

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ МОД ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПЛАНАРНОГО ВОЛНОВОДА МЕТОДОМ ТОРЦЕВОЙ МОДОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2014 г. Д. В. Свистунов, канд. физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург

E-mail: svistunov@mail.ru

В результате анализа измерительной оптической схемы выявлены основные факторы, влияющие на достоверность результатов измерения спектра волноводных мод методом торцевой модовой спектроскопии. Показано, что эти факторы характеризуют отклонения условий торцевого возбуждения волноводных мод от оптимального режима. Проведена оценка допустимых пределов отклонений параметров настройки узла ввода света в волновод от оптимальных и предложена методика юстировки этой части оптической схемы.

Ключевые слова: планарный волновод, спектр мод, торцевая модовая спектроскопия.

Коды OCIS: 230.7390, 130.0130, 160.3130, 120.3940

Поступила в редакцию 17.07.2013

Введение

Одной из важнейших оптических характеристик волновода является его спектр мод, который обычно измеряют методом спектроскопии m -линий, описанным, например в работе [1]. Однако, в случае заглубленных волноводных структур, моды которых не туннелируют в прижатую к поверхности волновода призму, этот метод не обеспечивает проведение прямых измерений. В этом случае может быть применен другой перспективный метод – торцевая модовая спектроскопия [2, 3]. Он основан на отличии углов выхода излучения различных волноводных мод при их косом падении на выходной торец волновода. Как возбуждение мод, так и регистрация выходных пучков проводятся торцевым способом. Это позволяет использовать эту методику измерений для определения эффективных показателей преломления (ЭПП) мод волноводов с произвольными поперечными профилями показателя преломления, в том числе заглубленных градиентных структур. Кроме того, метод торцевой модовой спектроскопии позволяет проводить прямые измерения другого важного параметра планарного

волновода – максимального значения показателя преломления в градиентном поперечном профиле [3]. Данная работа посвящена рассмотрению влияния настройки оптической схемы на ошибки измерений этим методом.

В наиболее простом и удобном для проведения измерений варианте оптической схемы используется нормальное падение сфокусированного пучка на входной торец волновода. При этом ЭПП волноводных мод N_m рассчитываются как [2]

$$N_m = \sin \psi_m / \sin \alpha, \quad (1)$$

где m – порядок моды, α – угол между входным и выходным торцами волновода, ψ_m – угол выхода пространственного светового пучка, соответствующего данной моде. Эта схема измерений является основным рабочим вариантом. Однако измерения можно осуществлять и при отклонении от нормального падения входного пучка. При этом наклон пучка в плоскости осевого сечения, перпендикулярной поверхности волновода (при соблюдении параллельности образующей линии входной цилиндрической линзы и поверхности образца), влияет только на эффективность возбуждения волноводных мод

и не приводит к ошибкам измерений. Существенным в этом случае является наклон падающего пучка в плоскости, параллельной поверхности образца. Если угол наклона i известен, то ЭПП мод определяются как [3]

$$N_m = \sqrt{(\sin \psi_m / \sin \alpha + \sin i / \operatorname{tg} \alpha)^2 + \sin^2 i}. \quad (2)$$

Ошибки определения ЭПП, обусловленные точностью измерений углов падения и выхода световых пучков из анализируемого образца, связаны с приборной погрешностью углоизмерительной аппаратуры и определяются обычным образом по правилам расчета погрешностей измерений. Эти ошибки не зависят от качества настройки оптической схемы и являются наименьшими возможными ошибками определения ЭПП. Собственно, задача состоит в том, чтобы определить влияние других факторов на точность измерений ЭПП и свести это влияние к минимуму, определив допустимые пределы отклонений параметров настройки схемы от оптимального случая, при котором ошибки измерений ЭПП полностью определяются погрешностью углоизмерительной аппаратуры.

На рис. 1 показан ход лучей в оптической схеме измерений. Рассмотрим факторы, которые могут повлиять на искажение приведенного на рис. 1б хода лучей, где обозначены измеряемые и используемые в расчетах ЭПП угловые величины.

