Кратко о п/п лазерах

Семинар "E^3"

С 24 по 28 Остября 2011 года в Екатеринбурге пройдет второй технический семинар, проводимый компанией "НАГ". В этот раз календарь семинара выглядит так:

- **24-25 Октября - Ericsson Smartedge (BRAS (PPA), IPv6, Carrier Grade NAT);**
- **26 Октября - Ekinops (DWDM решения);**
- **27-28 Октября - Extreme Netwrorks (Ethernet Switching, коммутаторы Extreme Summit).**

Семинар не является маркетинговым мероприятием и предназначен, в первую очередь, для технических специалистов. Для проведения семинара приглашены представители вендоров. Уже традиционно, на семинаре будет присутствовать реальное оборудование и созданы все условия для "погружения" в него.
Заявки прошу направлять по адресу dmitry@nag.ru.

Введение

Мог ли кто-нибудь десяток лет назад предположить, что оптоволоконные кабели станут дешевле "медных"? Да еще в два-три раза? А между тем это объективная реальность сегодняшнего дня. Так или иначе, но сети постепенно "перебираются" на стекло. Операторы уже потенциально близки к полному отказу от электрической разводки, оптика до квартиры рано или поздно станет неизбежной реальностью. Совсем не потому, что придет PON. При сохранении текущего тренда витая пара подорожает раза в два, волокно и трансиверы подешевеют похожим образом, и... неожиданно окажется проще работать со "стеклом", тем более, у него кроме известных недостатков есть еще и целый ряд не менее важных преимуществ.

Но кроме самих кабелей для оптоволокна нужны трансиверы, собственно, о них и речь. Вряд ли кто-то всерьез задумывается над их внутренним устройством и принципом работы. Удастся правильно назвать, и то хорошо. Только список займет почти строчку: GBIC, SFP (mini GBIC), XENPAK, X2, XFP, SFP+, CSFP, QSFP... И это не считая зверинца допотопных времен, когда каждый производитель ставил свое, оригинальное, и непременно самое лучшее. Так что трансиверам реально повезло со стандартизацией, поэтому список короткий, а совместимость "друг с другом" почти полная.

Об этих сборках, их качестве, а также особенностях самих оптических модулей SFP/XFP и т.д. писал в прошлых обзорах. Здесь, здесь и здесь. Остался последний уровень, который ближе к гетеропереходу пары полупроводников, и прочим изобретениям науки, которые в России больше известны в связи с работой Нобелевского лауреата товарища Алферова. Конечно, упрощенно, без теории квантовых точек, сложностей создания глубокого вакуума, а также разных способов эпитаксии. Понимаю, что это занудно и скучно, а также бесконечно далеко от привычного любому монтажнику "всовывания пальцев" в коммутаторы на чердаках. Но без данной части картина будет неполной.

Передатчики

Собственно, что где-то в SFP находится "лазер" знают все. Но, даже разобрав модуль "до резисторов", найти его не слишком просто. Поэтому возьмем самый простой и дешевый SFP модуль SNR-SFP-LX, вскроем его, выкусим оптические сборки TOSA (передатчик) и ROSA (приемник) и разломаем на кусочки подручными макроинструментами (молотком и плоскогубцами).

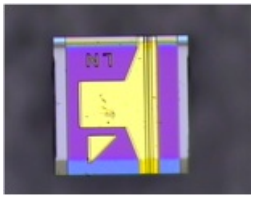
"Тот самый лазер" по размерам много меньше спичечной головки. Даже увеличение фотоаппарата не дает качественного изображения. Но не покупать же, в самом деле, ради этой статьи микроскоп.

При всем разнообразии типов, все полупроводниковые лазеры можно грубо разделить на две группы: с прямой (внутренней) и внешней модуляцией. Причем последние в практике встречаются достаточно редко, но об этом ниже. В цифровых системах связи (к которым "по случайности" относится Ethernet) на основе передатчиков с прямой модуляцией используется простейший оптический формат передачи данных, при котором логическому нулю соответствует выключенное состояние лазера, а логической единице – включенное.

