

ПРИГЛАШЕННАЯ СТАТЬЯ

PACS 42.79.Sz; 42.81.Dp; 42.55.Px; 42.60.Da

На пороге Тера-эры

Е.М.Дианов

По материалам конференций, проходивших в 1999 г., дан краткий обзор состояния дел в области волоконно-оптической связи. Основное внимание уделено волоконно-оптическим системам со спектральным уплотнением каналов и скоростью передачи информации ~ 1 Тбит/с.

Ключевые слова: волоконно-оптическая связь, спектральное уплотнение каналов, скорость передачи информации.

Введение

Мир вступает в третье тысячелетие. И если до сих пор существуют сомнения и ведутся споры о том, когда начинается новое тысячелетие – в 2000 или 2001 году, то абсолютно бесспорно, что одновременно мир вступает в информационную эру, или Тера-эру. Последнее название отражает скорости передачи и обработки информации – 10^{12} бит/с (терабит/с) и 10^{12} операций/с соответственно, которые будут достигнуты в недалеком будущем.

Информационная эра характеризуется, с одной стороны, непрерывно растущими потребностями человеческого общества в обмене информацией, а с другой – технической возможностью практически полностью удовлетворить эти потребности. История развития средств связи и передачи информации является неотъемлемой частью истории развития общества, причем потребности в обмене информацией всегда превышали существующие технические возможности. Любое общество заботится о технике связи, вкладывая в ее развитие большие средства и используя новейшие достижения науки и техники (конечно, после военной техники). И только сейчас, на пороге нового тысячелетия, человечество готово, используя оптические методы передачи, обработки и хранения информации, создать технические условия для практически полного удовлетворения своих потребностей в обмене информацией.

В этой статье я остановлюсь лишь на последних достижениях в области волоконно-оптических систем связи и передачи информации – важнейшего элемента информационной техники. На рис.1 представлена динамика развития систем связи за последние 100 лет. Видно, что за 90 лет развития техники связи информационная емкость (скорость передачи информации) линий связи возросла на пять порядков, начиная от первых телефонных линий связи, которые имели скорость передачи информации порядка 1 бит/с. Примерно на те же пять порядков возросла скорость передачи информации систем связи за последние 20 лет, достигнув ~ 1 Тбит/с.

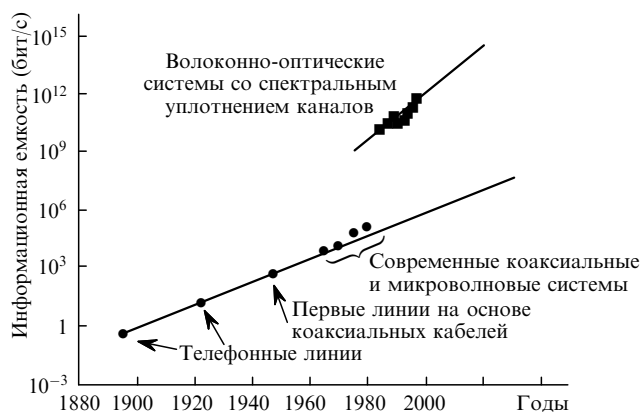


Рис.1. Изменение относительной информационной емкости систем связи за последние 100 лет.

Масштабы развития волоконно-оптической связи действительно поразительны. Мировое производство волоконных световодов составляет в настоящее время 60 млн км/год. Каждую минуту в мире в системах связи прокладываются более 100 км волоконных световодов. Все материки связаны между собой подводными волоконно-оптическими кабелями, общая длина которых достаточна, чтобы обмотать земной шар шесть раз. Разработка широкополосных оптических усилителей позволила создать в конце 90-х гг. экспериментальные волоконно-оптические системы связи со спектральным уплотнением ста и более каналов, что дало возможность достичь суммарной скорости передачи информации более 1 Тбит/с [1].

Принцип работы систем со спектральным уплотнением каналов ясен из рис.2. Излучение с разными длинами волн (в настоящее время, как правило, от независимых источников света), несущее для каждой длины волны свою информацию, вводится в один волоконный световод с помощью специального устройства (мультиплексора), усиливается оптическим усилителем и распространяется по волоконной линии связи. На выходе линии связи после оптического усилителя излучение разделяется по длинам волн с помощью демультиплексора.