Влияние настройки коллиматора

Оценим допустимое значение расходимости светового пучка после коллиматора. Рассмотрим сначала осевое сечение падающего на вол-

новод светового пучка плоскостью, перпендикулярной к поверхности волновода. Из рис. 1а можно заключить, что нарушение настройки коллиматора приводит к рассогласованию числовых апертур падающего пучка и волноводной моды, в результате чего эффективность ввода уменьшается. Однако, числовая апертура пучка, определяемая в этой плоскости, не влияет на измеряемые угловые величины.

Определим теперь, как повлияет на результаты измерений расходимость пучка в плоскости образца. Обратившись к рис. 1б, можно сделать вывод, что при малой расходимости светового пучка, падающего на входной торец волновода, каждый выходной пучок получит небольшое угловое уширение, оставаясь практически симметричным относительно искомого направления ψ_m . Поэтому, измеряя центральное направление каждого выходящего из волновода слаборасходящегося пучка, устраняем этим приемом влияние расстройки коллиматора и получаем отсчеты углов выхода ψ_m .

Следует отметить, что расходимость каждого пучка не должна превышать угловое расстояние между выходными пучками мод соседних порядков, иначе перекрытие расходящихся пучков не позволит проводить измерения. Проведем оценку этого углового расстояния, ориентируясь на свойства градиентных волноводов, в которых наиболее близкие значения ЭПП (а значит, и наименее пространственно разнесенные выходные пучки мод) в большинстве случаев имеют моды высших порядков. При этом учтем рекомендации работы [2] по выбору угла скоса пластины $\alpha \leq \arcsin(1/N_{\max})$, где N_{\max} – максимальный показатель преломления в градиентном слое. Тогда для соседних мод высших порядков,

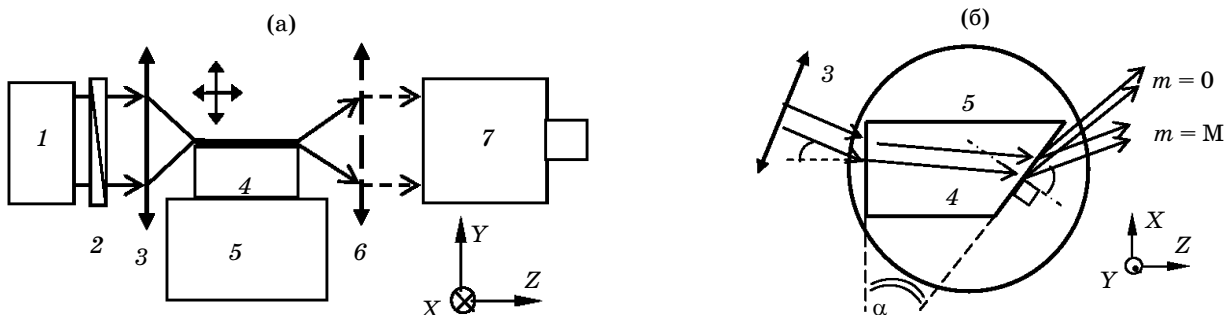


Рис. 1. Общая схема установки (а). 1 – лазер с коллиматором, 2 – поляризатор, 3, 6 – цилиндрические линзы, 4 – волновод, 5 – столик гониометра, 7 – зрительная труба на алидаде гониометра. Ход лучей в исследуемом волноводе (б). Здесь стрелкой обозначена образующая линзы 3, М – высший порядок мод волновода.