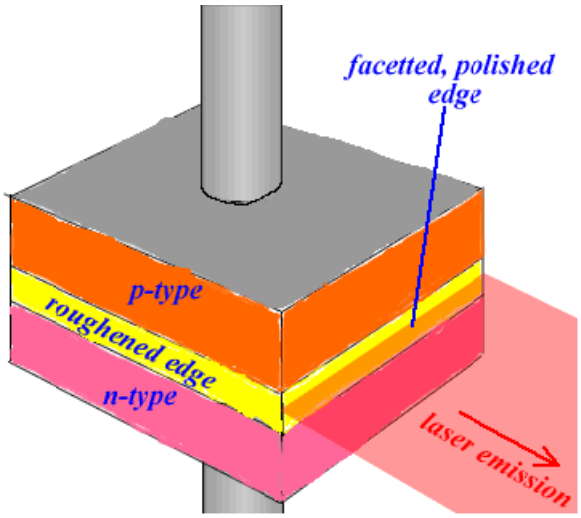
Существуют три основных типа, использующих прямую модуляцию: лазеры Фабри-Перо (Fabry-Perot, FP), вертикально-излучающие лазеры (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSEL) и лазеры с распределенной обратной связью (Distributed Feedback, DFB).

Французские физики Фабри и Перро давно умерли от старости, а свой одноименный интерферометр предложили еще в 1899 году. Применение их принципа в качестве резонатора для лазеров началось с 1958 года, и патентными троллями использовано быть не может. Так что FP-лазеры самые простые по технологии, дешевые, и на их базе сделаны все имеющиеся на рынке одномодовые модули с дальностью до 20 километров.

Если все же взять микроскоп с большим увеличением, то видно FP-чип, в котором происходит образование лазерного излучения:

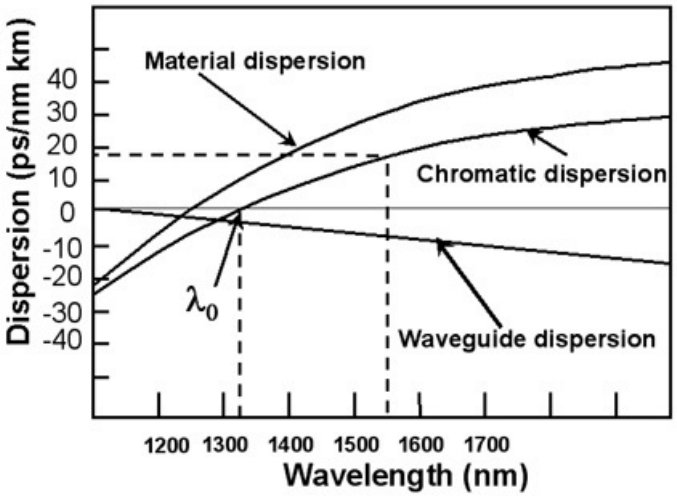


Если говорить о конструкции, то в диапазоне 1310 нм FP-лазеры изготавливают на подложке из фосфида индия (InP) с активными слоями из InGaAsP. Резонатор в таком лазере образуется торцевыми поверхностями, окружающими с обеих сторон гетерогенный переход. Одна из поверхностей отражает свет с коэффициентом отражения, близким к 100%, другая является полупрозрачной, обеспечивая, таким образом, выход излучения наружу.



Структура FP-лазера

Ширина спектра FP-лазеров составляет около 3 нм. Несмотря на приставку нано-, реально это очень широкий диапазон. Поэтому FP-лазеры нельзя использовать на большие расстояния (обычно до 20-30 км на несущей 1310 нм), так как хроматическая дисперсия будет ограничивать дальность распространения. Из приведенной ниже диаграммы видно, что хроматическая дисперсия в популярном стандарте оптического волокна (G.652) растет пропорционально длине волны. Это основная причина, по которой на несущей 1550 нм ранее не делали FP-лазеры.



Ситуация кардинально поменялась после массового распространения одноволоконных систем, в которых используется пара 1310/1550. В 20-ти километровых моделях все очевидно, там применяют "дешевый" FP-лазер на 1310 и "дорогой" на DFB-лазер на 1550 (подробно описан ниже). Но уже для 3-х километровых линий хроматическая дисперсия не является ограничивающим фактором, и... в ход идут "нетрадиционные", но заметно более дешевые FP-лазеры на 1550 нм.

