_ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ____ ТЕХНИКА ____

УДК 53.082

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ЮСТИРОВКИ СОЕДИНЕНИЯ КАНАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С ВОЛОКОННЫМ СВЕТОВОДОМ ПО ОТРАЖЕНИЯМ ОТ ДАЛЬНЕГО ТОРЦА ВОЛНОВОДА

© 2021 г. П. В. Карнаушкин^{*a,b,**}, Ю. А. Константинов^{*a*}

^а Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН Россия, 614990, Пермь, ул. Ленина, 13а ^b Пермский государственный национальный исследовательский университет Россия, 614990, Пермь, Комсомольский просп., 29 *e-mail: pavelkarn2@gmail.com Поступила в редакцию 09.03.2021 г. После доработки 22.03.2021 г. Принята к публикации 24.03.2021 г.

Представлена методика юстировки волновода фотонной интегральной схемы и волоконного световода по отражениям от дальнего торца волновода, полученным с помощью метода оптической рефлектометрии в частотной области. Рефлектометр сконструирован на основе интерферометра Майкельсона. В качестве измерительного плеча интерферометра служила линия, образованная волоконным световодом и канальным волноводом фотонной интегральной схемы. Фотонная интегральная схема с протонно-обменными канальными волноводами из LiNbO₃ была отполирована под углом 10°, а наконечник с волоконным световодом — под углом 15°. В работе проведены и проанализированы эксперименты по юстировке волоконного световода и волновода. Показано, что амплитуда отраженного от дальнего торца волновода сигнала определялась размером продольных и боковых смещений между волоконным световодом и волноводом. Максимальное значение амплитуды пика составило 16 дБ. В ходе экспериментов установлено, что точность методики юстировки составила 4, 1 и 1 мкм по осям *X*, *Y* и *Z* соответственно.

DOI: 10.31857/S0032816221040182

введение

Работа посвящена особенностям тестирования и сборки устройств на основе фотонных и оптоэлектронных компонентов, в частности, фотонных интегральных схем (ф.и.с.), которые применяются в телекоммуникационном оборудовании, в навигационных системах и комплексах, в системах мониторинга физических величин [1–3].

На практике распространены ситуации, когда необходимо ввести оптическое излучение в ф.и.с. и вывести его обратно. Как правило, это возникает, если ф.и.с. содержит только пассивные компоненты, а оптическая система предусматривает наличие внешнего источника излучения либо внешнего фотоприемника, а также других ф.и.с. В таких случаях оптический сигнал вводится и выводится с помощью волоконных световодов (в.с.).

В общем случае взаимное расположение в.с. и волновода определяется их боковыми, продольными и угловыми смещениями [4]. Юстировка осуществляется с помощью позиционеров, которые перемещают в.с. или ф.и.с. по шести степеням свободы: трем координатам *X*, *Y*, *Z* и трем углам θ_X , θ_Y , θ_Z (рис. 1).

Традиционно юстировка волновода и в.с. рассматривается исследователями как задача оптимизации, где целевой функцией является уровень оптического сигнала [5–7]. В случае пассивной ф.и.с. проблемой является необходимость одновременной юстировки в.с. и ф.и.с. как на входе



Рис. 1. Юстировка волновода и волоконного световода.

волновода, так и на выходе. Данная проблема является особенно актуальной в случае юстировки канального волновода с волоконными линзами, поскольку этот процесс достаточно трудоемок изза строгих допусков [8]. Существует несколько подходов к решению данной проблемы. Например, в исследованиях [9] показано, что приближенная юстировка каждого в.с. с волноводом может быть выполнена путем ввода видимого излучения. Последнее, распространяясь по волноводу, излучается наружу и подсвечивает волновод. Такая юстировка позволяет пропустить через волновод малый оптический сигнал, который затем можно усилить, оптимизируя положение в.с. уже на рабочей длине волны. Недостатком ее является высокая трудоемкость, сложность автоматизации и зависимость от спектральных характеристик волноводов ф.и.с. Другой подход [6] рассматривает юстировку двух в.с. и волновода как единую задачу оптимизации с большим числом степеней свободы. Недостатком в этом случае является большое время работы алгоритма юстировки, которое можно сократить, предварительно выполнив приближенную юстировку.