с учетом малой разницы углов выхода ψ_m и ψ_{m+1} , из формулы (1) можно получить

$$N_m - N_{m+1} \approx N_{\max}(\psi_m - \psi_{m+1})\cos\psi_{av},$$

где $\psi_{av} = (\psi_m + \psi_{m+1})/2$. С другой стороны, из формулы (1) имеем

$$\cos\psi_{av} = \sqrt{1 - (N_{av} / N_{\max})^2},$$

где N_{av} – значение ЭПП, которое соответствует среднему направлению ψ_{av} между пучками двух соседних мод высоких порядков. Отсюда, угловое расстояние между выходящими пучками этих мод

$$\psi_m - \psi_{m+1} \approx (N_m - N_{m+1}) / \sqrt{N_{\max}^2 - N_{av}^2},$$

причем $N_{av} \approx (N_m + N_{m+1})/2$. Проведем для примера численную оценку углового расстояния диффузионных планарных волноводов на базе стандартных оптических стекол. Выбрав достаточно типичные значения $N_{\max} = 1,53$ и $N_{av} = 1,51$, а также задавшись разностью между ЭПП высших мод $N_m - N_{m+1} = 10^{-4}$, получим угловое расстояние между соседними выходными пучками $\psi_m - \psi_{m+1} \approx 4 \times 10^{-4}$ рад $\approx 1,4'$. Значит, расходимость светового пучка после коллиматора не должна превышать этого значения. Приведенное условие можно достаточно просто выполнить в ходе юстировки оптической схемы.

Таким образом, на результаты измерений ЭПП мод методом торцевой модовой спектроскопии основное влияние оказывают угловые параметры условий торцевого возбуждения планарного волновода.

Влияние нарушения условия нормального падения входного пучка

Формула (2), учитывающая угол наклона i , указывает на него как на фактор, способный влиять на достоверность определения ЭПП волноводных мод. В совокупности формулы (1) и (2) позволяют оценить ошибки измерений, возникающие при отклонении входного пучка от нормального падения. Действительно, в основном режиме измерений расчет ЭПП проводится по формуле (1). Однако, при неточной настройке узла ввода (т. е. при $i \neq 0$) измеренные значения ψ_m надо было бы использовать, проводя расчет

по формуле (2). Подстановка же их в формулу (1) приводит к ошибкам определения ЭПП.

Проведем оценку этих ошибок. Из формулы (1) получаем $\partial N_m / \partial \psi_m = (\cos\psi_m / \sin\alpha)$. Трассировка лучей на схеме рис. 1б приводит к зависимости $\psi_m(i)$ в следующем виде:

$$\psi_m = \arcsin\{N_m \sin[\alpha - \arcsin(\sin i / N_m)]\}.$$

Напомним, что рабочим вариантом методики измерений является случай $i \rightarrow 0$. Можно показать, что с учетом малости угла i величина $\partial \psi_m / \partial i$ имеет вид $\partial \psi_m / \partial i \approx -\cos\alpha / \cos\psi_m$. Подставив это в выражение $\partial N_m / \partial \psi_m$ и обозначив $\Delta N_m = |\partial N_m|$, можем оценить модуль ошибки определения ЭПП как $\Delta N_m = \Delta i \operatorname{ctg}\alpha$. Здесь Δi обозначает приращение угла i от некоторого значения. Поскольку мы рассматриваем отклонение от условия нормального падения входного пучка, т.е. от нулевого угла падения, то здесь сам малый угол падения i играет роль приращения Δi . Тогда, проведя в полученной формуле замену величин, получаем для малых углов падения светового пучка на входной торце волновода искомую зависимость модуля ошибок определения ЭПП от угла падения

$$\Delta N_m(i) = i \operatorname{ctg}\alpha, \quad (3)$$

где i – малый угол в радианной мере. Из этой формулы видно, что ошибки расчета ЭПП по рабочей формуле (1), вызванные отклонением от условия нормального падения входного пучка света, будут одинаковыми для мод разных порядков исследуемого образца волновода.