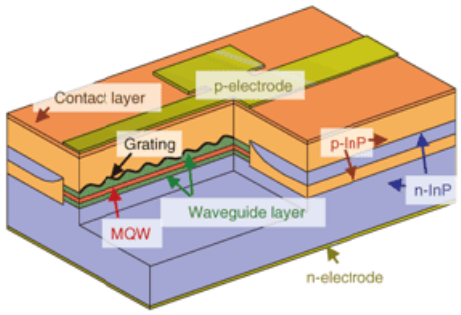
Отдельный вопрос, что используют китайские фабриканты в популярных 10-ти километровых bidi SFP. Особого экономического смысла изготавливать такие элементы нет вообще, не зря 3-х километровые bidi SFP на 1310 стоят ровно столько же, сколько 20-ти километровые. Причем

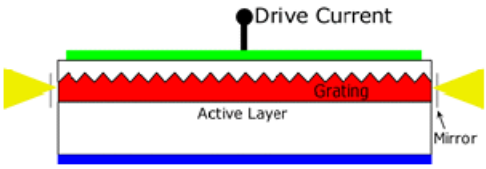
производство лазеров (именно полупроводниковых элементов) мало отличается по своей сути от микросхем. Это огромная, чрезвычайно высокопроизводительная фабрика, которая обеспечивает множество изготовителей BOSA. Поэтому возможны два варианта: отбраковка 20-ти километровок DFB (это грозит ускоренной деградацией) или установка 3-х километровых FP, что, естественно, далеко не гарантирует работу на все 10 километров.

На сегодняшний день применение FP чипов для 1,25 G модулей выглядит следующим образом:

Data Rate	Wavelength	Source	Distance, km
1.25G;MM	1310nm	FP	0.55
1.25G;SM	1310nm	FP	3
1.25G;SM	1550nm	FP	3
1.25G;SM	1490nm	DFB	20
1.25G;SM	1310nm	FP	20
1.25G;SM	1550nm	DFB	20

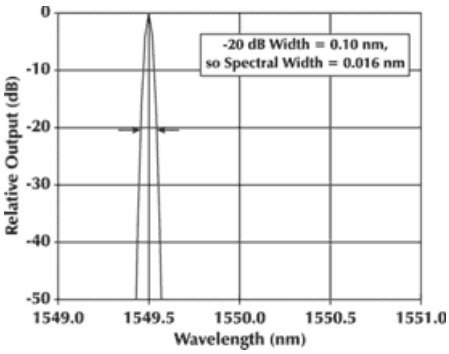
Для длины волны 1550 нм на расстояниях более 3 км и скорости передачи данных 1,25 G применяют уже DFB-лазеры, которые получены путем добавления решетки Брэгга в структуру полупроводника.





Структура DFB-лазера

Это позволило уменьшить ширину спектра до 0,1 нм (и вплоть до 0.0001 нм для специальных лазеров) и не слишком задумываться о хроматической дисперсии на расстояниях до 200 километров.



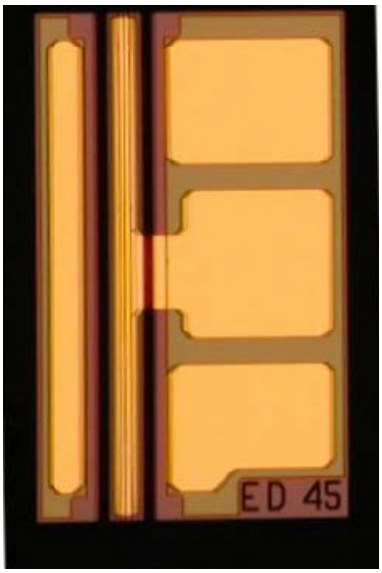
Кроме того, у DFB есть дополнительные преимущества, а именно уменьшение зависимости длины волны лазера от тока инжекции и температуры, высокая стабильность одномодовости и практически 100-процентная глубина модуляции. Температурный коэффициент $\Delta\lambda/\Delta T$ для FP-лазера порядка 0,5-1 нм/°C, в то время как для DFB-лазера порядка 0,07-0,09 нм/°C.