В работе [10] авторы предложили юстировать волоконные линзы и гребенчатый волновод, используя в качестве обратной связи отраженный от ближнего торца волновода сигнал. Используя пьезопозиционеры и метод полного перебора, авторы строили зависимость уровня отраженного оптического сигнала от координаты позиционера, с помощью чего определяли положение волновода с точностью до 0.5 мкм. После юстировки волоконных линз по отражениям авторы проводили юстировку по проходящему оптическому излучению. Несмотря на хорошую точность, подход имеет недостатки. Во-первых, такая юстировка неэффективна с погруженными волноводами, особенно с низким контрастом показателя преломления. Во-вторых, подход мало эффективен в случае, когда торцы ф.и.с. отполированы под

определенным углом или имеют антиотражающие покрытия для снижения обратных отражений.

Существуют способы юстировки в.с. и ф.и.с. с помощью методов компьютерного зрения. Например, в работе [11] рассмотрен случай юстировки оптического наконечника с массивом волоконных световодов и ф.и.с. Однако в этой работе авторы проводили юстировку не сердцевины в.с. и волновода, а только торцов наконечника и ф.и.с. без учета уровня оптического сигнала, поэтому данная методика непригодна для точной юстировки и требует дальнейшей юстировки по оптическому сигналу.

В настоящей работе предложена иная методика юстировки в.с. и ф.и.с. — по отражениям, полученным от дальнего торца волновода. Данная методика позволяет не только провести независимую юстировку каждого в.с. с волноводом, но и гарантированно ввести излучение в волновод. Для детектирования отражений от дальнего торца ф.и.с. был использован метод оптической рефлектометрии в частотной области [12]. Работа в этой области позволяет достичь достаточно высокого разрешения по длине, пригодного для исследования непротяженных объектов, таких как ф.и.с., что невозможно при использовании импульсного сигнала во временной области.

ТЕОРИЯ

К основным параметрам, влияющим на оптическое соединение между волноводом ф.и.с. и в.с., относятся оптические потери. Для количественного анализа параметров оптических соединений используется теория оптических мод. Оптические моды рассматриваются как поперечные электромагнитные волны. Связь между модами в соединении описывается с помощью интеграла перекрытия *С* (коэффициента передачи) по формуле [13]:

$$C = \left(\frac{\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}|E_{\text{волн}}(x, y, z)||E_{\text{вс}}(x, y, z)|dxdy}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}|E_{\text{волн}}(x, y, z)|^2dxdy}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}|E_{\text{вс}}(x, y, z)|^2dxdy}\right)^2,$$
(1)

где $E_{\text{волн}}$ — поперечное распределение электрической напряженности поля волновода; $E_{\text{вс}}$ — поперечное распределение электрической напряженности поля волоконного световода.

Интеграл перекрытия *С* лежит в пределах от 0 до 1, что означает соответственно высокие оптические потери и отсутствие оптических потерь.

Используя приближение гауссова пучка для аппроксимации $E_{\text{волн}}$ и $E_{\text{вс}}$, возможно провести оценку интеграла перекрытия для боковых и продольных смещений по формулам [13]:

$$C = \left(\frac{2\omega_{\rm l}\omega_{\rm 2}}{\omega_{\rm l}^2 + \omega_{\rm 2}^2}\right)^2 e^{-\frac{2d^2}{\omega_{\rm l}^2 + \omega_{\rm 2}^2}},$$
 (2)



Рис. 2. Схемы рефлектометра (а) и процесса юстировки наконечников и ф.и.с. (б). 1 – перестраиваемый узкополосный лазер Keysight 81606A; 2 - 3 дБ разветвитель 2×2 ; 3 - торец волоконного световода; 4 и 7 - оптические наконечники; 5 и 8 - платформы; 6 - фотонная интегральная схема; 9 - измеритель оптической мощности Keysight 81635A; 10 - фотоприемник HCA-S-200M-IN-FC (200 МГц); 11 - осциллограф Tektronix dpo7254; $L \approx 130$ мм – длина волокна с оптическим наконечником 4; $l \approx 36$ мм – длина ф.и.с.; FC/APC – разъемы; PC – контроллер поляризации.