Для подтверждения этого неочевидного вывода проведем численную оценку ошибок измерений характеристик волновода другим способом. При этом используем результаты исследований реального образца с углом $\alpha = 38^\circ 57' 08''$, спектр мод которого $N_m(m)$ был измерен в работе [2] двумя методами. Для этой оценки примем, что ошибка определения ЭПП при наклоне входного пучка будет равна $\Delta N_m(i) = N_m - N'_m$, где N'_m – ошибочное значение ЭПП моды, вычисленное без учета этого наклона по основной рабочей формуле (1), N_m – реальное значение ЭПП. В качестве реальных значений используем представленные в таблице результаты измерений спектра мод этого волновода

Спектр ТЕ-мод волновода К8:К⁺ при длине волны света 633 нм

m	0	1	2	3	4	5	6
N_m	1,51980	1,51822	1,51701	1,51611	1,51544	1,51493	1,51452

традиционным методом спектроскопии m -линий. Задаваясь углом наклона i как переменной величиной, а также реальными значениями ЭПП мод N_m , из формулы (2) рассчитываем значения угла выхода ψ'_m , которые были бы получены в измерениях при заданных углах i . Затем подставляем полученные углы ψ'_m в формулу (1) и находим величины N'_m . Сравнение их с реальными значениями N_m показывает значения ошибок определения ЭПП мод. Результаты такого расчета $\Delta N_m(i)$ представлены на рис. 2. Отметим, что ошибки определения ЭПП разных мод при малых углах i действительно оказались практически одинаковыми. Зависимость $\Delta N_m(i)$ для этого образца, полученная расчетом по формуле (3), полностью совпала с представленной на этом рисунке. Эти результаты подтверждают справедливость формулы (3).

Из формулы (3) также следует, что выбор угла скоса пластины α близким к предельному значению позволяет не только повысить чувствительность метода измерений (что показано в работе [2]), но и уменьшить влияние нарушения условия нормального падения входного светового пучка.

Из представленной на рис. 2 зависимости следует, что для углов наклона i в пределах до $5''$, которые могут возникнуть при контролируемой настройке точных подвижек использованного в работе [2] гониометра ГС-5, ошибки измерения не превышают 3×10^{-5} , т. е. имеют приемлемое значение, соответствующее обычному уровню ошибок измерений ЭПП мод традиционным методом спектроскопии m -линий.

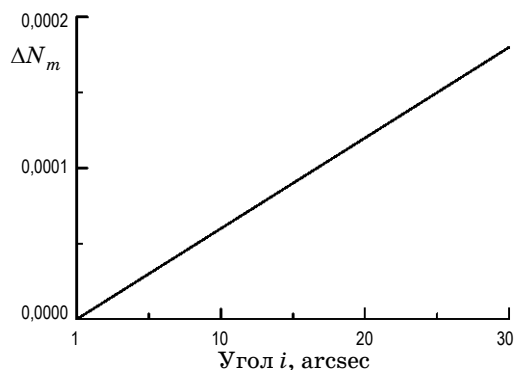


Рис. 2. Ошибки измерения ЭПП при косом падении пучка на входной торец образца.

Влияние поворота входной линзы вокруг оси узла ввода

Помимо наклона падающего пучка в плоскости XZ (см. рис. 1) возможен также наклон образующей линии входной цилиндрической линзы к плоскости волновода. Рассмотрим отдельно этот случай поворота линзы вокруг оптической оси, полагая здесь, что ось линзы выставлена по нормали к входному торцу образца. Ход лучей на участке ввода света в волновод показан на рис. 3.

Пусть образующая линия линзы наклонена к поверхности образца на угол γ . Тогда, как показано на рис. 3, на такой же угол будет наклонена к вертикальной оси Y плоскость падения сфокусированного линзой светового пучка.

Пользуясь свойством обратимости оптических схем, содержащих только пассивные элементы, рассмотрим эту ситуацию в обратном ходе как излучение волноводной моды из выходного торца волновода. Из работ [2, 3] известно, что при косом падении волноводной моды на выходной торец вышедший из образца световой пучок имеет на поперечном экране вид изогнутой световой полосы, симметричной относительно плоскости образца, причем наиболее загнуты края пучка. Отсюда следует, что при вводе света в волновод наклоненной линзой ситуация обратна описанной – краевые лучи падающего пучка возбуждают в волноводе моду, направленную под углом к нормали входного торца. При этом параксиальные лучи удовлетворяют условию нормального падения входного пучка. Это означает, что в волноводе теперь идет расходящийся модовый пучок, и вышедший из волновода на другом торце пространственный пучок будет иметь угловое