Как пример трансивера на базе DFB лазера возьмем WDM-SFP с длиной волны 1550 нм и дальностью передачи до 20 км - SNR-SFP-W53-20. Так как модуль является bidi (bidirectional), то вместо TOSA+ROSA мы видим одну оптическую сборку под названием BOSA.

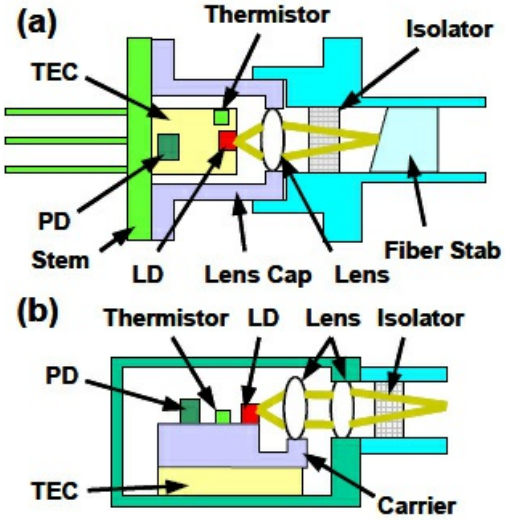
Приемная часть (слева), передающая (справа):

Вскрываем передающую часть и пытаемся найти DFB чип:

Без микроскопа снова тяжело детально рассмотреть этот миниатюрный полупроводник. Если взять цифровой микроскоп с большим увеличением, то можно видеть следующую картину:

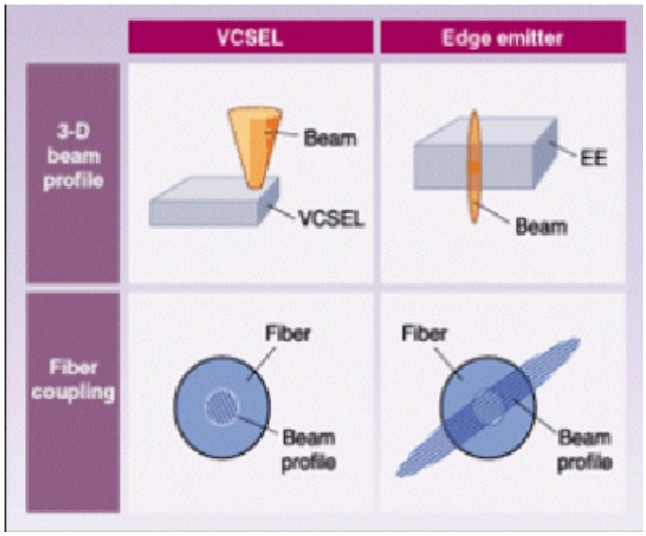


К сожалению, понять по фотографиям устройство TOSA почти невозможно. Поэтому придется привести соответствующую схему. Тут LD - собственно сам лазерный диод, TEC - Thermoelectric Cooler, термоэлектрическая подложка для эффективного охлаждения. PD - фотодиод для мониторинга выходного излучения, должен быть обязательно, если поддерживается DDMI. Thermistor - термистор, для получения значения температуры. Подробнее эту тему можно изучить тут.



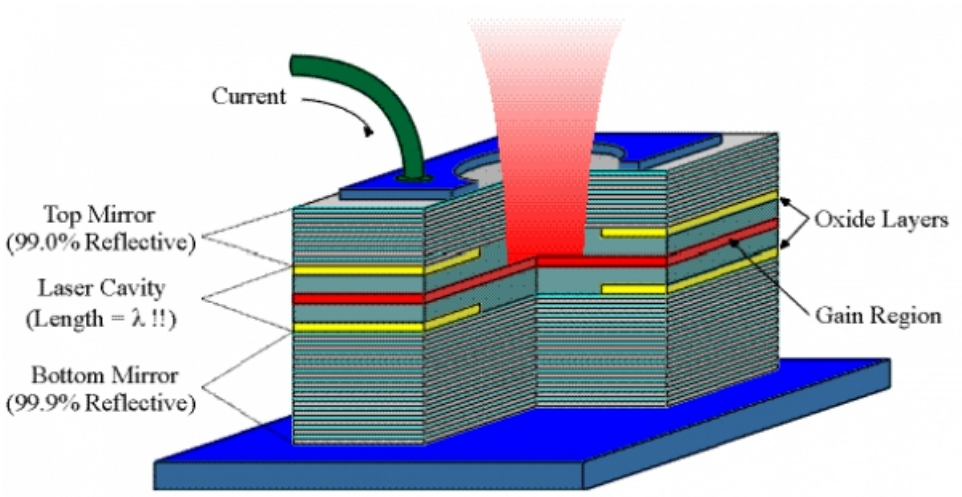
Основным недостатком DFB-лазеров является сложная технология изготовления и, как следствие, более высокая цена. Поэтому и используется на расстояниях от 40 до 160 километров.

