Новые форматы оптических модулей

Предисловие

Рост трафика приводит не только к увеличению скоростей передачи, но и повышает требования к плотности портов. Общая тенденция наглядно представлена в таблице 1. Самый многочисленный объем оборудования и оптических модулей, это уровень доступа и агрегации.

Таблица 1. Общие тенденции потребления трафика

Позиционирование оборудования	**2012-2015**	**2016-2018**	**2019-2020**
Уровень доступа	=100Мб	100 ~ 1000Мб	100 ~ 1000Мб
Уровень агрегации	1Гб	1 - 10Гб	10Гб
Уровень ядра	1 - 10Гб	10-40Гб	10-100Гб
Порт сервера	1-10Гб	10Гб	25Гб
Коммутация внутри ДЦ	40Гб	100Гб	100-400Гб
Коммутация между ДЦ	N x 10G	N x 100G	N x 600G

Ядро сети строят сразу с запасом, так что модернизация его происходит эпизодично и потому появление новинок высокоскоростных модулей отслеживают немногие. Но информация эта нужна и важна, поэтому мы решили собрать данные о новинках в одном месте.

Скорость передачи 1/10G

Развитие технологий для передачи 1G и 10G достигло своего максимума и единственное? что теперь меняется, это цена. Она с каждым годом падает, но, как правило, вместе с качеством модулей. По мере того, как новые заводы пытались занять свою нишу на рынке, оптимизация производства дешевых модулей прошла все этапы:

- Самый безобидный этап оптимизации производства – изготовление модулей из б/у-компонентов. В целом, кроме сокращения срока эксплуатации, это ничем не грозит. Средний RMA для таких модулей до 0.1%
- Следующая категория – изготовление новых модулей из отбракованных компонентов. Такие модули успешно эксплуатируются, если не проходится использовать оборудование в режимах, приближенных к максимальным. RMA для таких модулей до 0.3%
- Далее, "оптимизация" требует отказа от выходного тестирования и использования ручной сборки. Такой вариант влечет самое большое число рисков для конечного пользователя. Кроме выхода из строя самого модуля, не редки случаи повреждения также и порта коммутатора. Обычно, это происходит из-за плохого внутреннего монтажа, что может приводить к короткому замыканию. Средний RMA 0.5%.

Наиболее дешевые модули, которые массово хлынули на рынок, совмещают в себе "оптимизацию" цены 2 и 3 этапа. В начавшейся гонке демпинга цен, приняли участие и основные игроки рынка. К "оптимизации" производства, которую мы рассмотрели ранее, серьезные производители прибегать не стали, но качество используемых компонентов снизилось. Что, в целом, сказалось на запасе "прочности" для модулей.

Скорость передачи 2.5/5G

В период с 2020 по 2022 год планируется выход на массовый рынок коммутаторов с портами 2.5G. Самыми массовыми потребителями данного сегмента станут операторы мобильной связи, которым придётся обеспечивать работу 5G-сетей. За ними потянется корпоративный сектор с коммутаторами для ЛВС и подключениями Wi-Fi-устройств стандарта 802.11ax.

Использование клиентских портов 2.5G операторами фиксированной связи в ближайшие годы будет незначительным. Переход на них стоит ожидать по мере массового распространения видео в формате 8K и 16K. Оптические модули под данный сегмент выпускаются в форм-факторе SFP. К уже существующим модулям добавятся SFP с медными портами 2.5GBASE-T с дальностью передачи до 100м. Анонсирован выход и модулей 5G, но пока ни один производитель не анонсировал оптических модулей с данной скоростью.

Скорость передачи 16G – 32G

В данной нише используется форм-фактор SFP в модификациях SFP16 и SFP28. Конструктивно они почти не отличаются от модулей 10G. И, благодаря относительной простоте технологии, "старшие" модули активно будут вытеснять своих "младших" собратьев. Уже с 2020 года появятся коммутаторы для уровня распределения, имеющие нисходящие порты на 2.5G (клиентские) и восходящие на 25G (uplink).

Также, под уровень агрегации появятся коммутаторы с нисходящими 25G-портами и восходящими на 100G. Наиболее востребована данная ниша для корпоративного сектора, операторов ЦОД и контент-провайдеров. Это, в первую очередь, подключение серверов и систем хранения данных. Возможные варианты модулей сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Варианты модулей 16-28G

Тип модуля	Поддерживаемые стандарты	Скорость передачи, Гб	Дальность	Протоколы
SFP16	SR/LR/CWDM/DWDM	14,025	100м/10-40Км	FC 4/8/16x
SFP28 25G	DAC/AOC/SR	25,78	1-3м/1-100м / 100м	Gbe 10/25
SFP28 25G	LR/ER/WDM/ CWDM/DWDM	25,78	10-40Км	Gbe 10/25
SFP28 32G	DAC/SR	28,05	1-5м / 100м	CPRI 10 FC 32
SFP28 32G	LR / WDM	28,05	10Км	CPRI 10 FC 32

Скорость передачи 40G – 56G





Наращивать скорость передачи можно за счет увеличения частоты сигнала и способа модуляции. Современная элементная база позволяет обеспечить передачу в один поток не более 25 Гбит/с (при кодировке NRZ). Более высокие скорости уменьшают стабильность и резко увеличивают стоимость. Для решения данной проблемы было решено передавать одновременно нескольких каналов, что привело к появлению новых форм-факторов оптических модулей, таких как CFP и QSFP+ (Quad SFP+).

