ зависимости $dN^*(m)$ дает возможность предложить критерий допустимости ошибок измерений спектра мод. Поскольку, как видно из рис. 1б, начальная часть профиля ПП хорошо описывается гладкой кривой, считаем уровень ошибок измерений на этом участке допустимым. Этому участку профиля соответствует область $m < 50$ разностного спектра мод. Анализ данных показывает, что в этой области локальные отклонения точек разностного спектра от аппроксимирующей его на этом участке кривой не превышает величины $dN_{\max}^*/M = dN^*(m=0)/M$. Для данного волновода значение этой величины составляет $5,7 \times 10^{-5}$. Отметим, что обусловленные погрешностью измерения углов ошибки измерения спектра мод при использовании призмы с $N_p = 1,91661$ и гониометра с точностью $5''$ имеют уровень примерно $2,8 \times 10^{-5}$, что вдвое меньше допустимых отклонений разностного спектра. В области сомнительного участка профиля отклонения точек разностного спектра возрастают, и при превышении значения величины dN_{\max}^*/M профиль ПП принимает вид мелких ступенек, а при отклонениях более $(3-5) \times dN_{\max}^*/M$ появляются обратные петли профиля, размер которых сильно зависит от значений локальных отклонений разностного спектра. Следовательно, в качестве критерия допустимого уровня ошибок спектра мод можно принять условие для разностного спек-

тра, согласно которому отклонения точек разностного спектра мод от аппроксимирующей его кривой не должны превышать величину dN_{\max}^*/M . Заметим, что применение предложенного критерия допустимости ошибок измерений к результатам работы [4], где приведены примеры искажений профилей маломодовых волноводов, подтверждает справедливость этого критерия.

Построение разностного спектра можно проводить непосредственно в процессе измерений спектра мод. Тогда, сразу выявив с помощью предложенного критерия ошибочные результаты измерений, можно оперативно провести точечный переизмер соответствующих мод, не извлекая образец из установки.

Отметим еще одно обстоятельство, связанное с экспериментальным определением кинетических параметров процессов формирования диффузионных волноводов. В большинстве практических случаев справедливо предположение взаимной пропорциональности нормированных профилей концентрации диффузанта δC и показателя преломления δN [5–7], т. е. $\delta C = \text{const} \times \delta N$, где $\delta C = C(x)/C_{\max}$, $\delta N = \Delta N(x)/\Delta N_{\max}$, $\Delta N(x) = N(x) - N_s$, x – глубина слоя, N_s – ПП подложки. Поэтому профиль ПП диффузионных волноводных структур часто используется для определения таких важнейших параметров процесса диффузии, как величина и концентрационная зависимость коэффициента диффузии $D(C)$ [например, 8]. Знание этих параметров необходимо для проведения моделирования и оптимизации технологического процесса. При выполнении условий применимости подстановки Больцмана $\eta = x/t^{1/2}$ (здесь t – время диффузии) в уравнение второго закона Фика [9–11 и др.] и последовательной замене переменных (C на δC , затем на δN и, наконец, на ΔN) в приведенных в работах [9–11] формулах концентрационная зависимость коэффициента диффузии может быть определена в форме

$$D(\Delta N) = -\frac{1}{2t} \frac{dx}{d(\Delta N)} \int_{\Delta N_{\min}}^{\Delta N(x)} x d(\Delta N).$$

Величина ΔN_{\min} соответствует значению C_s концентрации ионов вещества диффузанта в исходной матрице материала подложки. Так, в нашем случае отсутствия серебра в исходном составе подложки $\Delta N_{\min} = 0$.

При оптимизации технологии большое значение имеет учет влияния температуры про-

цесса. В большинстве практических случаев температурная зависимость коэффициента диффузии подчиняется закону Аррениуса $D \sim \exp[-H/(k_b T)]$, где k_b – постоянная Больцмана. Энергия активации диффузии H может быть определена обычным способом [например, 12] – из коэффициента наклона зависимости $\ln D(T)$, построенной по результатам расчета коэффициента диффузии для одинаковых значений ΔN в профилях ПП, сформированных при разных температурах диффузии T .