Считается, что самый дешевый лазер - VCSEL. В отличие от торцевых (edge-emitter, EE) лазеров FP и DFB, он имеет резонатор, расположенный перпендикулярно плоскости подложки, что значительно облегчает тестирование в процессе производства. В результате стоимость их сборки снижается. Но судя по всему, количество "годных" полупроводниковых элементов в массовом производстве сегодня таково, что это преимущество не имеет большого значения.



Отличительная особенность работы VCSEL-лазеров по сравнению с торцевыми

VCSEL имеет большую температурную стабильность, потребляет значительно меньшее количество энергии.

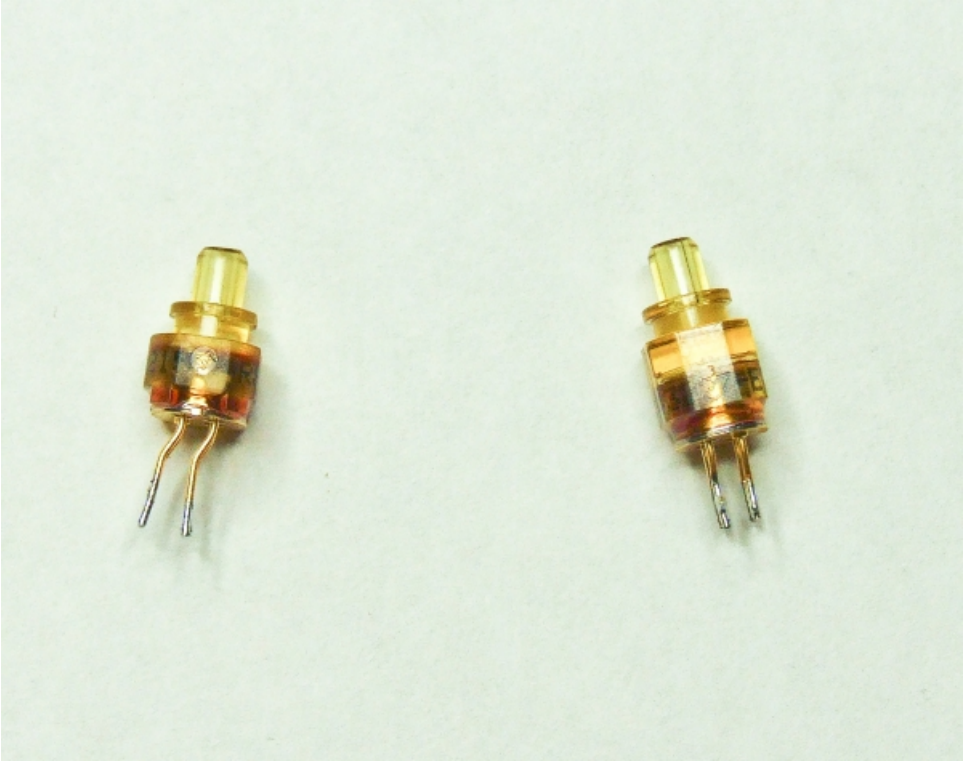


Структура VCSEL-лазера

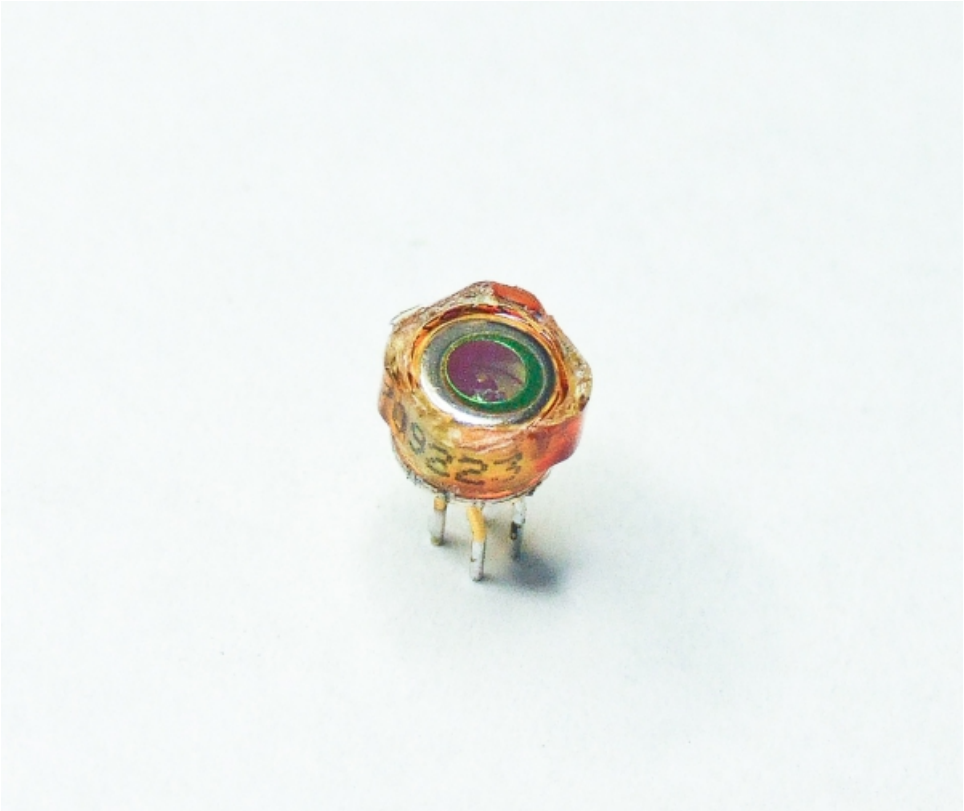
Сфера применения - локальные вычислительные сети, построенные на основе многомодового (MM) оптического волокна. В настоящее время можно наблюдать процесс постепенного вытеснения подобных сетей из практики. Стоимость VCSEL-based трансиверов MM 850nm с дальностью работы до 300-500 метров практически не отличается от аналогичных, но существенно более дальнобойных и универсальных FP-лазеров, работающих по одномодовому (SM) волокну. Более того, в связи с широким распространением одноволоконных bidi систем, итоговая стоимость проекта на FP- или DFB- может оказаться меньше, чем VCSEL.

Примером трансивера на базе VCSEL лазера является модуль SNR-SFP-SX.

