

МНОГОКАНАЛЬНЫЕ АКТИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ СО СКОРОСТЬЮ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДО 14 ГБИТ/С НА 1 КАНАЛ

к.ф.-м.н. Карачинский Л.Я.^{1,2}, к.ф.-м.н. Блохин С.А.^{1,2}, к.ф.-м.н. Новиков И.И.^{1,2}, к.т.н. Щербаков В.В.³,
к.ф.-м.н. Климов Ю.А.⁴, чл.-корр. РАН Абрамов С.М.⁴

¹ Общество с ограниченной ответственностью «Коннектор Оптик» (ООО «Коннектор Оптик»)

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

³ Закрытое акционерное общество «Центр ВОСПИ» (ЗАО «Центр ВОСПИ»)

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт программных систем им.
А.К. Айламазяна Российской академии наук (ИПС им. А.К. Айламазяна РАН)

В последние годы остро стоит вопрос увеличения быстродействия оптических межсоединений, используемых при создании суперкомпьютеров. По мнению ведущих экспертов в данной области в ближайшие годы произойдет переход от суперкомпьютерных систем с производительностью в единицы Пфлопс к системам экзафлопсного уровня. Так, по мнению Кирка Скаугена (Kirk Skaugen), вице-президента Intel Architecture Group и генерального директора подразделения Data Center Group, Intel к 2018 году предоставит процессоры, которые в 125 раз будут превосходить по производительности процессоры настоящего времени [1]. По его словам, экзафлопсные системы позволят решать такие проблемы как поддержка передачи изображений компьютерного томографа в режиме реального времени при проведении хирургических операций, а также существенно улучшить качество прогнозирования образования ураганов и других природных явлений, а также другие проблемы. Однако помимо увеличения скорости работы процессоров необходимо решать и вопросы увеличения скорости работы устройств ввода-вывода (I/O).

Одной из ключевых проблем медных кабелей, традиционно используемых при передаче информации, является относительно быстрое затухание электромагнитной волны с расстоянием при повышении скорости передачи данных. АОК позволяет при сохранении электрических интерфейсов увеличить дальность и скорость передачи данных. Например, для медного активного кабеля Infiniband DDR (4x5 Гбит/с) длина ограничена 8-10 метрами, что достаточно только для небольших вычислительных кластеров, в то время как для АОК Infiniband DDR (4x10 Гбит/с) максимальная длина составляет до 150 метров. АОК является устройством, имеющим традиционные электрические интерфейсы на своих концах, которое обеспечивает передачу данных по оптическому волокну путем преобразования электрических сигналов в оптические. АОК были впервые использованы в суперкомпьютерах и датацентрах (Intel совместно с Luxtera, стандарт Infiniband) и до настоящего времени данное применение преобладает.

В настоящее время в качестве оптических межсоединений на короткие дистанции (до 100 м) в основном используются активные оптические кабели на основе вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ, VCSEL) спектрального диапазона 840-860 нм и соответствующих р-і-n фотодиодов (ФД) на основе арсенида галлия (GaAs), способных передавать данные со скоростью до 10-14 Гбит/с на канал [2]. В рамках этого подхода увеличение скорости передачи информации на канал достигается за счет повышения полосы модуляции ВИЛ и р-і-n фотодиодов за счет применения специальных конструкций лазеров/фотодиодов, уменьшения размеров приборов и оптимизации схемы процессирования оптических компонент, создания соответствующих высокочастотных управляющих интегральных микросхем. Данного подхода придерживаются крупные производители АОК, такие как Finisar Corporation, Sumitomo, Avago Technologies. В качестве альтернативного подхода можно упомянуть гибридную интеграцию лазера с распределенной обратной связью (РОС-лазер) и монолитного многоканального оптоэлектронного чипа, сформированного в рамках кремний-германиевой технологии (SOI, CMOS). В таком чипе планарные волноводы и делители, фазовые модуляторы и фотодетекторы, а также управляющие микросхемы интегрированы в единую систему. Данный подход был разработан и реализован компанией Luxtera, которая впоследствии была приобретена компанией Molex.

Целью настоящей работы является разработка первого отечественного высокопроизводительного АОК для передачи данных на относительно небольшие расстояния (до 50 метров), на которые требуется передача данных в суперкомпьютерных системах, а также датацентрах. Он включает четыре линии передачи данных в обоих направлениях, обеспечивающие совокупную пропускную способность 56 Гбит/с. Каждая линия может передавать данные на скорости до 14 Гбит/с и работает на основе многомодового волокна на номинальной длине волны 850 нм. Электрический интерфейс использует пластинчатый разъем. В активном оптическом кабеле будет использована уникальная отечественная технология ВИЛ. Функциональная схема приемо-передающего модуля АОК представлена на Рисунке 1.