$$C = \frac{4}{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2} + \frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + 4\left(\frac{D}{n_c k \omega_1 \omega_2}\right)^2},$$
 (3)

где ω_1 и ω_2 – радиусы модовых полей волновода и волоконного световода; d – боковое смещение; D – продольное смещение; $k = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор; n_c – показатель преломления среды.

Например, из (2) следует, что в случае двух одинаковых пучков оптические потери составляют 1 дБ при боковом смещении на половину радиуса модового поля и более 4 дБ при смещении на целый радиус.

Как показано в [14], амплитуда пика отражения на рефлектограмме от торца в.с. линейно зависит от оптических потерь ослабителя, расположенного на измерительном плече интерферометра. В настоящей работе функции ослабителя выполняют боковые и продольные смещения между канальным волноводом и в.с., которые вносят оптические потери, согласно формулам (2) и (3). Меняя оптические потери в измерительном плече путем продольного и бокового смещения в.с. и оценивая их по амплитуде пика на рефлектограмме, предлагается находить оптимальное положение в.с.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Оптический рефлектометр в частотной области выполнен на основе интерферометра Майкельсона (рис. 2а). Применялись оптические волокна стандарта SMF28e+. В качестве источника оптического излучения *1* использовался перестраиваемый узкополосный лазер Кеуsight 81606A с шириной полосы <10 кГц. Лазер *1* перестраивался со скоростью $\Delta\lambda/\Delta t = 100$ нм/с в диапазоне длин волн 1550–1552 нм. Излучение от лазера попадало на 3 дБ разветвитель (2 × 2) *2*, после которого расходилось в два плеча. Первое плечо являлось опорным, излучение здесь попадало на сколотый под углом 90° торец З волоконного световода. Данный торец использовался в качестве зеркала. отражая ~ 4% оптической мощности. Второе плечо было измерительным. Началом плеча служил волоконный вывод разветвителя 2. К нему был приварен оптический наконечник 4. представляющий собой волоконный световод длиной L = = 130 мм. конец которого вклеен в стеклянный параллелепипед с U-канавкой и углом полировки торца 15°. Оптический наконечник 4 фиксировался с помощью вакуума на платформе 5, обеспечивающей его перемещение по осям X, Y, Z с шагом <0.5 мкм (рис. 2б). Напротив оптического наконечника 4 на специальном столике была размещена ф.и.с. 6 с одномодовыми протонно-обменными канальными волноводами длиной *l* = 36 мм (из LiNbO₃). Фотонная интегральная схема имела торцы, отполированные под углом 10°. У дальнего торца ф.и.с. 6 был расположен еще один оптический наконечник 7 с длиной волокна ~1 м, закрепленный на платформе 8. Наконечник 7 был подключен к волоконному выводу длиной ~0.8 м измерителя оптической мощности (9) Keysight 81635А, который использовался для контроля уровня проходящего через ф.и.с. оптического сигнала.

Излучение от лазера 1, частично отражаясь от торца оптического наконечника 4, попадало на торец ф.и.с. В случае, когда наконечник 4 и волновод ф.и.с. были выровнены, излучение доходило до дальнего торца волновода и отражалось. Отраженное от опорного и измерительного плеч излучение интерферировало в разветвителе 2 и формировало сигнал на фотоприемнике 10 HCA-S-200M-IN-FC, подключенном к первому каналу осциллографа 11 Tektronix DPO7254. Лазер в ходе перестройки через каждые 0.1 нм испускал импульс по выходному триггеру, который был подключен ко второму каналу осциллографа 11. Триггер использовался для синхронизации осциллографа с процессом перестройки лазера.