В настоящее время CFP 40G крайне непопулярен и практически не используется. Поэтому, рассуждая о 40G-модулях, мы будем иметь ввиду именно QSFP+. Такие модули используются в агрегации и ядре сети, для стекирования коммутаторов. Также, формат 40G популярен среди операторов ЦОД, использующих сервера с сетевыми картами 10G.

В зависимости от дальности, на которой должны работать модули, используют параллельную и частотную способы передачи.

Параллельная передача



Для передачи используют 4/8 пар волокон. Для этого применяются патчкорды MPO, которые могут иметь 8/12/24 волокон. При этом, для передачи 40/100G используется только 8, а для 400G – 16 волокон. Для совместимости оптические модули имеют MPO-разъемы формата MPO-12 или MPO-24 (рисунок 1). Схема распределения оптических волокон показана на рисунке 2.

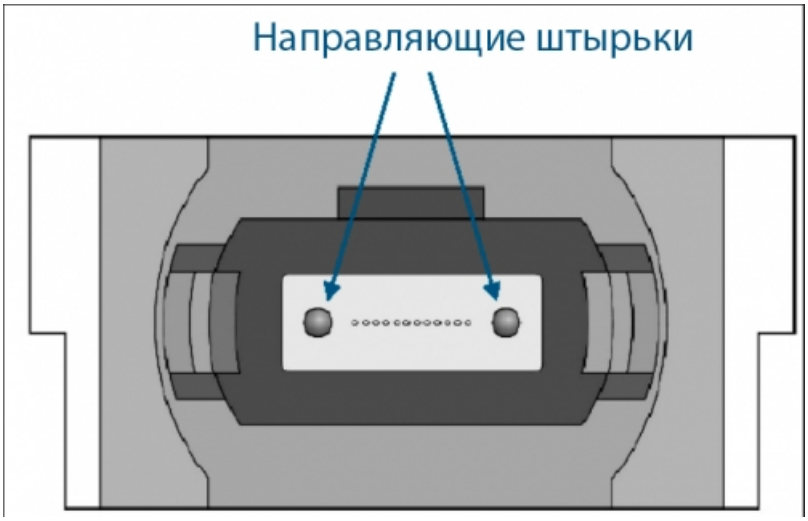


Рисунок 1. Разъем MPO оптического модуля 40/100G

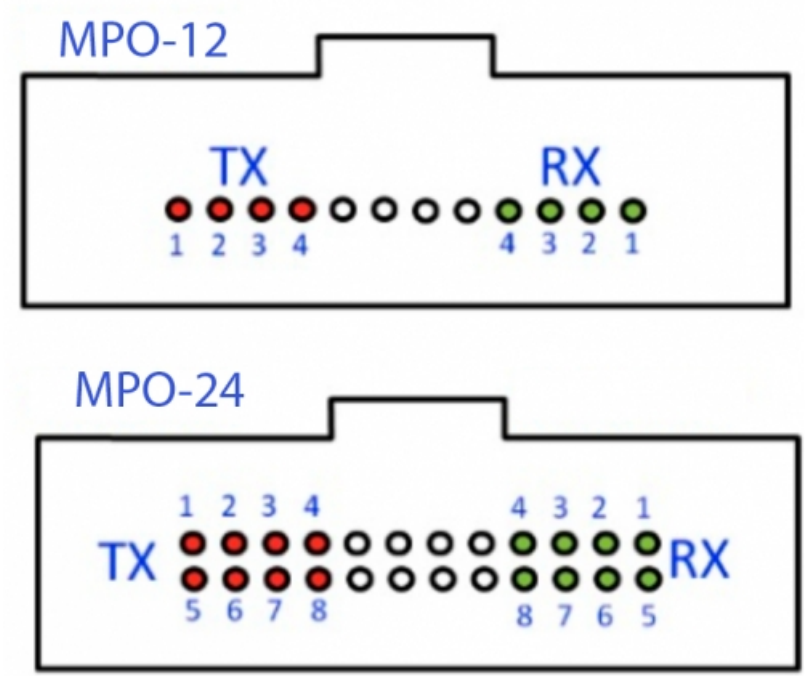
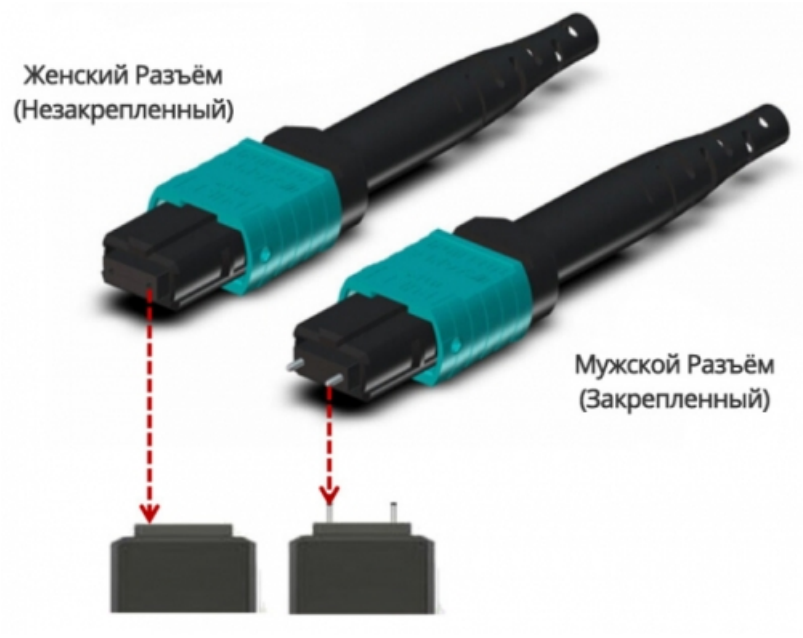
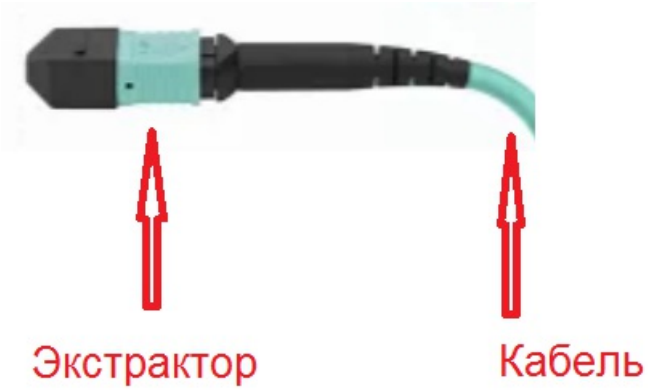