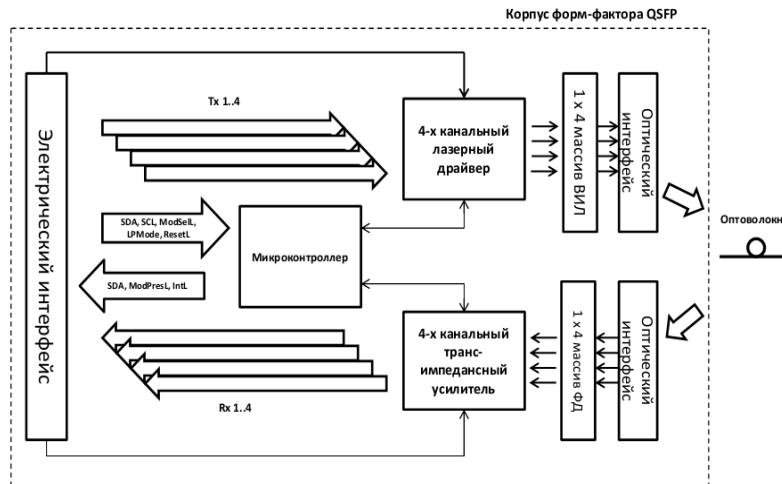


Рисунок 1. Функциональная схема прямо-передающего модуля 4-канального АОК.

Особенностью стандартного ВИЛ, работающего на принципах прямой токовой модуляции, является необходимость повышения плотности тока в четыре раза для уменьшения времени отклика и, соответственно, увеличения скорости передачи в два раза. При этом время жизни такого прибора радикально уменьшается [3]. В этой связи достижение скорости передачи ВИЛ в 14-25 Гбит/с при сохранении малого энергопотребления, длительного срока службы, и требуемого температурного диапазона работы (до 85°C) считалось до недавнего времени невыполнимой задачей.

Оригинальные сверхскоростные активные оптические компоненты (ВИЛ и ФД), разработанные авторами настоящей работы, не имеют на сегодняшний день аналогов в мире по своим техническим характеристикам. Во многом это связано с использованием в качестве активной области лазеров субмонослойных напряженных наногетероструктур и специфической конструкции микрорезонатора, которые обеспечивают высокое быстродействие даже при повышенных температурах (см. Рисунок 2). Следует отметить, что разработанные ВИЛ и ФД обеспечивают скорость передачи данных 25 Гбит/с в широком диапазоне температур от 25 до 85°C по оптической линии длиной более 100 метров [4].

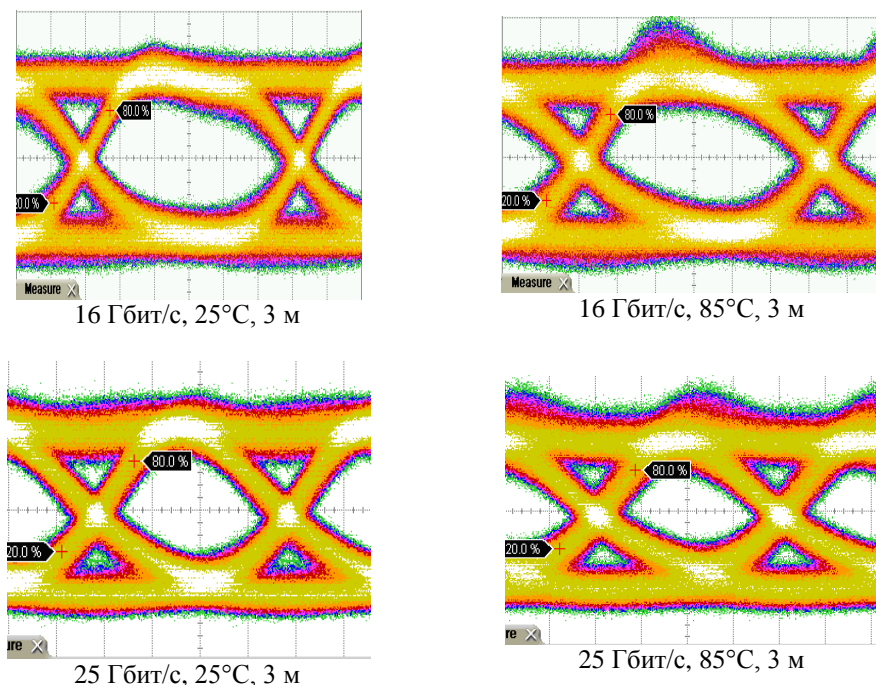


Рисунок 2. Глазковые диаграммы для разработанных ВИЛ.