Заметим, что моделирование диффузионного процесса и корректировка технологии имеют своей целью оптимизацию оптических параметров формируемых структур. Поэтому при этих расчетах удобно использовать коэффициент диффузии как раз в форме $D(\Delta N)$, поскольку это дает возможность напрямую определять влияние технологических режимов на оптические параметры волновода. Действительно, проведя в уравнении Фика указанную выше замену переменных, получаем уравнение

$$-\frac{\eta}{2} \frac{d(\Delta N)}{d\eta} = \frac{d}{d\eta} \left[D(\Delta N, T) \frac{d(\Delta N)}{d\eta} \right],$$

где $D(\Delta N, T) = D(\Delta N) \exp[-H/(k_b T)]$. Решение этого уравнения позволяет получить профили ПП $\Delta N(x)$ при разных температурно-временных режимах процесса и провести оптимизацию технологии изготовления волновода.

Из представленного выражения для $D(\Delta N)$ видно, что при расчете этой зависимости важно точно определять не только глубину профиля ПП, но и производную профиля по глубине. Однако, ошибки при реконструкции профиля могут привести к искажению и этого параметра.

На рис. 2а представлены измеренный спектр мод волновода, изготовленного тем же способом в другом опытном оптическом стекле, и рассчитанный по этим данным согласно методике [3] профиль ПП слоя.

Спектр мод кажется гладким, обещая небольшие вариации профиля волновода и приемлемую ошибку распределения ПП по глубине слоя. Рассчитанный профиль, однако, демонстрирует протяженный негладкий участок, хотя и без больших обратных петель. Чтобы использовать полученный профиль волновода для определения зависимости $D(\Delta N)$, его следует аппроксимировать гладкой кривой. Такая кривая состояла бы, как видно из профиля ПП, из трех сопряженных участков примерно равной протяженности, причем кривизна этих участков имела бы разный знак (положи-

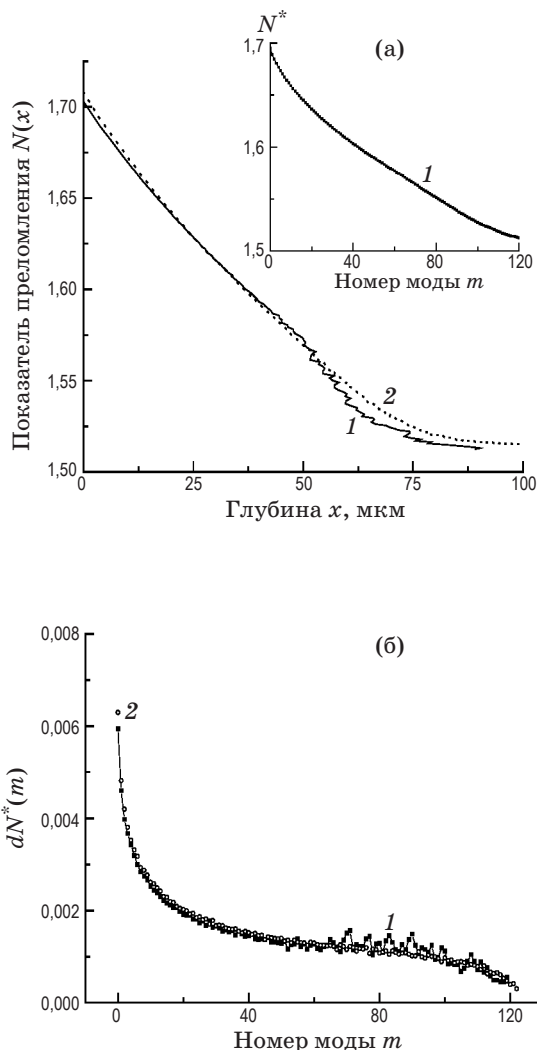


Рис. 2. Уточнение характеристик планарного волновода. а – профиль ПП по глубине слоя; на вставке – спектр ТЕ мод. б – разностный спектр ТЕ мод. 1 – первоначальное измерение, 2 – исправленная характеристика.