Рисунок 2. Схема распределения каналов для MPO

При выборе патчкорда следует учитывать, что он должен быть типа "мама". Для SR4 модулей используется мультимодовый, кроссовый, патчкорд с полировкой UPC. Визуально он должен иметь цвет экстрактора голубой (aqua) и цвет кабеля голубой (OM3) или фиолетовый (OM4).





Для PSM4-модулей используются одномодовые патчкорды с разъемами типа "мама" и полировкой APC. Визуально патчкорд должен иметь зеленый экстрактор и желтый кабель.

Частотная передача



Каналы передаются на разных длинах волн с использованием встроенного мультиплексора. Для передачи каналов используются длины волн 1270 - 1330 нм. Оптический модуль имеет разъем двойной LC. Для соединения используется одномодовый кабель. Возможные варианты модулей представлены таблице 3.

Таблица 3. Варианты модулей 40-56G

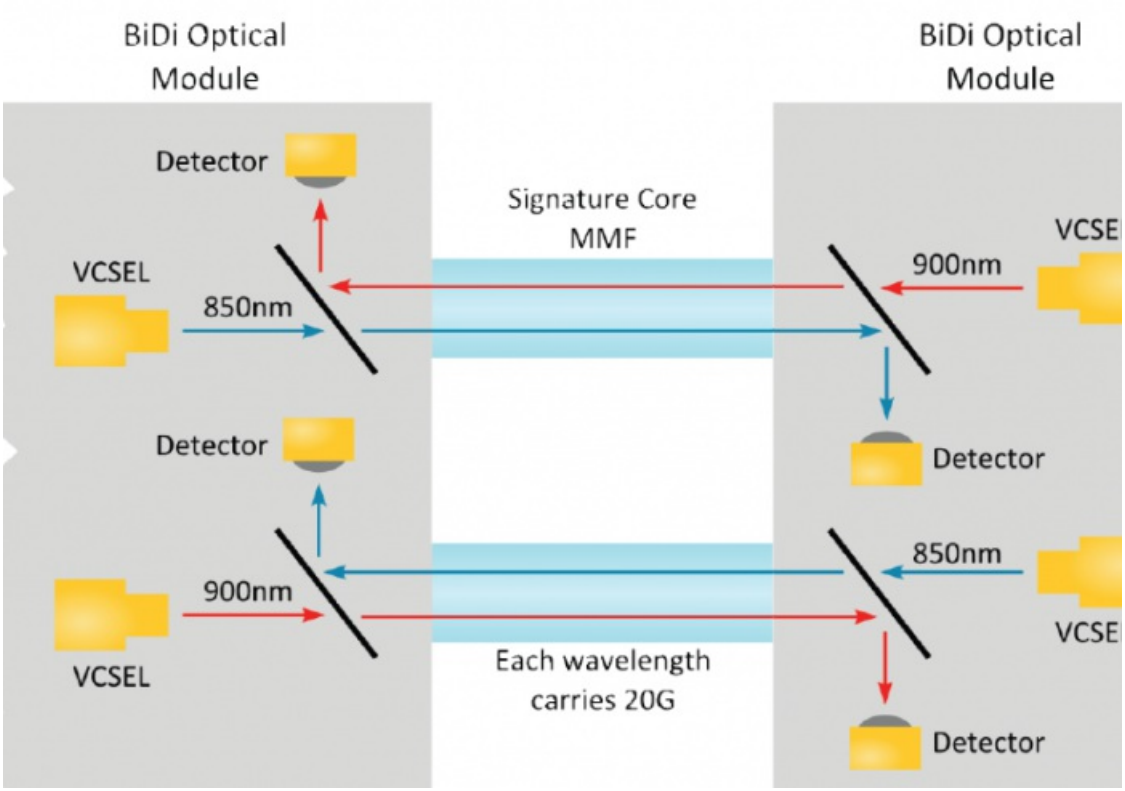
Тип модуля	Разъем	Тип волокна	Скорость передачи, Гб	Дальность	Протоколы
QSFP+ DAC	-	AWG	40G	1-5м	Gbe 4 x 10G /40G
QSFP+ AOC	-	MM (OM3)	40G 56G	1-100м	Gbe 4 x 10G /40G InfiniBand
QSFP+ SFP+ Конвертер	SFP+				GBe 10G
QSFP+ SR4	MPO/UPC	MM	40G	150м	Gbe 4 x 10G /40G
QSFP+ SR2	2xLC	MM	40G	100м	Gbe 40G
QSFP+ PSM4	MPO/APC	SM	40G	2/10Км	Gbe 4 x 10G /40G