Рис. 3. Рефлектограммы, полученные в ходе смещения оптического наконечника относительно канального волновода (для расчета длины по оси абсцисс использовано приближение: измерительное плечо по всей длине имеет показатель преломления 1.45): **a** – наконечник находится в начальном положении (максимальный уровень оптического сигнала); **б** – наконечник отодвигается от торца волновода по оси *X*; **в** – по оси *Y*; **г** – по оси *Z*. *1* – отражение от ближнего торца волновода; *2* – отражение от дальнего торца волновода; *3* – отражения от FC/APC-разъемов.

Оптический наконечник 4 перемещался вдоль торца ф.и.с. 6 по осям X, Y и Z. Когда излучение не проходило в волновод ф.и.с., на рефлектограмме появлялся только пик I (рис. 3а), соответствующий отражению от торца наконечника. В момент, когда оптическое излучение из наконечника частично проходило в волновод, на рефлектограмме появлялся пик 2, соответствующий отражению от дальнего торца волновода. Для доказательства того, что пик 2, действительно, является отражением от дальнего торца волновода, проведен расчет расстояния l_{exp} между пиком I и пиком 2 по формуле:

$$l_{\exp} = \frac{(f_2 - f_1)\lambda^2}{2n_o\Delta\lambda/\Delta t},$$
(4)

где $f_1 = 15577$ Гц и $f_2 = 22147$ Гц – частоты биений пиков 1 и 2 соответственно; $\lambda = 1551$ нм – центральная длина волны лазера; $n_g = 2.21$ – групповой показатель преломления волновода; $\Delta\lambda/\Delta t =$ = 100 нм/с – скорость перестройки лазера.

Полученное расчетное значение $l_{exp} \approx 36$ мм полностью совпадает с реальной величиной l = 36 мм,

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 5 2021

что подтверждает гипотезу о принадлежности пика 2 отражению от дальнего торца волновода. Рефлектограмма также содержит несколько близко расположенных пиков 3, которые предположительно соответствуют нескольким разъемам FC/APC, расположенным на пути к измерителю оптической мощности.

Ширина на полувысоте пиков *1* и *2* составила ~20 мм, что значительно превышает рассчитанное разрешение рефлектометра $\lambda^2/(2n_g\Delta\lambda) \approx 0.4$ мм. Исходя из этого был сделан вывод, что закон перестройки лазера мог отклоняться от линейного и/или менять ширину полосы в ходе перестрой-ки. В данном исследовании не предпринимались шаги для компенсации нелинейности перестройки лазера, так как полученные результаты достаточны для достижения цели работы. Шаг дискретизации времени осциллографа был выбран исходя из оценки времени, за которое лазер перестраивался на величину одного свободного спектрального диапа-

зона интерферометра: $\frac{FSR}{\Delta\lambda/\Delta t} = \frac{\lambda^2}{2n_g(l+L)\Delta\lambda/\Delta t} \approx 50$ мкс, и составил 1 мкс. Такой шаг дискретиза-

ции позволил разместить на одном периоде свободного спектрального диапазона 50 точек, а также обеспечил возможность быстрого обновления рефлектограммы на осциллографе в реальном времени. Скорость перестройки лазера $\Delta\lambda/\Delta t = 100$ нм/с была подобрана экспериментально так, чтобы пики 1 и 2 не сливались на экране осциллографа.