Для определения надежности высокоскоростных ВИЛ были проведены испытания по ускоренному старению в условиях повышенных температур и тока накачки 5 мА, соответствующем скорости передачи данных 25 Гбит/с во всем рабочем диапазоне температур. Контакты к индивидуальным чипам ВИЛ формировались с помощью ультразвуковой микросварки проволочных выводов по методу шарик-клин (ball-wedge). С целью стабилизации параметров лазера и учета отказа приборов на начальном этапе службы (т.н. «детской смертности») в оценке ресурса лазеров было проведено кратковременные испытания (т.н. прожигание) при повышенных токах и температуре. ВИЛ типично работают в режиме автоматической стабилизации по току, поэтому в качестве контролируемого параметра в рамках настоящего исследования была выбрана величина оптической мощности в рабочей точке в зависимости от времени. Критерием деградации ВИЛ обычно является изменение контрольного параметра более чем на 2дБ. На Рисунке 3 представлены результаты испытаний при температуре 95°C для группы из 50 лазеров. После 6000 часов испытаний внезапной деградации выявлено не было. Изменение в величине оптической мощности в рабочей точке ВИЛ относительно момента начала испытаний не превысило 5% [5]. Данный результат имеет мировой приоритет на текущий момент.

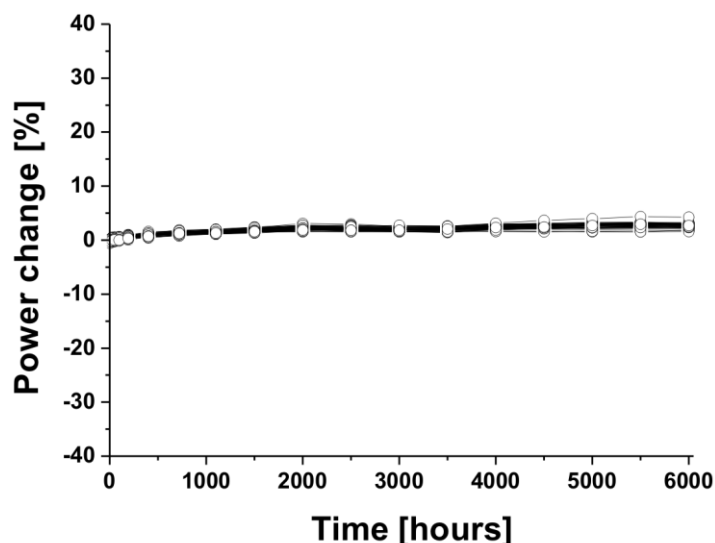


Рисунок 3. Изменение оптической мощности в рабочей точке (5 мА) и порогового тока для ВИЛ с диаметром токовой апертуры 6 мкм в ходе ресурсных испытаний при температуре 95°C.

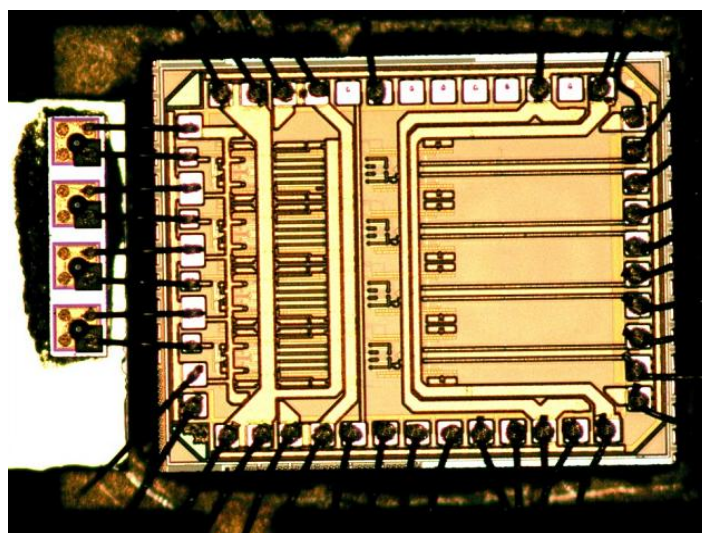


Рисунок 4. Фотография 4-х канального лазерного драйвера компании Gigortix (справа) и 4-х канального линейного массива ВИЛ компании ООО «Коннектор Оптикс» (слева), смонтированные и распаянные на тестовую плату.

