

EDN: AENTIU

УДК 535.513.1; 681.7.068

2.2.6

ВОЛОКНА С ВЫСОКОЙ ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРОЙ: НОВЫЙ ПОДХОД ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ТОРЦЕВОЙ СТЫКОВКИ С ФОТОННЫМИ ИНТЕГРАЛЬНЫМИ СХЕМАМИ

А.С. Паньков, Р.С. Пономарев

Пермский государственный национальный исследовательский университет
Российская Федерация, 614068, Пермь, ул. Букирева, 15

Аннотация. Работа посвящена исследованию эффективного согласования волоконно-оптических элементов с фотонными интегральными схемами (ФИС). В качестве элементов ввода/вывода оптического излучения используются плоско сколотые одномодовые волокна (SMF-28) и волоконно-оптические сборки, состоящие из сочетания одномодовых волокон и волокон с ультравысокой числовой апертурой. Рассматривается зависимость оптических потерь в системе «волокно - чип ФИС - волокно» в диапазоне длин волн от 1530 до 1570 нм при использовании различных оптических элементов для ввода/вывода оптического излучения.

Ключевые слова: стыковка оптического волокна с фотонными интегральными схемами; элементы ввода/вывода оптического излучения; волокна с ультравысокой числовой апертурой (UHNA).

Введение

Уменьшение размеров электронных схем достигает критического уровня, но требования к скорости обработки данных продолжают увеличиваться. Чтобы обойти этот предел, потребуются устройства, использующие новые способы обработки данных. Одно из возможных решений заключается в использовании фотонов для выполнения как передачи, так и обработки данных. На этом фоне фотонные интегральные схемы (ФИС) за счет высокой скорости и малого энергопотребления становятся реальной перспективой для дальнейшего развития телекоммуникаций [1]. В течение последних десяти лет кремниевая фотоника существенно продвинулась вперед, открывая реальные перспективы применения в телекоммуникациях, обработке данных, медицинских технологиях, системах безопасности, детектирования, машинного обучения [2] и квантовых вычислений.

В настоящее время ФИС работают на длинах волн в широком спектральном окне прозрачности – от видимого (400 нм) до инфракрасного ($>2,5$ мкм) [3]. Наиболее широко они применяются для работы на длине волны 1550 нм. Интегральные схемы на основе нитрида кремния (Si_3N_4) обычно имеют высокий контраст показателя преломления волноводов, что ведет к миниатюризации устройств и уменьшению размеров волноводов. Это значительно повышает требования к волоконно-оптическим структурам, используемым для ввода и вывода оптического излучения. Диаметр сердцевинки одномодового оптического волокна SMF-28 в несколько раз превышает поперечные размеры волноводов ФИС, поэтому диаметры полей мод (ДПМ) оптического волокна и волновода, которые описывают распределение светового поля в области сердцевинки волокна и волновода, существенно отличаются (рис. 1). Чем ближе величины ДПМ волокна и волновода, тем эффективнее согласование и меньше оптические потери при вводе/выводе излучения в чип ФИС [4].

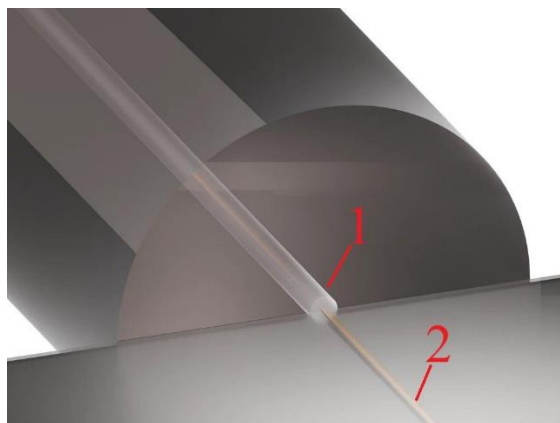


Рис.1. Стыковка оптического волокна с чипом ФИС:
1 – сердцевина оптического волокна, 2 – волновод ФИС

Для снижения оптических потерь при стыковке с ФИС используются волоконные микролинзы, преобразователи размера пятна, либо волокна с ультравысокой числовой апертурой (UHNA).

В этой работе будут представлены результаты торцевой стыковки с ФИС различных волоконно-оптических элементов для ввода/вывода оптического излучения. Будет проведено сравнение численных значений оптических потерь в диапазоне длин волн от 1530 до 1570 нм.

Описание эксперимента

Стыковка волоконно-оптических элементов с ФИС осуществлялась с помощью 3-осных линейных микропозиционеров Suruga Seiki. ФИС, используемая в эксперименте, была изготовлена на основе нитрида кремния (Si_3N_4) и имела оптические волноводы размером порядка 3,5 мкм. В качестве элементов ввода и вывода использовались плоско сколотое волокно (SMF-28) и волоконно-оптические компоненты, содержащие волокна UHNA (рис. 2).