тельная на начальном и конечном участках, на среднем – отрицательная). В принципе, такие профили возможны при концентрационной зависимости коэффициента диффузии, имеющей выраженный максимум внутри рассматриваемого диапазона концентраций [13]. Рассмотрим, однако, рис. 2б, на котором представлен разностный спектр мод этого образца. Резкие скачки разностного спектра, начиная примерно с его середины, свидетельствуют о сомнительности измерений второй половины спектра мод. Действительно, использование предложенного критерия допустимости ошибок измерений приводит к выводу о необходимости перезамера этой части спектра мод (для этого волновода величина $dN_{\max}^*/M \approx 5,0 \times 10^{-5}$,

а средние отклонения точек этой части разностного спектра – порядка $(10-12) \times 10^{-5}$ с несколькими выбросами около $(25-28) \times 10^{-5}$). Проведенный повторный тщательный перезамер всего спектра мод имел своим результатом вполне гладкий разностный спектр, также показанный на рис. 2б. Вариации этого повторно измеренного спектра удовлетворяют критерию допустимых ошибок. Профиль ПП, рассчитанный по данным повторных измерений, представлен на рис. 2а вместе с исходным профилем. Видно, что общая глубина профиля действительно изменилась мало. Однако, кривая уточненного профиля имеет положительную кривизну на всем своем протяжении. Это говорит о том, что внутри диапазона концентраций серебра в образце кривая концентрационной зависимости коэффициента ионообменной диффузии не имеет явно выраженного максимума. Таким образом, использование разностного спектра мод позволило уточнить не только реконструируемый профиль ПП, но также вид зависимости $D(\Delta N)$, что дает возможность повысить достоверность результатов моделирования процесса диффузии.

Выбор методики расчета профиля планарного волновода

Обычно профиль ПП в планарном волноводе рассчитывают по одной из двух наиболее известных методик [3, 14] с использованием результатов измерения спектра мод в образце. В обеих методиках определение профиля ПП проводится в ходе решения обратной задачи описания волноводного распространения в приближении Венцеля–Крамерса–Бриллюэна (ВКБ). При этом, сравнительный расчет профиля ПП этими методиками по одним и тем же исходным данным дает разные значения максимальной величины ПП в волноводе N_0 и, как следствие, отличающиеся кривые профиля ПП (см., например [15]). Это обстоятельство особенно сильно сказывается на результатах определения диффузионных характеристик по профилю ПП и приводит к недостаточной достоверности модельных расчетов процесса диффузии. Вследствие этого возникают ошибки при проведении априорного выбора технологических режимов процесса для получения заданного профиля ПП. Расхождение в результатах расчетов профиля ПП связано с тем, что каждая из этих методик демонстрирует высокую точность для определенной группы типов

профилей ПП: для скругленных у вершины профилей ПП (параболический и др.) – метод [14], для “острых” (экспоненциальный и др.) – метод [3]. Наибольшим образом расхождение результатов расчетов сказывается на участке профиля в области максимальных значений ПП, а именно в этой области особенно важно достоверно определить ход концентрационной зависимости коэффициента диффузии. Расчет “острых” профилей по методике [14] приводит к недооценке величин ПП, а применение метода [3] к профилям со скругленными вершинами – к переоценке этой величины. Следовательно, требуется иметь возможность проводить по результатам измерения спектра мод обоснованный выбор между методиками [3, 14]. Покажем, что такую возможность дает использование разностного спектра мод.