Терабитные скорости передачи информации в системах со спектральным уплотнением каналов обуславливают вполне определенные требования к элементам этих

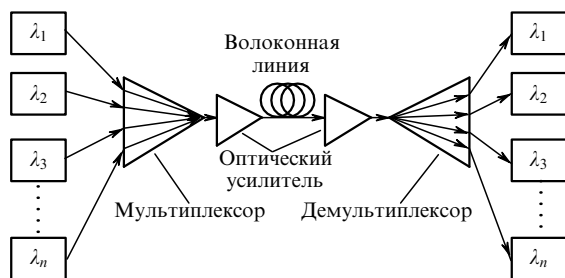


Рис.2. Принципиальная схема волоконно-оптической системы связи со спектральным уплотнением каналов.

систем, в первую очередь к источникам света, оптическим усилителям и волоконным световодам. Прежде чем обсуждать эти элементы, остановимся коротко на некоторых параметрах таких систем в целом.

Полная скорость передачи информации B определяется выражением

$$B = Nb,$$

где N – число спектральных каналов; b – скорость передачи информации по одному каналу, которая в настоящее время составляет 2.5–40 Гбит/с. Ведутся успешные работы по увеличению скорости передачи информации одного спектрального канала до 160 Гбит/с с использованием оптического временного уплотнения информации. Число спектральных каналов N достигает 100 и более.

Ширина полосы усиления современных оптических усилителей составляет 30–80 нм и является одним из главных ограничений числа передаваемых каналов и полной скорости передачи информации. Важной характеристикой систем со спектральным уплотнением каналов является разность длин волн (частот) соседних каналов; в настоящее время она находится, как правило, в диапазоне 0.2–0.75 нм, или 25–100 ГГц.

Вернемся теперь к источникам света, оптическим усилителям и волоконным световодам, используемым сейчас, и кратко обсудим перспективы развития этих важнейших элементов.

1. Источники света

Наиболее широко используются сейчас полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью, принципиальным недостатком которых является чувствительность длины волны излучения к изменению температуры. Поскольку разность длин волн соседних спектральных каналов составляет доли нанометра, то при использовании полупроводниковых лазеров необходимо осуществлять их термостабилизацию, что увеличивает стоимость всей системы. Погрешность фиксации длины волны источников света должна быть не хуже 0.05 нм.

От этого недостатка свободны волоконные лазеры, в частности эрбиевые, генерирующие излучение в спектральной области 1.53–1.62 мкм. Эти лазеры накачиваются лазерными диодами и представляют собой эффективный и стабильный источник света для систем со спектральным уплотнением каналов (см., напр., [2, 3]). Еще одним перспективным источником является суперконтинуум частот, генерируемый в волоконных световодах посредством ряда нелинейных эффектов при возбуждении достаточно мощными фемтосекундными импульсами.

Так, в работе [4] таким путем получен стабильный источник излучения с шириной спектра 200 нм и длинами волн в диапазоне 1.45–1.65 мкм. Использование оптических фильтров позволяет получить необходимое число источников света с заданными разностями длин волн.

2. Оптические усилители

В настоящее время в волоконно-оптических системах связи применяются оптические усилители трех типов: полупроводниковые оптические усилители, эрбиевые волоконные усилители (EDFA) и рамановские (ВКР-) волоконные усилители. Полупроводниковые оптические усилители вследствие быстрой динамики их усиления, приводящей к возникновению перекрестных помех между различными спектральными каналами, в системах со спектральным уплотнением каналов пока не применяются. Наиболее широко сейчас используются эрбиевые волоконные усилители, полная спектральная полоса усиления которых составляет около 80 нм (С- и L-полосы усиления) (см., напр., [5]).

Другой важной характеристикой (кроме ширины полосы усиления) является плоский спектр усиления. Это связано с тем, что все спектральные каналы должны иметь одинаковое усиление. Как правило, ни один из усилителей не обладает плоской спектральной характеристикой усиления, поэтому выравнивание спектра усиления осуществляется оптическими фильтрами различных типов.

Рамановские усилители перспективны для применения в волоконно-оптических системах связи в связи с рядом принципиальных преимуществ (см., напр., [6]):

- они могут усиливать на любой длине волны;
- в качестве их активной среды может использоваться сам волоконный световод;
- спектр усиления этих усилителей зависит от спектра накачки, поэтому, в принципе, подбором источников накачки можно формировать очень широкую (более 100 нм) полосу усиления;
- низкие шумы.