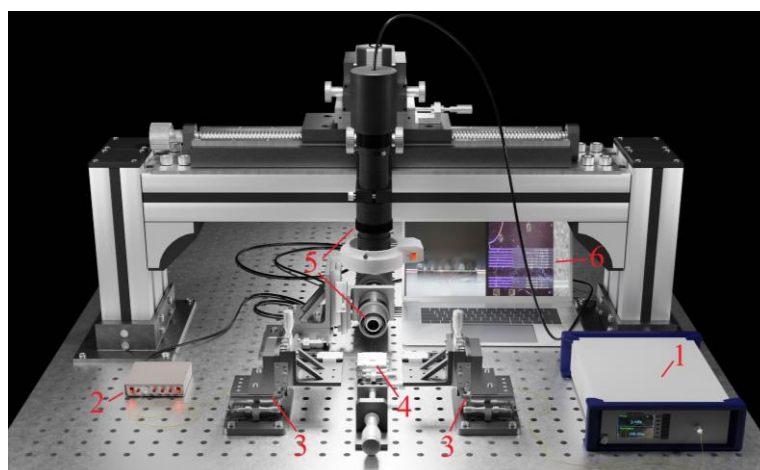
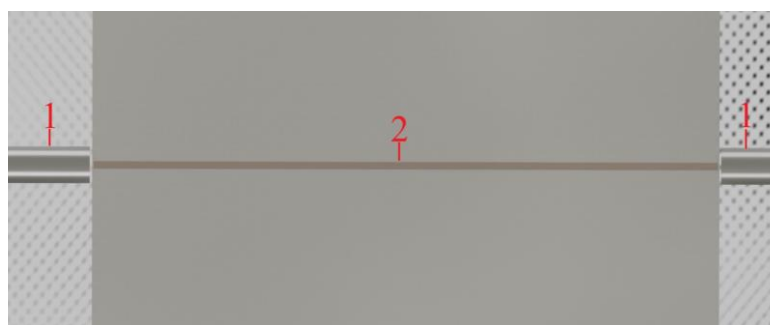


Рис.2. Установка для оптической стыковки с ФИС:
1– источник оптического излучения, 2 – 4-х каналный измеритель мощности,
3 – 3-осный микропозиционер с закрепленными волоконными структурами,
4 – 2-осный микропозиционер с ФИС, 5 – камера технического зрения,
6 – ПК с программным обеспечением

Волоконно-оптические элементы с волокнами, имеющими ультравысокую числовую апертуру, изготавливались с помощью сварочного аппарата Fujikura FSM-100P. Сами элементы представляют собой патч-корд на основе волокна SMF-28, который сваривается с волокном UHNA. После процесса сварки формируется скол таким образом, что длина волокна UHNA составляет порядка 10 мм. В результате получается патч-корд на основе волокна SMF-28, к торцу которого приварен отрезок волокна UHNA. Предварительная калибровка дуги и чистка электродов сварочного аппарата позволяет подобрать режим сварки таким образом, что потери в месте сварки волокон не превышают 0,2-0,4 дБ.

В качестве источника света использовался перестраиваемый лазер Golight, после его включения осуществлялась юстировка волоконно-оптических элементов относительно чипа ФИС. Она включала в себя подвод волокон к торцевым поверхностям кристалла и поиск сигнала, относительно которого производилась «точная» юстировка оптических элементов до нахождения максимума (рис.3). Максимум оптического сигнала регистрировался с помощью 4-х канального измерителя мощности оптического излучения на диапазоне длин волн 1530-1570 нм.



а) вид юстировки «сверху»

1 – оптическое волокно, 2 – ФИС с волноводом



б) вид юстировки «сбоку»

1 – оптическое волокно, 2 – ФИС

Рис.3. Момент подвода оптических волокон к торцу фотонной интегральной схемы

Результаты эксперимента

Оценка значения оптических потерь производилась в системе «волокно-ФИС-волокно» с учетом потерь, вносимых самими оптическими элементами для ввода и вывода оптического излучения. Перед стыковкой отдельным этапом осуществлялась стыковка «волокно-волокно».

В ходе эксперимента использовались следующие пары структур: плоско сколотые волокна SMF-28 и структуры SMF-28_UHNA1, SMF-28_UHNA4. Отрезки волокон UHNA1 и UHNA4 для структур SMF-28_UHNA были выбраны, исходя из доступности на момент

изготовления и проведения данного эксперимента. Эти волокна различны по размерам формируемого ими оптического пучка. Для UHNA1 размер пучка равен 4,8 мкм, а для UHNA4 – 4,0 мкм. В свою очередь, плоско сколотые волокна SMF-28 имеют на выходе пучок порядка 9 мкм.