Рассмотрим для этого ряд типовых модельных профилей ПП планарных волноводов: экспоненциальный

$$N(x) = N_s + \Delta N(0) \exp(-x/h),$$

функции

$$N(x) = N_s + \Delta N(0) \operatorname{erfc}(x/h),$$

$$N(x) = N_s + \Delta N(0) \operatorname{ch}^{-2}(x/h)$$

и Гаусса

$$N(x) = N_s + \Delta N(0) \exp(-x^2/h^2),$$

а также линейный

$$N(x) = N_s + \Delta N(0)(1 - x/h)$$

и параболический

$$N(x) = N_s + \Delta N(0)(1 - x^2/h^2)$$

профили. Примем для расчетов следующие параметры таких градиентных слоев: $N_s = 1,51$, $\Delta N(0) = 0,01$ и $h = 10$ мкм. Для каждого из этих профилей рассчитываем в нулевом приближении метода ВКБ спектр волноводных мод, решая уравнение [1]

$$k \int_0^{xt} [N^2(x) - N^{*2}]^{1/2} dx = \varphi_s + \varphi_c + \pi m,$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны света в вакууме, xt определяется из условия $N(x) = N^*$, $\varphi_s = \pi/4$, $\varphi_c = \arctg[(N^{*2} - 1)/(N_0^2 - N^{*2})]^{1/2}$ (для ТЕ-мод).

Полученный набор спектров волноводных ТЕ-мод представлен на рис. 3а. Видно, что рассчитанные спектры мод демонстрируют ожидаемый характер монотонно убывающей зависимости для всех профилей, и из этого рисунка трудно выявить какие-либо характерные осо-

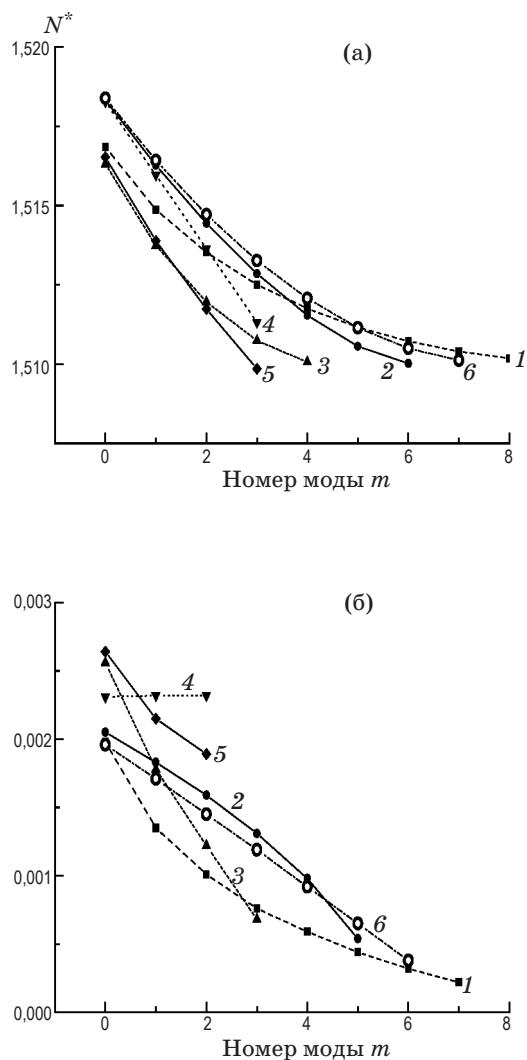


Рис. 3. Характеристики модельных градиентных волноводов. а – спектры ТЕ мод, б – разностные спектры ТЕ мод. Модельные контуры – экспоненциальный (1), гауссов (2), erfc-like (3), параболический (4), линейный (5), функции ch^{-2} (6).

бенности хода зависимостей для разных типов профилей ПП, кроме известного свойства практически линейного спектра мод параболического профиля ПП.