Основным недостатком рамановских усилителей является их не очень высокая эффективность, что приводит к необходимости использования для получения усиления около 30 дБ (типичное значение для систем оптической связи) довольно мощной (~ 1 Вт) непрерывной накачки. До недавнего времени таких источников накачки в диапазоне длин волн 1.2–1.5 мкм не существовало. Однако в последние годы разработаны высокоэффективные рамановские волоконные лазеры, работающие практически на любой длине волны в диапазоне 1.2–1.5 мкм [7, 8].

Кроме того, создан эффективный рамановский волоконный усилитель, в котором в качестве активного световода используются специально разработанные волоконные световоды с большим содержанием германия и низкими оптическими потерями [9]. Это дает основания считать, что рамановские волоконные усилители будут играть все возрастающую роль в волоконно-оптических системах связи. Интересной возможностью является использование гибридного волоконного усилителя, состоящего из распределенного рамановского и эрбиевого волоконного усилителей. Таким образом в работе [10] была получена полоса усиления свыше 80 нм. Кроме того, этот гибридный усилитель обладает лучшими шумовыми характеристиками.

3. Волоконные световоды

Использование спектрального уплотнения каналов предъявляет жесткие требования к свойствам волоконных световодов, прежде всего к дисперсии волоконных световодов и к эффективной площади моды. Это связано с тем, что при спектральном уплотнении каналов значительно увеличивается суммарная мощность всех сигналов и в световоде происходят нелинейные явления, прежде всего четырехволновое смешение, вызывающие перекрестные помехи. Если в волоконный световод вводятся N длин волн, то за счет четырехволнового смешения появляются $0.5N^2(N-1)$ новых длин волн. Если дисперсия световода в области длин волн вводимого излучения близка к нулю, то выполняется условие фазового синхронизма и процесс идет очень эффективно.

На рис.3 [11] показана роль дисперсии в этом процессе. В волоконные световоды с дисперсией $D = 0$ и 2.5 пс/нм·км вводится излучение четырех спектральных каналов с мощностью 2 мВт в каждом. На выходе световода длиной 50 км (чем длиннее световод, тем выше эффективность нелинейных процессов) с ненулевой дисперсией излучение на дополнительных длинах волн вследствие четырехволнового смешения не наблюдается. В световоде же длиной 25 км с нулевой дисперсией эффективно идет четырехволновое смешение и ясно видны более 20 дополнительных длин волн. Отсюда вытекает требование к волоконным световодам для систем со спектральным уплотнением каналов – отличная от нуля (но не очень большая) дисперсия на длинах волн несущего излучения; при этом изменение дисперсии с длиной волны должно быть минимальным.

Напомню, что для увеличения скорости передачи информации в системах связи с одним спектральным каналом требовались световоды с нулевой дисперсией, и такие световоды были разработаны (так называемые световоды со смещенной нулевой дисперсией (DSF), в которых за счет структуры световода нуль дисперсии смещался от длины волны ~ 1.3 мкм к длине волны 1.55 мкм). В результате для систем со спектральным уплотнением каналов были разработаны специальные световоды – так называемые световоды с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF).

Другим путем уменьшения роли нелинейности является увеличение диаметра сердцевин одномодового световода, или, точнее говоря, увеличение эффективной площади моды A_{ef} . В этом случае интенсивность излучения сигналов уменьшается, что приводит к существенному

ослаблению нелинейных явлений. Такие одномодовые волоконные световоды с эффективной площадью моды $A_{ef} > 80$ мкм² уже разработаны и используются в экспериментальных системах со спектральным уплотнением каналов (см., напр., [12]).

Однако в силу специфической структуры таких световодов распределение поля моды в них отличается от гауссова (большие градиенты в распределении интенсивности света), что приводит к более сильному акустическому отклику, вызванному электрострикцией [13]. Известно, что большие радиальные градиенты интенсивности света оптических импульсов в одномодовых волоконных световодах приводят к электрострикционному возбуждению в них поперечных акустических волн. Это вызывает временное возмущение эффективного показателя преломления, взаимодействие оптических импульсов и, в конце концов, ограничивает скорость передачи информации [14].