QSFP+ LR4 / ER4	2xLC	SM	40G	10/20/40Км	Gbe 4 x 10G /40G
QSFP28 PAM4 50G	2xLC	SM	56G	10 - 40 Км	Gbe 50G

Среди 40G-модулей хочется обратить внимание на нижеследующие модели:

QSFP+ SR2

В предложениях поставщиков можно встретить название QSFP+ BiDi. В отличие от классического 40G-модуля, в данной модели передача происходит на скорости 20G. Для передачи используются длины волн 850/900 нм. В зависимости от производителя, длины волн могут изменяться в диапазоне от 800 до 920 нм. Структурная схема модуля представлена на рисунке ниже.



QSFP+ PSM4 (Parallel Single Mode 4)

Модуль, предназначен для разбиения 40G на 4 x 10G и передачи сигнала на расстояние до 10 км. Модуль использует четыре лазера, с длиной волны 1310 нм (+-50 нм), при этом имеет разъем MPO/APC. Данную сборку можно представить как четыре 10GBase-LR модуля в одном QSFP+ форм-факторе. Для разбиения на 10G используют одномодовый кабель MPO/APC - 8xLC.







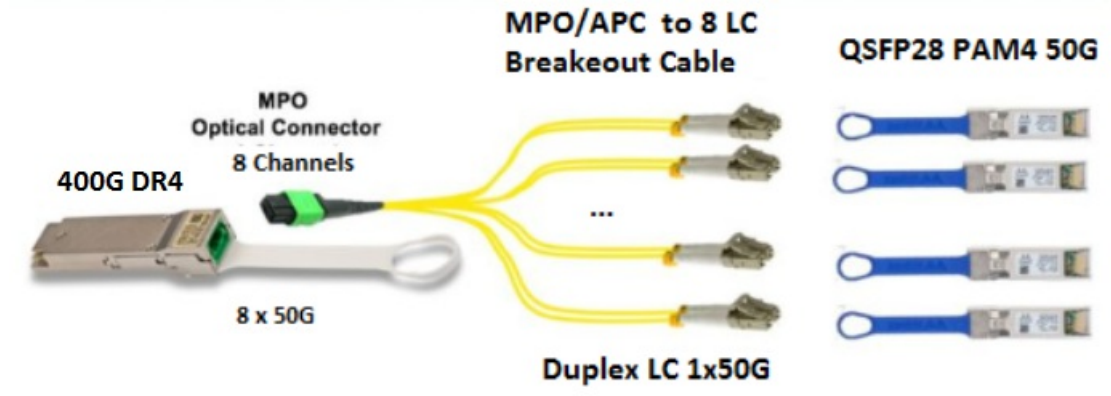
QSFP+ ER4

Модуль использует длины волн 1270-1330 нм. Передача 40G-канала с использованием данных модулей потребует наличие двух оптических волокон. В текущий момент использование таких модулей дороже, чем организация четырех каналов 10G, на базе CWDM в нижнем диапазоне. При этом, если использовать 10G SFP+ модули, то вам потребуется только одно волокно.