Для оценки эффективности метода юстировки по обратным отражениям от дальнего торца волновода была исследована зависимость амплитуды отраженного сигнала на рефлектограмме от смещения между оптическим наконечником и волноводом по осям X, Y, Z. Для этого проведено три эксперимента. В первом эксперименте наконечник, начальное положение которого соответствовало максимуму оптического сигнала, смещался вдоль оси Х на расстояние от 0 до 50 мкм с шагом 10 мкм. На каждом шаге данные с осциллографа 11 сохранялись. Во втором эксперименте наконечник смещался на расстояние от 0 до 10 мкм с шагом 2 мкм вдоль оси Y, а в третьем — от 0 до 10 мкм с шагом 2 мкм вдоль оси Z. Результаты были сглажены с помощью фильтра Савицкого–Голея [15]. Рефлектограммы, полученные в ходе экспериментов, представлены на рис. 3б-3г.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. Зб показан набор рефлектограмм, полученных при смещении наконечника от начального положения (0 мкм) до 50 мкм с шагом 10 мкм по оси Х. Согласно графику на рис. 4а, зависимость амплитуды пика 2 от смещения близка к линейной. Данный факт соответствует теории, поскольку кривая, построенная по формуле (3), близка к прямой. При первом смещении наконечника на 10 мкм амплитуда пика 2 снизилась незначительно. Причиной этого являлся тот факт, что в начальном положении наконечник упирался в торец ф.и.с. с некоторым усилием, изза чего при первом смещении зазор получался меньше заданного. Необходимо отметить, что при смещении наконечника менялась и амплитуда пика 1. В ходе эксперимента предполагалось, что пик 1 складывался из двух отражений: от границы наконечник-воздух и от границы воздухф.и.с. Однако, в отличие от пика 2, амплитуда пика 1 менялась как в большую, так и в меньшую сторону. В ходе данной работы причина этого эффекта не установлена и является предметом для дальнейшего исследования.

На рис. Зв представлены рефлектограммы при смещении наконечника от начального положения (0 мкм) до 10 мкм с шагом 2 мкм по оси Y. Согласно графику на рис. 4б, каждое следующее смещение вызывает все большее снижение амплитуды пика 2. Это полностью соответствует формуле (2), так как зависимость оптических потерь от боковых смещений имеет форму гауссова



Рис. 4. Амплитуда пика отражения от дальнего торца волновода в зависимости от продольного (**a**) и бокового (**б**) смещения (прямоугольной областью выделены точки, близкие к уровню фонового шума).

распределения. При смещениях наконечника также менялась и амплитуда пика 1. В отличие от продольного, при боковом смещении зазор между наконечником и торцом ф.и.с. не менялся, а следовательно, амплитуда пика 1 должна остаться неизменной. Было сделано предположение, что в ходе смещения по оси Y оптический наконечник мог в небольших пределах менять свой угол относительно торца ф.и.с., что и вызывало изменения амплитуды пика 1.

На рис. 3г показан набор рефлектограмм при смещении наконечника от начального положения (0 мкм) до 10 мкм с шагом 2 мкм по оси Z. Согласно графику на рис. 4б, амплитуда пика 2 уменьшалась быстрее, чем при смещении по оси Y. Это обусловлено, во-первых, тем, что диаметр модового пятна волновода по оси Y больше, чем по оси Z. Во-вторых, было сделано предположение, что наконечник в ходе смещения по оси Y мог упираться в торец ф.и.с. и перемещался не на всю величину шага. Данный эффект мог возникнуть из-за того, что плоскость YZ-координат платформ находилась под небольшим наклоном к плоскости торца ф.и.с. Необходимо отметить, что область между пиками 1 и 2 на рис. 36—3г, соответствующая рэлеевскому рассеянию излучения в волноводе, меняет свой уровень аналогично амплитуде пика 2. Этот факт можно объяснить тем, что при смещении наконечника в волновод вводится меньше оптической мощности, следовательно, меньше излучения рассеивается и отражается при распространении в волноводе.

Как показано на рис. 3, амплитуда пика 2 составляла около 16 дБ. Учитывая, что амплитуда снижалась более чем на 0.5 дБ при первом шаге по всем осям, был сделан вывод, что изменение амплитуды будет наблюдаться и при меньшем шаге. Оценка минимального шага была проведена экспериментально и составила 4, 1 и 1 мкм по осям X, Y и Z соответственно. Размер минимального шага может быть значительно уменьшен, если увеличить амплитуду пика 2. Например, это можно сделать путем добавления в схему рефлектометра вспомогательного интерферометра и применения последующей компенсации нелинейности перестройки лазера с помощью нелинейного преобразования Фурье [12] или фильтра Дескью [12, 16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена и испытана методика юстировки волновода и волоконного световода с помощью отражений от дальнего торца волновода. Для получения отражений был использован оптический рефлектометр в частотной области на основе интерферометра Майкельсона. Показано, что амплитуда отраженного сигнала от дальнего торца волновода зависит от продольных и боковых смещений между волоконным световодом и волноводом. Причем характер зависимости соответствует формулам (2) и (3), полученным для двух одинаковых пучков, аппроксимированных с помощью приближения гауссова пучка. Экспериментально оценена точность методики: 4, 1 и 1 мкм по осям *X*, *Y* и *Z* соответственно.