С использованием разработанных ВИЛ и ФД, а также ИС и тестовых плат производства компании Gigortix, была собрана 4-канальная тестовая линия, демонстрирующая работу выбранных для реализации АОК компонентов. На Рисунке 4 представлена фотография 4-канального лазерного драйвера компании Gigortix и 4-канального линейного массива ВИЛ компании ООО «Коннектор Оптикс», смонтированные и распаянные на тестовую плату. Фотография 4-канального трансимпедансного усилителя и 4-канального линейного массива ФД выглядит аналогично.

Исследования глазковых диаграмм проводились в режиме прямой токовой модуляции по амплитудному формату без возвращения к нулю (non-return to zero, NRZ) с использованием псевдослучайной последовательности битов (pseudorandom binary sequence, PRBS) длиной (2^7-1) . Использовалось многомодовое оптическое волокно OM4 длиной 50 метров. На Рисунке 5 представлена глазковая диаграмма 1 канала собранной оптической линии связи на скорости передачи данных 12.5 Гбит/с. Полученные результаты свидетельствуют о низком фазовом дрожании цифрового сигнала (jitter < 3 пс), низком уровне шумов (соотношение сигнал/шум > 12), высокой степени открытия глаза (margin ~ 30%) и безошибочной передаче данных (BER < 10^{-12}).

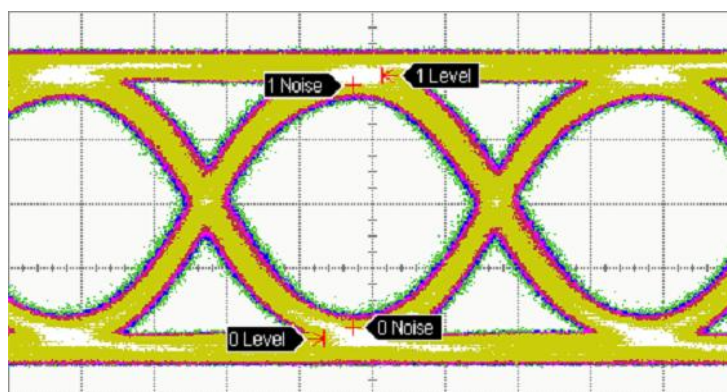


Рисунок 5. Глазковая диаграмма 1 канала собранной оптической линии связи на скорости передачи данных 12.5 Гбит/с.

На основании полученных результатов можно с уверенностью утверждать, что АОК со скоростью передачи данных 14 Гбит/с на 1 канал и общей производительностью 56 Гбит/с будет успешно создан командой разработчиков в самое ближайшее время. В дальнейшем существующий уровень технологии ВИЛ и ФД, а также задел, полученный при работе над АОК со скоростью передачи данных 14 Гбит/с на 1 канал, позволит разработать АОК со скоростью передачи данных 25 Гбит/с на 1 канал и общей производительностью 100 Гбит/с, который будет использован при построении эксафлопсных систем.

Литература

1. www.theregister.co.uk/2011/06/21/intel_exascale_implications
2. R. King, S. Intemann, S. Wabra, Proc. SPIE 8276, 82760G (2012).
3. B.M. Hawkins, R.A.Hawthorne, J.K. Guenter, J.A. Tatum, J.R. Biard, Proceedings. 52nd Conference on Electronic Components and Technology, San Diego, CA, USA, May 2002, pp. 540 – 550 (2002).
4. S.A.Blokhin, J.A.Lott, N.N.Ledentsov, L.Ya.Karachinsky, A.G.Kuzmenkov, I.I.Novikov, N.A.Maleev, G.Fiol, and D. Bimberg, Proceedings of SPIE, Volume 8308, pp. 830819-1 – 830819-10 (2011).
5. L.Ya. Karachinsky, S.A. Blokhin, I.I. Novikov, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, M.A. Bobrov, J.A. Lott, N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, J.-R. Kropp, and D. Bimberg, Semicond. Sci. Technol. vol. 28(6), art. No 065010 (2013).