QSFP28 PAM4 50G

Модуль рассчитан для использования в ЦОД, совместно с 200/400G-модулями и решает задачи увеличения плотности портов. Для данных модулей используются две типовые схемы включения:

- Совместно с QSFP56-DD, для обеспечения передачи 50G Ethernet(IEEE P802.3cd) на расстояние до 10 км:



- Для соединения двух точек на расстояние до 40 км:



Скорость передачи 100G -112G

В этой категории используются модули с форм-факторами CFP(Centum Form Factor Pluggable) , CFP2, CFP4 и QSFP28. Существует еще проприетарный форм-фактор CPAK. На текущий момент модули с форм-фактором CPAK выпускаются исключительно под Cisco. Кроме размеров, он ничем не отличается от остальных, так что отдельно его рассматривать мы не будем. Какой именно 100G-модуль имеет смысл использовать, зависит от решаемой задачи. Для локальных линков – агрегация сети, ядро сети, внутренние линки в ЦОД – используют QSFP28-модули. Для WAN-линков применяются когерентные модули с форм-факторами CFP и CFP2.

Вообще, с появлением 100G многие столкнулись с ранее неизвестными для себя понятиями, такими как: Cogerent, OTU, CWDM4, DR, FR, PAM4 и прочими. Рассмотрим каждое понятие в отдельности.

Cogerent (Когерентный)

Говоря простым языком, не вдаваясь в глубины физики, когерентный лазер - это лазер, позволяющий передать несколько волн одновременно (синхронно). Что позволяет передать несколько каналов 32G (25G информации и FEC), используя всего одну длину волны. Так, например, самая простая модуляция QPSK позволяет передать четыре канала на одной длине волны. Что делает возможным использовать когерентные транспондеры для систем DWDM. Используя более сложную модуляцию (QAM 8/16), можно повысить скорость передачи до 200G и выше. Для того, чтобы обработать модулированный сигнал, используется DSP (Digital Signal Processor - цифровой процессор обработки сигналов). Кроме прочего, DSP предоставляет два неоспоримых преимущества:

- Позволяет математическим способом компенсировать хроматическую дисперсию (CMD) и поляризационную дисперсию (PMD). Благодаря чему, можно не использовать внешние компенсаторы дисперсии, что существенно экономит OSNR и увеличивает дальность передачи, без необходимости в регенерации сигнала.
- Обеспечивает передаваемый сигнал механизмом коррекции ошибок (FEC). В зависимости от версии DSP, версии FEC могут изменяться. Все современные системы применяют версию SD-FEC.

DSP-модуль может устанавливаться в самом оптическом модуле (в этом случае модуль называется DCO), либо на коммутаторе (в этом случае модуль называется ACO). В настоящее время оптические модули DCO доступны в форм-факторах CFP/CFP2, ACO в форм-факторе CFP4 (CFP и CFP2 сейчас мало распространены. В основном, выпускаются Finisar).

OTU

Специально под нужды магистральных операторов был разработан стандарт ITU G.709, также известный, как OTN (Optical Transport Network - оптическая транспортная сеть). Это механизм протоколонезависимого транспорта. В котором вся информация передается в рамках контейнеров, имеющих разную скорость и упаковывающихся один в другой по принципу матрешки. Так, четыре самых маленьких контейнера OTU1 (2.5G) помещается в один OTU2 (10G). Четыре OTU2 помещаются в один OTU3, и т.д.

Кроме скорости самого потока добавляется служебная информацию и данные FEC.

Приблизительное отличие реальной скорости от OTU составляет 11%. Таким образом, скорость для оптического модуля OTU2=11,09 Гбит/с, OTU4=112 Гбит/с. Это важно понимать, когда вы подключаете свое оборудование к магистральному. Например, при соединении маршрутизатора с макспондером. Для данных соединений требуются оптические модули поддерживающие OTU4.

CWDM4

В описании модулей 100G можно встретить указание CWDM4 или WDM4. Это не значит, что модуль рассчитан для работы в сетях CWDM. В таких модулях используются лазеры CWDM и встроенный

CWDM-мультиплексор. Это позволяет использовать более распространенные, и потому более дешевые, лазеры. Следует помнить, что между собой модули разных типов не работают. Т.е. вы не сможете соединить QSFP28-LR4-10 и QSFP28-CWDM4-10 между собой.

Модули 100G используются разные несущие длины волны:

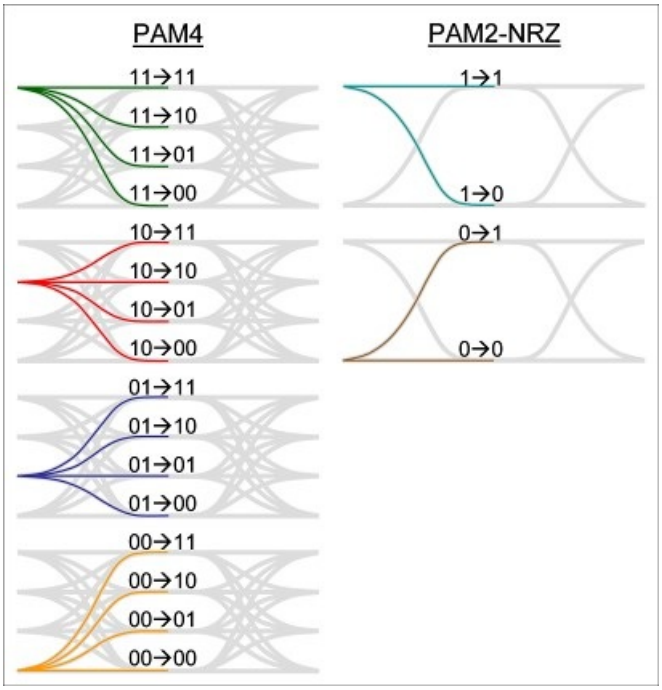
- LR4: 1295.56/1300.05/1304.58/1309.14 нм
- CWDM4(WDM4): 1270/1290/1310/1330 нм