Вскроем его, и выпаяем TOSA и ROSA:



Разберем TOSA, чтобы увидеть VCSEL:



Под микроскопом полупроводник выглядит так:

[Кратко о п/п лазерах]
VCSEL-чип

Наука до сих пор не смогла разработать VCSEL, который бы имел в диапазоне 1550 нм достаточную для замены FP-лазера ширину спектра и выходную мощность. Возможно, это будет разработка будущего, которая резко снизит стоимость трансиверов. В противном случае данную ветвь технологии ждет медленное угасание.

Ниже приведена сравнительная таблица лазеров с внутренней модуляцией, которые применяются в цифровых системах связи на сегодняшний день.

Параметры	**FP**	VCSEL	**DFB**
Диапазон рабочих длин волн, нм	1310, 1550	850, 1310	1310, 1550
Материал	InGaAsP/InP	GaAs, InGaAsP	InGaAsP/InP
Выходная мощность, мВт	≤10	≤5	≤40
Ширина спектра, нм	3	0.05 – 0.2	0,1-0.0001
Пороговый ток, мА (T=25°C)	5 – 15	2 – 4	5 – 15
Дальность передачи, км (2.5GB/s)	<20	<400m	<200
Стоимость, USD	25 – 500	5 – 100	100 – 3000

Главное преимущество лазеров с прямой (внутренней) модуляцией – экономическое, т.к. такие устройства намного дешевле лазеров с внешней модуляцией. Главный недостаток – наличие паразитной частотной модуляции (ЧМ), или чирпа (Chirp). Чирп приводит к расширению спектра излучения и, как правило, к сокращению дальности широкополосной передачи информации.