Представленная методика юстировки обладает целым рядом преимуществ. Во-первых, она позволяет гарантированно ввести оптическое излучение в волновод; во-вторых, проводить юстировку на входе и выходе волновода независимо друг от друга; в-третьих, может быть легко автоматизирована. В случае, если точность методики удовлетворяет предъявляемым требованиям, она может полностью заменить трудоемкую юстировку по проходящему оптическому сигналу, что позволяет сократить количество дорогостоящих шестиосных платформ. Если точности недостаточно, то использование методики для первоначальной юстировки может упростить и ускорить тестирование и сборку ф.и.с.

- Tkachenko A.Yu., Lobach I.A., Kablukov S.I. // Quantum Electronics. 2019. V. 49. № 12. P. 1124. https://doi.org/10.1070/QEL17165
- 15. *Savitzky A., Golay M.J.E.* // Analytical Chemistry. 1964. V 36. № 8. P. 1627. https://doi.org/10.1021/ac60214a047
- 16. *Ding Z., Yao X., Liu T., Du Y., Liu K., Jiang J., Meng Z., Chen H.* // Optics Express. 2013. V. 21. № 3. P. 3826. https://doi.org/10.1364/OE.21.003826

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках работ по Государственному заданию № АААА-А19-119042590085-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Urino Y., Usuki T., Fujikata J., Ishizaka M., Yamada K., Horikawa T., Nakamura T., Arakawa Y. // Photonics Research. 2014. V. 2. № 3. P. A1–A7. https://doi.org/10.1364/PRJ.2.0000A1
- Suzuki K., Takiguchi K., Hotate K. // Journal of Lightwave Technology. 2000. V. 18. № 1. P. 66. https://doi.org/10.1109/50.818908
- Kim H., Yu M. // OSA Publishing. 2016. V. 24. № 9. P. 9501. https://doi.org/10.1364/OE.24.009501
- 4. *Lefevre H*. The Fiber Optic gyroscopes. Boston: Artech House, 1995. P. 180.
- Tang Z., Zhang R., Shi F.G. // Optics Communications. 2001. V. 196. № 1–6. P. 173. https://doi.org/10.1016/S0030-4018(01)01404-3
- Mizukami M., Hirano M., Shinjo K. Optical Engineering. 2001. V. 40. № 3. P. 448. https://doi.org/10.1117/1.1346580
- 7. *Zhang R., Shi F.G.* // IEEE Transactions on Advanced Packaging. 2004. V. 27. № 1. P. 173. https://doi.org/10.1109/TADVP.2004.825434
- O'Brien P., Carrol L., Eason C., Lee J.S. Packaging of Silicon Photonic Devices. // Silicon Photonics III. Topics in Applied Physics. V. 122 / L. Pavesi, D. Lockwood. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. P. 217. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10503-6_7
- Nonhebel R.P., Stienen B.P.J. University of Twente student theses. 2013. P. 8. http://purl.utwente.nl/essays/63389
- Morrissey P.E., Goulding D., Sheehan R., Roycroft B., Peters F.H. // IET Optoelectronics. 2013. V. 7. № 2. P. 57. https://doi.org/10.1049/iet-opt.2012.0054
- Zheng Y., Kai X.C., Duan J.A., Li B.B. // Journal of Central South University. 2015. V. 22. P. 3868. https://doi.org/10.1007/s11771-015-2931-x

12. Song J. Master Thesis. University of Ottawa, 2014.

https://doi.org/10.20381/RUOR-6642

ироводить юстиколновода независимо ожет быть легко авто-

P. 18.