Рассмотрим теперь разностные спектры ТЕ-мод этих модельных структур, представленные на рис. 3б. На этом рисунке явственно видна определенная закономерность: разностные спектры мод профилей ПП с “острой” вершиной имеют положительную кривизну огибающих, тогда как профили ПП со “скругленной” вершиной демонстрируют огибающую разностного спектра с отрицательной кривизной (функции $\operatorname{ch}^{-2}(x/h)$ и Гаусса) или практически постоянный разностный спектр мод (парабо-

личный профиль). Эти особенности разностных спектров можно использовать в качестве критерия при выборе методики расчета профиля ПП по измеренным спектрам мод. При положительной кривизне огибающей разностного спектра мод анализируемого образца на начальном участке мод низких порядков для расчета профиля волновода следует использовать методику [3], в противном случае – при отрицательной кривизне или постоянстве разностного спектра – методику [14]. Таким образом, предложенный критерий позволяет проводить обоснованный выбор между методиками расчета и повысить достоверность реконструируемого профиля ПП градиентного планарного волновода.

Заключение

Представленные результаты показывают, что использование предложенного критерия анализа разностного спектра мод позволяет четко выявлять ошибочные результаты непосредственно в процессе измерений спектра волноводных мод планарных волноводов и

оперативно проводить точечный переизмер сомнительных данных. Кроме того, показано, что по знаку кривизны огибающей начального участка разностного спектра мод можно осуществлять обоснованный выбор наиболее подходящей для исследуемого образца методики расчета профиля ПП. Следовательно, использование разностного спектра мод при определении характеристик градиентных планарных волноводов дает возможность повысить достоверность профилей ПП, реконструируемых по измеренным спектрам мод, а также параметров кинетики процесса формирования градиентных слоев, определяемых по этим профилям. Это обстоятельство особенно важно при работах по созданию волноводов на базе новых материалов и технологических приемов, когда требуется по результатам анализа опытных образцов получить исходные данные для моделирования процессов формирования волноводов и проведения оптимизации технологии их изготовления.

Автор очень благодарен проф. Д.К. Таганцеву, предоставившему подложки из опытных оптических стекол.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Интегральная оптика // Под ред. Тамира Т. М.: Мир, 1978. 344 с.
2. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984. 512 с.
3. White J.M., Heidrich P.F. Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: a simple analysis // Appl. Opt. 1976. V. 15. № 1. P. 151–155.
4. Mathey P., Jullien P. Numerical analysis of a WKB inverse method in view of index profile reconstruction in diffused waveguides // Opt. Commun. 1996. V. 122. № 1. P. 127–134.
5. Евстропьев К.К. Диффузионные процессы в стекле. Л.: Стройиздат, 1970. 168 с.
6. Ланда К.А., Петровский Г.Т. Аморфные планарные волноводы. Красноярск: изд. Красноярского университета, 1987. 195 с.
7. Linares J., Prieto X., Montero C. A novel refractive index profile for characterization of nonlinear diffusion processes and planar waveguides in glass // Opt. Mater. 1994. V. 3. № 4. P. 229–236.
8. Lipovskii A.A., Svistunov D.V., Tagantsev D.K., Zhurikhina V.V. Diffusion nonlinearity in aluminum-boron silicate glasses for ion-exchanged GRIN structures: A simple technique to evaluate diffusion nonlinearity of glasses // Opt. Mater. 2006. V. 28. № 3. P. 276–284.
9. Болтакс Б.И. Диффузия в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1961. 462 с.
10. Геррикен С.Д., Дехтяр И.Я. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе. М.: Физматгиз, 1960. 562 с.
11. Малкович Р.Ш. Математика диффузии в полупроводниках. СПб.: Наука, 1999. 389 с.
12. Мереп Х. Диффузия в твердых телах. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 536 с.
13. Crank J. The mathematics of diffusion. Oxford: Clarendon Press, 1956. 348 p.
14. Chiang K.S. Construction of refractive-index profiles of planar dielectric waveguides from the distribution of effective indexes // J. Lightwave Technology. 1985. V. 3. № 2. P. 385–391.
15. Gonella F., Caccavale F., Quaranta A. Secondary ion mass spectrometry applied to the study of ion-exchanged glass waveguides with a few modes // Intern. J. Optoelectronics. 1994. V. 9. № 4. P. 359–363.