Перечисленные выше достижения в области создания источников света, оптических усилителей, волоконных световодов и других элементов систем со спектральным уплотнением каналов позволили всем основным крупным телекоммуникационным фирмам разработать системы связи со скоростью передачи информации более 1 Тбит/с. Ниже кратко суммированы результаты этих работ, доложенные на конференциях по волоконно-оптической связи OFC'99 и ECOC'99 в 1999 г. Для каждой работы последовательно указаны следующие характеристики систем: скорость передачи информации по одному каналу и число каналов; источники излучения; разность частот (длин волн) соседних каналов; тип оптического усилителя; расстояние, на которое передавалась информация, и тип волоконного световода.

1. S.Kawanishi et al. 3 Tbit/s (160 Gbit/s \times 19 ch.) OTDM/WDM Transmission Experiment. NTT Network Innovation Labs, Japan (OFC'99): 160 Гбит/с \times 19 каналов; супер-континуум + оптические фильтры; $\Delta\nu = 480$ ГГц ($\Delta\lambda = 3.6$ нм); усилитель EDFA (световод на основе теллуридного стекла); полоса 70 нм; 40 км, световоды со смещенной нулевой дисперсией (DSF).

2. T.Naito et al. 1 Tbit/s WDM Transmission over 10.000 km. Fujitsu Labs, Japan (ECOC'99): 10 Гбит/с \times 104 канала; 44 полупроводниковых (ПП) лазера с распределенной обратной связью (РОС) (1544.37 – 1561.83 нм) + 60 ПП РОС-лазеров (1575 – 1600 нм); $\Delta\nu = 50$ ГГц ($\Delta\lambda \approx 0.4$ нм); усилитель: EDFA (С- и L-полосы) с полосой 17.3 нм + 24.8 нм = 42.1 нм; 10127 км, волоконные световоды с большой эффективной площадью моды.

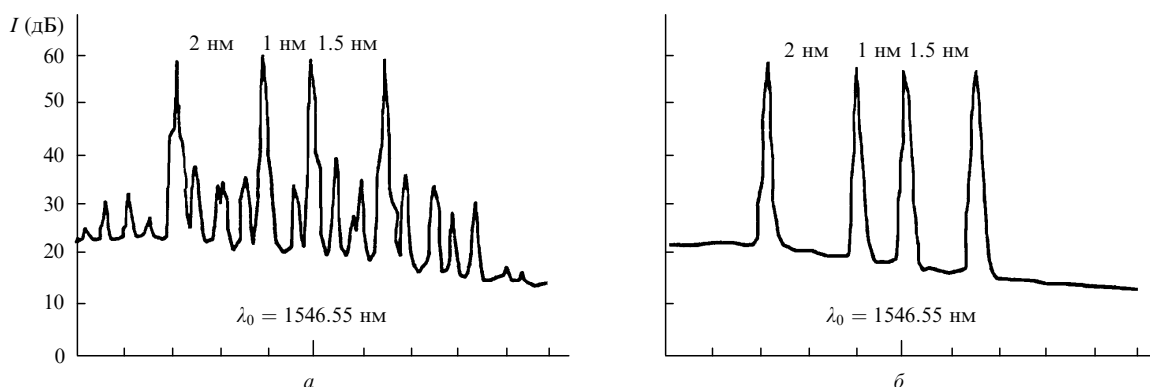


Рис.3. Спектр излучения на выходе волоконных световодов с дисперсией $D = 0$ (а) и 2.5 пс/нм·км (б) при возбуждении световодов излучением четырех спектральных каналов вблизи длины волны 1546 нм.

3. T.N.Nielsen et al. 1.6 Tbit/s (40×40 Gbit/s) transmission over 4×100 km nonzero-dispersion fiber using hybrid Raman/Erbium-doped amplifiers. Bell Labs Lucent Technology (ECOC'99): 40 Гбит/с \times 40 каналов; 40 ПП РОС-лазеров (1530–1562 нм); $\Delta\nu = 100$ ГГц ($\Delta\lambda = 0.75$ нм); усилитель EDFA/Raman с полосой 32 нм; 4×100 км, световоды с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF).

4. H.Suzuki et al. 25 GHz-spaced, 1 Tbit/s (100×10 Gbit/s) Super Dense-WDM Transmission in the C – Band over a Dispersion-shifted fiber Cable Employing Distributed Raman amplification. NTT Network Innovation Labs, Japan (ECOC'99): 10 Гбит/с \times 100 каналов; 100 ПП лазеров (1540–1560 нм); $\Delta\nu = 25$ ГГц ($\Delta\lambda \approx 0.2$ нм); рамановский усилитель; 4×80 км, световоды со смещенной нулевой дисперсией (DSF).