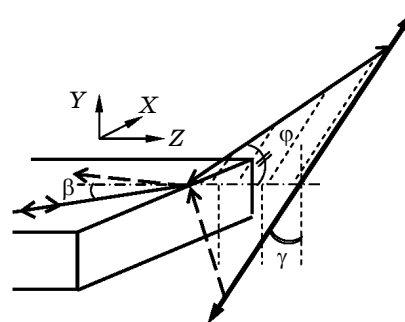


Рис. 3. Схема хода лучей при повороте входной цилиндрической линзы вокруг оптической оси.

уширение в плоскости XZ . Если числовая апертура вводной линзы, а также размер и положение светового пятна на входном торце согласованы с параметрами конкретной волноводной моды, то при рассматриваемом повороте входной линзы вокруг оси выходной пучок будет практически симметричен относительно направления вывода параллельного модового пучка, и это не приведет к ошибкам измерения ЭПП. Однако при торцевом вводе обычно возбуждается набор волноводных мод, и есть естественное стремление использовать это обстоятельство, измеряя характеристики нескольких мод при одной настройке ввода. Для этого сканируют сфокусированным входным пучком входной торец, выбирая такое положение пучка, при котором обеспечивается наилучшая видимость набора мод. При этом только часть смещенного падающего пучка оказывается задействованной в процессе ввода света в отдельную моду, и при наличии рассматриваемого поворота линзы выходной пучок этой моды окажется уширенным несимметрично относительно направления выхода параллельного модового пучка, как можно понять из рис. 3. Это и приводит к ошибкам измерений характеристик моды.

Для оценки степени влияния этого фактора рассмотрим предельный случай, полагая, что только крайний луч падающего пучка возбуждает моду волновода. Тогда весь модовый световой пучок имеет односторонний наклон к нормали входного торца, и ошибка определения ЭПП максимальна. Начнем, при этом, с рассмотрения обратного хода лучей на участке ввода света в волновод, т.е. будем считать, что в этом месте происходит излучение волноводной моды из волновода. Чтобы использовать известные формулы, предположим, что на противоположном торце волновода соблюдено условие нормального падения пучка света, и возбужденная там мода приходит к рассматриваемому торцу под углом падения β . В такой модели мы получаем ход лучей в волноводе, аналогичный показанному на рис. 1б при условии $i = 0$. Тогда отсчитываемый в наклонной плоскости угол выхода ϕ крайнего луча светового пучка (см. рис. 3) определяется из выражения [3]

$$\sin \phi = N_{\max} \cos\{\arcsin[(N_m / N_{\max}) \cos \alpha]\}. \quad (4)$$

Заметим, что принятые условия обратного хода лучей приводят к равенству $\beta = \alpha$. Теперь свяжем угол ϕ с углом наклона образую-

ющей линии линзы к поверхности образца γ . Расходимость проекции выходного пучка на плоскость YZ определяется дифракцией света, обусловленной поперечным размером излучающего волноводного слоя, поэтому примем, что эта угловая расходимость пучка будет сохраняться и при малом изменении угла падения β . Тогда можно показать, что угол ϕ будет связан с углом наклона плоскости выхода крайнего луча к оси Y (равным γ) соотношением $\text{tg} \phi = \text{tg} \phi_0 / \cos \gamma$, где ϕ_0 определяется из выражения (4) при $\alpha = 0$, т.е. при условии нормального падения моды на выходной торец. Рассчитав величину ϕ_0 и задаваясь разными углами наклона вводной линзы γ , из этого выражения и формулы (4) можем получить зависимость $\alpha[\phi(\gamma)]$ и равную ей $\beta(\gamma)$. Обратим теперь уже этот ход лучей и опять рассмотрим его как при вводе света в волновод на этом участке, каким он показан на рис. 3. Тогда полученная зависимость $\beta(\gamma)$ связывает угол γ поворота входной линзы с углом β к нормали входного торца, под которым в волноводе идет мода, возбужденная крайним лучом входного пучка. Эта ситуация фактически сводится к рассмотренному выше случаю косоугольного возбуждения волноводной моды. Записав закон Снеллиуса в виде $N_m \sin \beta = \sin i_{\text{mod}}$, рассчитываем зависимость угла падения модельного косоугольного пучка от угла поворота линзы $i_{\text{mod}}(\gamma)$. Затем по формуле (3) находим ошибки измерения ЭПП $\Delta N_m[i_{\text{mod}}(\gamma)]$ и получаем искомую зависимость $\Delta N_m(\gamma)$.