PAM4

Если в названии или описании модуля вы встречаете PAM (PAM4), это означает, что модуль использует модуляцию PAM вместо NRZ. Суть заключается в уменьшении амплитуды в 2 раза, что в результате дает в 4 раза больше вариантов. Различие в кодировке наглядно видно на рисунке ниже. Для тех, кто не знаком с кодировками, дадим небольшое описание. Передача состояния определяется не наличием уровня (0 или 1), а переходом из одного состояния в другое. Так переход от 0 к 0, 0 к 1 обеспечивает передачу двух бит информации, а не одного, в случае простого измерения текущего уровня. В PAM за 0 берется середина амплитуды. В результате, имеем состояния 1; +⅓; -⅓; -1. Это дает нам 4 состояния и возможность контролировать переход из каждого в каждый. По совокупности мы увеличиваем объем передаваемой информации в 4 раза, по сравнению с кодировкой NRZ. Модуляцию PAM4 применяют как для электрического интерфейса, так и для оптической передачи. При этом, если для электрического интерфейса это почти не оказывает негативных эффектов, то для оптической передачи возникают существенные ограничения. Главные из которых:

- оптический бюджет модуля;
- низкий уровень OSNR, из-за уменьшения шага между состояниями сигнала;
- низкая устойчивость к дисперсии.

Для снижения влияния перечисленных проблем, PAM-модули используются совместно со встроенным FEC, что отрицательно сказывается на стоимости.



PSM4

Параллельная передача четырех каналов на длине волны 1310 нм, аналогично модели 40G.

DR

Данный стандарт пришел на смену 100G PSM4 и относится к третьему поколению. Благодаря использованию PAM4-модуляции, модули обеспечивают передачу 50G или 100G по одной длине волны. Стандарт передачи 100GBASE-DR обеспечивает дальность работы до 500 м. Модули рассчитаны на работу с одномодовым волокном, на длине волны 1310 нм. При этом передача четырех 100G происходит параллельно.

FR

Модули FR предназначены для работы на расстояние до 2 км. При передаче используется PAM4-модуляция, за счет чего 50G передается всего по одной длине волны. Для передачи используются CWDM-лазеры из диапазона 1270-1330 нм.

SR2

В отличии от 40G-модулей для 100G SR2 предполагает использование четырех ОВ. По каждой паре волокон происходит передача 50G с длиной волны 1310 нм, с использованием PAM-модуляции. Основная цель данного решения - использовать существующую кабельную инфраструктуру в ЦОД.

Полный список возможных вариантов 100G-модулей представлен в таблице 4.

Таблица 4. Варианты модулей 100-112G

Тип модуля	**Разъем**	**Тип волокна**	**Скорость передачи, Гб**	**Дальность**	**Протоколы**
CFP/CFP2/CFP4 **DAC**	-	AWG	100G	1-3м	Gbe 100G 4 x 25G
CFP/CFP2 -> QSFP28 **Конвертер**	QSFP28	-	-	-	Gbe 4x25,100G OTU4
CFP **SR10**	MPO24/UPC	MM(OM3/ OM4)	100/112G	150м	Gbe 10,100G OTU4
CFP/CFP2/CFP4/QSFP28 **SR4/XSR4**	MPO/UPC	MM(OM3/OM4)	100/112G	100/300м	Gbe 100G OTU4
CFP/CFP2/CFP4/QSFP28 **LR4 / ER4 light/ER4**	2xLC	SM	100G/112G	10/25/40Км	Gbe 4x25,100G OTU4
CFP/CFP2 **DCO**	2xLC	SM	112G	80/600/1000Km*	OTU4
CFP4 **ACO**	2xLC	SM	112G	80/600/1000Km*	OTU4
QSFP28 **PSM4**	MPO/APC	SM	100G	500м	Gbe 4 x 25, 100G
QSFP28 **PAM4**	2xLC	SM	112G	80Km**	Gbe 100G OTU4
QSFP28 **DR**	2xLC	SM	112G	500м	Gbe 100G
QSFP28 **FR**	2xLC	SM	112G	2Км	Gbe 100G
QSFP28 **SR2**	2xCS	MM	100G	100м	Gbe 100G