Графики зависимости оптических потерь от длины волны оптического излучения представлены на рис. 4.

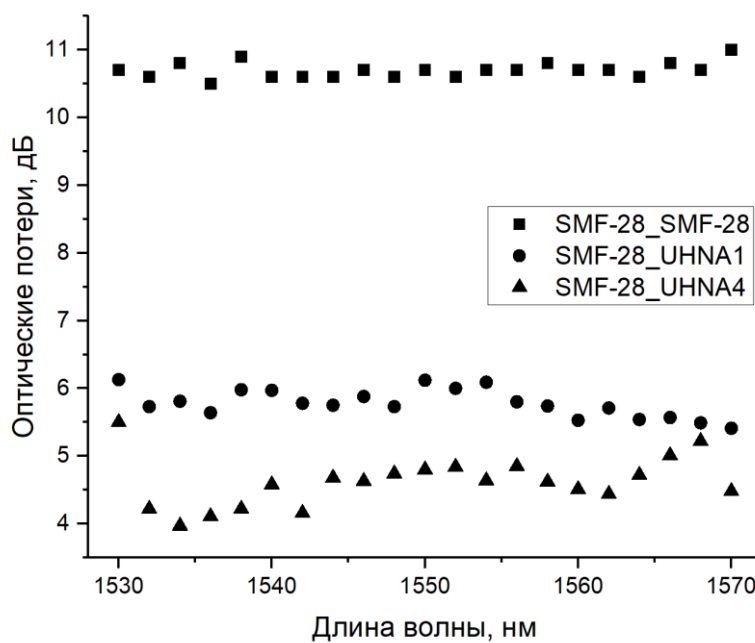


Рис.4. Зависимость оптических потерь от длины волны ввода излучения

Из графиков на рис. 4 видно, что использование прямых сколов оптических волокон с диаметром сердцевины 9 мкм при стыковке с ФИС существенно увеличивают оптические потери. Использование волокон UHNA позволяет существенно уменьшить оптические потери.

Заключение

В работе была оценена эффективность ввода оптического излучения в ФИС при использовании различных типов структур для ввода/вывода оптического излучения. Было показано, что при согласовании размеров ДПМ волокна и волновода ФИС, значения оптических потерь минимальны относительно волокон с размером сердцевины 9 мкм.

Волоконно-оптические структуры, включающие в себя отрезки волокна типа UHNA, позволили получить значения оптических потерь, сходные с результатами, полученными при использовании линзованных оптических волокон, что позволяет использовать волокна UHNA для изготовления модулей с массивом волокон в дальнейшем.

Список литературы

1. Mu X., Wu S., Cheng L. and Fu H.Y., Edge couplers in silicon photonic integrated circuits: a review // Applied sciences – 2020, Vol. 10(4), – P. 1–2.
2. Steinbrecher G.R., Olson J.P., Englund D. and Carolan J. Quantum optical neural network // NPJ Quantum information, – 2019, Vol. 5(1) – P. 1–9.

3. Blumenthal D. J., Heideman R., Geuzebroek D., Leinse A. and Roeloffzen C., Silicon nitride in silicon photonics // Proceedings of the IEEE, – 2018, P. 1–23.
4. Ивашенцева И.В., Третьяков И.В., Каурова Н.С., Голиков А.Д., Гольцман Г.Н., Эффективность согласования одномодового волокна с фотонной интегральной схемой Si₃N₄// Оптика и спектроскопия, – 2024, Vol. 132(10), – P. 1076–1086.

HIGH NUMERICAL APERTURE FIBERS: A NEW APPLICATION APPROACH FOR END-TO-END COUPLING WITH PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS

A.S. Pankov, R.S. Ponomarev

Perm State National Research University
15, Bukirev, Perm, 614068, Russian Federation

Annotation. The work is devoted to the study of effective matching of fiber-optic elements with photonic integrated circuits (PIC). The optical input/output elements used are flat cleaved fibers single mode (SMF-28), and fiber optic assemblies consisting of a combination of single-mode fibers and ultra-high numerical aperture (UHNA) fibers. The dependence of the numerical value of optical losses in the “fiber-PIC-fiber” system in the wavelength range 1530-1570 nm when using different optical elements for input/output of optical radiation is considered.

Keywords: coupling with photonic integrated circuits; input/output elements of optical radiation; ultra-high numerical aperture fibers.

Статья отправлена в редакцию 3 марта 2025 г.