В качестве примера на рис. 4 представлена зависимость $\Delta N_m(\gamma)$, рассчитанная для рассмотренного выше реального образца. Значение $N_{\max} = 1,52204$ получено для него расчетом

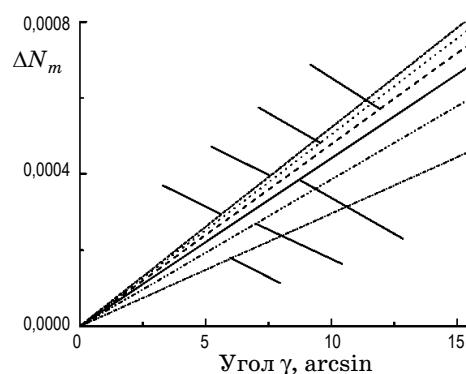


Рис. 4. Ошибки определения ЭПП при повороте вводной цилиндрической линзы вокруг оптической оси. Цифровые обозначения линий соответствуют порядкам волноводных мод.

по традиционной методике [4] с использованием измеренного спектра мод. Видно, что в отличие от предыдущего случая ошибки измерения ЭПП разных мод различны, причем минимальны для основной моды волновода. С ростом порядка мод разница между ошибками уменьшается, и для двух высших мод ошибки измерения ЭПП практически совпадают. Отметим, что используемое в измерительной установке стандартное оборудование не всегда позволяет обеспечить точную ориентацию вводной линзы относительно плоскости образца. При этом следует ожидать, что ошибки ориентации этой линзы могут иметь порядок угловых минут, как будет показано ниже. Этим обстоятельством и обусловлен выбор диапазона изменения угла γ в представленной на рис. 4 зависимости. Из этого рисунка следует, что при таких углах γ ошибки измерения ЭПП довольно значительны, и для удержания ошибок в допустимых пределах (не более 10^{-4}) следует стремиться обеспечить контроль положения вводной линзы с точностью примерно 2–3'.

На практике при применении в схеме стандартного оборудования контроль нормального падения входного пучка проводится с использованием основного углоизмерительного устройства гониометра и имеет точность, значительно превышающую точность контроля угла γ . Поэтому обычно именно фактор поворота линзы вокруг оси является преобладающим источником ошибок измерений ЭПП, хотя при одинаковых значениях углов i и γ величина $\Delta N_m(\gamma)$ существенно меньше, чем значение $\Delta N_m(i)$.

Юстировка узла ввода излучения в волновод по углу наклона γ затруднена тем, что в стандартном гониометре нет подвижек, которые позволили бы точно установить визирную линию окуляра зрительной трубы параллельно оси вращения столика и алидады гониометра. Поэтому, совместив поворотом цилиндрической линзы изображение сфокусированного ею светового пучка (в поле зрения окуляра оно будет видно как узкая световая полоса) с визирной линией окуляра, мы не можем гарантировать точной ориентации образующей линии этой линзы параллельно поверхности волновода.