*При использовании совместно с EDFA

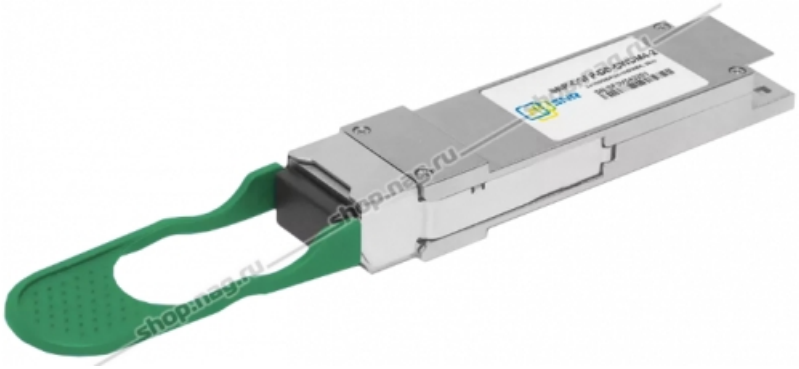
**При использовании совместно с EDFA и DCM.

Скорость передачи 200G – 400G

Ключевыми факторами для достижения подобных скоростей стало использование PAM4-модуляции и увеличение количества каналов с четырех до восьми.

Модули выпускаются в форм-факторах QSFP-DD и OSFP. Поскольку ранее таких форм-факторов не встречалось, остановимся на них более подробно.

QSFP-DD



Внешне модуль сопоставим с привычным QSFP28. Для обеспечения возможности работы с восемью каналами, контактная площадка стала длиннее и получила второй ряд контактов (показано на рисунке 3). Именно благодаря этому, модуль получил название DD (Double Density). Особенность подобного решения – в сохранении обратной совместимости. Так, в порт коммутатора QSFP-DD можно устанавливать обычные QSFP28. Наличие восьми потоков позволяет обеспечивать передачу в самых разных комбинациях: 8x25Gbe, 8x50Gbe, 4 x 100Gbe, 2 x 200Gbe, 1x400Gbe.



Рисунок 3. Форм-фактор QSFP-DD

Структурная схема устройства модуля, представлена на рисунке 4.

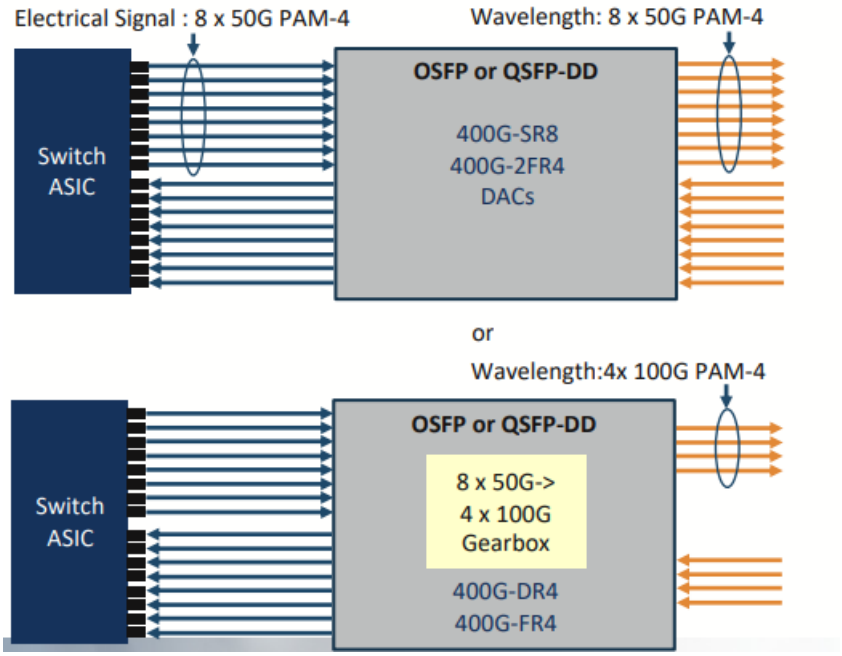
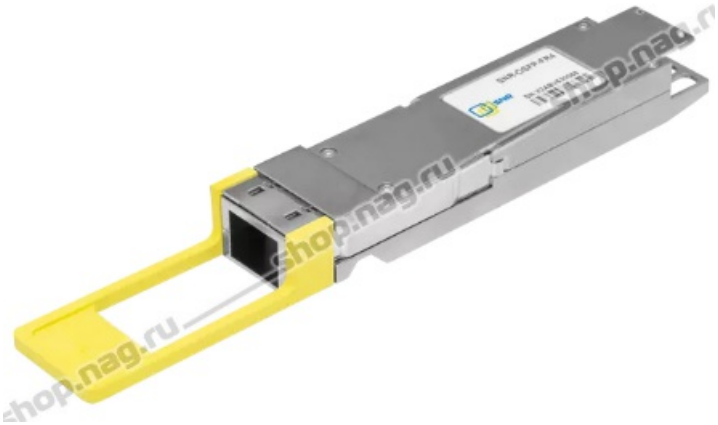


Рисунок 4. Структурная схема устройства модуля

Как видим, модуль принимает 8 потоков 25/50G с электрического порта. В случае необходимости выполняет преобразование для нужной скорости при помощи Gearbox. Далее происходит передача на оптический блок, который отличается в зависимости от задач.