Для построения систем связи 1G Ethernet вполне достаточно DFB-based трансиверов. Дальность

передачи ограничена только их энергетическими характеристиками (бюджетом). При увеличении скорости передачи до 10G резко возрастает влияние хроматической дисперсии на оптический сигнал. Стабильности лазеров с внутренней модуляцией уже недостаточно для того, чтобы построить 10G системы передачи на большие расстояния:

Data Rate	Wavelength	Source	Distance
10G	850nm	VCSEL	300m
10G	1310nm	FP	2km
10G	1310nm	DFB	10km
10G	1310nm	DFB	20km
10G	1310nm	DFB	40km
10G	1550nm	EML	40km
10G	1550nm	EML	80km
10G	1550nm	EML	120km

Таким образом, на сцену выходят лазеры с внешней модуляцией – EML. Для лазеров с внешней модуляцией существуют две основные конкурирующие технологии: на основе электроабсорбционных модуляторов (Electroabsorptive Modulators, EAM) и на основе интерферометров Маха-Цендера (Mach-Zehnder (MZ) Interferometers).

EAM построены из полупроводниковых материалов, таких как фосфид индия (InP). Главное преимущество EAM заключается в способности интегрироваться с DFB-лазерами на одном кристалле. Когда лазер образован при помощи EAM и DFB-лазера на одном кристалле, его обычно называют электроабсорбционным модулированным лазером (Electroabsorptive Modulated Laser, EML).

[Кратко о п/п лазерах]
Структура EML-лазера

EML-лазеры имеют малую инерционность, очень узкий спектр и поэтому получили применение в высокоскоростных сетях на скоростях 10-40GB/s. На их основе обычно изготавливают передатчики в диапазоне 1550 нм на расстояния 40-120 км, включая CWDM/DWDM-модули.

Основным недостатком EML, помимо высокой цены, является высокое тепловыделение. Из-за этого остро стоит вопрос перегрева оптических модулей с малым форм-фактором, который плохо отводит тепло (например, SFP+). Многие недобросовестные производители используют в своих устройствах обычные лазеры (а не дорогие термостабильные), и при этом не делают никаких изменений в форм-факторе (увеличенный корпус, дополнительный радиатор).

[Кратко о п/п лазерах]
EML-лазер

Приемники

Приемники оптического излучения (фотоприемники, фотодиоды) в цифровых системах связи устроены заметно проще. Световое излучение преобразуется в электрический ток, усиливается (в большинстве случае с помощью TIA - Transimpedance Amplifier), а затем происходит восстановление переданного сигнала.

Возьмем оставшиеся после разбора SFP-трансиверов сборки ROSA:

[Кратко о п/п лазерах]

и будем в них искать приемники:

[Кратко о п/п лазерах]

Элемент, отмеченный на фото красным кругом, и есть фотоприемник. В случае разобранных SFP-LX, SFP-SX, SFP-WDM это PIN-диод на основе индий-галлий-арсенида InGaAs. Принцип работы заключается в поглощении фотонов падающего излучения с образованием электронно-дырочной пары в полупроводнике. При наличии внешнего напряжения образовавшиеся пары носителей заряда создают электрический ток, называемый фототоком.

[Кратко о п/п лазерах]

В оптических линиях передачи применяются два типа фотодиодов: рассмотренный ранее PIN-диод слева, справа лавинный фотодиод (avalanche photodiode, APD). Они имеют малые размеры, хорошо стыкуются с оптическими волокнами и с полупроводниковыми микросхемами.

[Кратко о п/п лазерах][Кратко о п/п лазерах]

Достоинство APD в том, что за счет внутреннего усиления фототока чувствительность таких фотоприемников получается в среднем на 6 дБ выше, чем у фотоприемников с PIN диодами.

Кроме нижнего порога чувствительности у APD несколько дБ ниже порог максимально допустимой мощности. Сигнал с входной мощностью более -8дБм может привести к выгоранию фотодиода.

[Кратко о п/п лазерах]

Таким образом, если рассуждать об энергетических характеристиках трансиверов, то максимальный энергетический потенциал, который можно получить, достигается с применением связки передатчика DFB/EML + APD приемника.