Рассмотрим иную методику юстировки узла ввода излучения по параметру γ , которую можно считать вариантом автоколлимационного

метода. Закрепив на трубе гониометра окуляр-микрометр, с его помощью надо измерить наклон падающего пучка в отсутствие образца на предметном столике. Этому наклону можно поставить в соответствие разность отсчетов положения подвижной визирной линии окуляра при ее наведении на концы световой полосы в поле зрения. После этого следует установить на предметный столик зеркало или эталонный кубик из набора принадлежностей гониометра так, чтобы угол падения светового пучка на его грань был небольшим. Затем, наведя трубу гониометра на отраженный световой пучок, надо измерить его наклон в поле зрения окуляра. При правильной настройке узла ввода наклоны прямого и обратного пучков в поле зрения будут одинаковыми. Если есть расстройка схемы измерений по параметру γ , то падающий и отраженный пучки будут наклонены в поле зрения окуляра в разные стороны под углом 2γ друг к другу, как показано на рис. 5. Тогда, поворачивая вводную линзу вокруг оси и поочередно измеряя при этом наклоны падающего и обратного пучков, следует добиваться совпадения этих наклонов. Это и будет критерием правильной ориентации вводной линзы.

Для примера: окуляр-микрометр гониометра ГС-5 позволяет проводить измерения с точностью отсчета 2". Поскольку мы сравниваем наклоны световых пучков, найденные с использованием разности угловых отсчетов

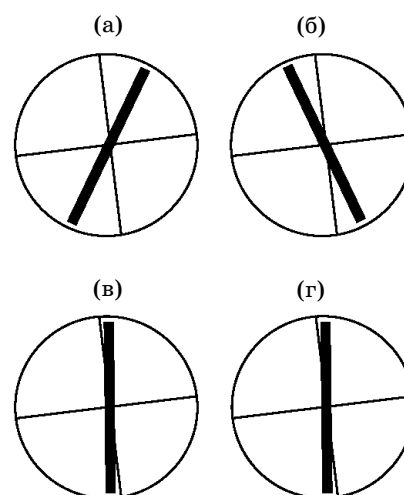


Рис. 5. Картины в поле зрения окуляра. Прямой (а) и отраженный (б) световые пучки в ходе настройки, в и г – виды этих пучков в результате настройки.

положений концов световой полосы, то точность контроля совпадения наклонов прямого и обратного пучков оказывается равной $4''$. С учетом размера поля зрения окуляра $60'$ это дает возможность определять угол рассогласования этих пучков 2γ в плоскости картины поля зрения, равный $4'$. Из представленных на рис. 4 зависимостей следует, что соответствующее значение угла поворота входной линзы $\gamma = 2'$ приводит к появлению ошибок определения ЭПП, имеющих допустимый уровень.

Заметим, что проведенная оценка представляет максимальный уровень ошибок измерений при повороте цилиндрической линзы вокруг оси, сопровождаемом предельным смещением входного пучка при сканировании торца волновода. При смещении падающего пучка к положению, согласованному с областью локализации измеряемой моды, ошибки измерения ЭПП уменьшаются, и расширяется диапазон допустимых наклонов линзы.

Заключение

Представленные материалы демонстрируют влияние качества юстировки измерительной оптической схемы на результаты измерений спектра волноводных мод методом торцевой модовой спектроскопии. Показано, что основными факторами, влияющими на ошибки измерений, являются отклонение от условия нормального падения сфокусированного светового пучка на входной торец анализируемого волновода, а также поворот выходного цилиндрического оптического элемента узла ввода излучения вокруг оптической оси. Выявлено, что на практике, при построении измерительной установки на базе стандартного оборудования, именно последний фактор является самым значительным источником ошибок измерений. Проведена оценка допустимых пределов отклонений параметров настройки узла ввода света в волновод от оптимальных и предложена методика юстировки этой части оптической схемы.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Интегральная оптика / Под ред. Тамира Т. М.: Мир, 1978. 344 с.
2. *Svistunov D.V.* End-Fire mode spectroscopy technique of examination of planar waveguides // *J. Optics A: Pure and Appl. Opt.* 2008. V. 10. № 8. P. 085301–085305.
3. *Svistunov D.V.* New measuring method of examination of planar optical waveguides // *Progress in Electromagnetics Research Symposium Online (PIERS Online)*. 2009. V. 5. № 4. P. 316–320.
4. *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.