OSFP(Octal Small Form factor Pluggable)



Модули OSFP чуть больше по размерам QSFP. Это позволяет улучшить охлаждение и повысить допустимое потребление до 15 Вт (для QSFP-DD допустимое потребление 12 Вт). Для нужд интерконнект и METRO-соединений QSFP-DD более привлекателен. За счет своей компактности и обратной совместимости с QSFP. В связи с чем, OSFP-модули широкого распространения не получат. OSFP будет набирать популярность по мере появления DCO-модулей в этом формате.

В краткосрочной перспективе (2020-2021 годы) основное развитие направления 200/400G – это interconnect (соединение двух устройств на небольшом расстоянии). При этом, важно не столько соединять два устройства на такой скорости, сколько повысить плотность портов для нужд ЦОД. Именно этим обуславливается появление таких форматов как FR и DR, обеспечивающих передачу на короткие расстояния. Поскольку в качестве конечных устройств могут выступать коммутаторы или серверы, то применяются скорости передачи: 2x100G, 4x100G, 8x25G, 8x50G. Полный список доступных сейчас вариантов приведен в таблице 5.

Таблица 5. Оптические модули 200/400G

Тип модуля	**Разъем**	**Тип волокна**	**Скорость передачи, Гб**	**Дальность**	**Протоколы**
QSFP-DD/OSFP **CR8**	-	AWG	8 x 50G	1-3м	Gbe 8 x 50, 4x100, 400G
QSFP-DD/OSFP **AOC**	-	MM	8 x 50G	1-30м	Gbe 8 x 50G, 4x 100, 400G
QSFP-DD / OSFP **DR4**	MPO/APC	SM	4 x 100G	500м	Gbe 4x100G
QSFP-DD / OSFP **FR4**	2xLC	SM	4 x 100G	2Км	Gbe 4x100, 400G
QSFP-DD/OSFP **SR8**	MPO24	MM(OM4)	8 x 50G	100м	Gbe 8 x 50, 4x100, 400G
QSFP-DD **2FR4**	2 x CS	SM	2x4x50G 2 x 4 x 25G	2Км	Gbe 8 x 50G, 2 x 200, 4 x 100, 400G

ассмотрим назначение каждого из стандартов:

CR8 - модули соединенные медным кабелем. Для 10/25G подобные модули назывались DAC. Основное назначение стекирование оборудование в рамках одной стойки.

DR4 - пришел на смену PSM4, предназначен для подключения оборудования 100G к портам 400G.

FR4 - соединение оборудование на коротких дистанциях на скорости 400G по SM кабелю.

SR8 - соединение оборудование на коротких дистанциях на скорости 400G по MM, а также подключение оборудование со скоростями 50G с использование Break-out-кабеля.

2FR4 - данные модули используют для передачи четыре SM-волокна. Передача ведется на длинах волн 1270-1330 нм.

Пример подобного модуля приведен на рисунке ниже.



Обратите внимание, что для подключения используется новый тип коннектора – CS. Данные коннекторы разработаны компанией Senko и предназначены для повышения плотности портов. Как видно из представленного ниже рисунка, разъем стал не только уже, но и ниже. За счет этого стандартный QSFP форм-фактор обеспечивает подключение четырех волокон. В свою очередь, это позволяет передавать не 8 длин волн за раз, а два раза по 4. Использование четырехканального мультиплексора дает меньше оптическое затухание, что, в свою очередь, позволяет снизить требования к оптическим компонентам. Это не только делает оптические модули более дешевыми, но и снижает тепло, выделяемое модулями, что важно в условиях высокой плотности портов.

[Новые форматы оптических модулей]

Варианты подключения низкоскоростных модулей к более скоростным

MPO - 4xLC, кабель MM, дальности передачи до 150 м

[Новые форматы оптических модулей]

Для подключения используется breakout-кабель. С одной стороны MPO12/UPC, с другой – 4 кабеля duplex LC. Данная схема включения очень популярна среди операторов ЦОД, а также совместно с DWDM-макспондерами, которые имеют клиентские порты QSFP+/QSFP28.

MPO - 4xLC, кабель SM, дальность передачи до 10 км

[Новые форматы оптических модулей]

Такая схема очень популярна у магистральных операторов, совместно с DWDM-макспондерами. Также, данная схема подходит для использования с QSFP-DD DR4-модулями, для передачи 4 x 100G.

CS - 2xLC, кабель SM, дальность передачи до 10 км.

[Новые форматы оптических модулей]

[Новые форматы оптических модулей]

[Новые форматы оптических модулей]

Схема используется операторами ЦОД для увеличения плотности портов.