5. J.-P Elbers et al. 3.2 Tbit/s (80×40 Gbit/s) Bidirectional DWDM/ETDM Transmission Siemens AG (ECOC'99): 40 Гбит/с \times 80 каналов; 80 ПП лазеров (1531–1562 нм, 1569–1601 нм); $\Delta\nu = 100$ ГГц ($\Delta\lambda \approx 0.75$ нм); усилитель EDFA (C- и L-полосы); 40 км, стандартные волоконные световоды.

6. S.Bigo et al. 1.5 Tbit/s WDM transmission of 150 channels at 10 Gbit/s over 4×100 km of Teralight fiber. Alcatel Corporate Research Center, France (ECOC'99): 10 Гбит/с \times 150 каналов; 150 ПП РОС-лазеров (80 (1530–1561 нм) + 70 (1574–1603 нм)); $\Delta\nu = 50$ ГГц ($\Delta\lambda = 0.4$ нм); усилитель EDFA (C- и L-полосы); 4×100 км, волоконный световод с оптимизированной дисперсией.

Приведенные данные показывают, что используются различные подходы к созданию систем связи со скоростью передачи информации, превышающей 1 Тбит/с. Эти подходы различаются числом спектральных каналов и информационной емкостью индивидуальных каналов, типом оптического усилителя (EDFA, рамановский усилитель, гибридный рамановский усилитель + EDFA), типом волоконного световода (стандартный одномодовый, DSF, NZDSF, световоды с большим $A_{\text{эф}}$), типом источника света. Это свидетельствует о надежной элементной базе и огромных потенциальных возможностях волоконно-оптических систем связи со спектральным уплотнением каналов.

Заключение

Нет никаких сомнений, что уже в ближайшие годы волоконно-оптические системы со скоростями передачи информации более 1 Тбит/с найдут широкое коммерческое применение. Однако уже сейчас ясно, что и эти скорости передачи информации не смогут удовлетворить растущие потребности общества в получении информации.

В настоящее время движущей силой в развитии систем передачи информации является Интернет. В 1998 г. число пользователей Интернета составляло около 25 млн человек, в 1999 г. – 144 млн человек, и нет сомнения, что уже в недалеком будущем число пользователей возрастет на порядок*. Портативный персональный компьютер с выходом в Интернет станет таким же необходимым и доступным инструментом получения информации, развлечений и общения, как телевизор и телефон.

*В России число зарегистрированных пользователей Интернета в 1999 г. составило 2.5 млн человек.

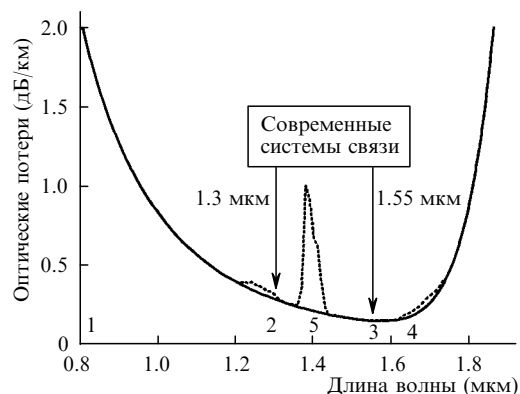


Рис.4. Спектр оптических потерь волоконного световода.

Есть ли пути для дальнейшего резкого увеличения информационной емкости волоконно-оптических систем связи? Есть, и наиболее прямой из них – это расширение спектральной области для передачи информации. На рис.4 показан спектр оптических потерь волоконного световода на основе кварцевого стекла. Цифрами 1–5 обозначены так называемые окна прозрачности, в которых оптическая связь осуществлялась по мере ее развития (1–3), а также спектральные области, которые будут использоваться для передачи информации в недалеком будущем (4, 5). Практически все современные системы связи работают на длинах волн вблизи 1.3 и 1.55 мкм, т. е. во 2-м и 3-м окнах прозрачности.

В экспериментальных системах со спектральным уплотнением каналов в настоящее время используется спектральная область 1530–1610 нм шириной около 80 нм. Пунктиром показано поглощение, обусловленное гидроксильными группами в стекле. Успехи в технологии волоконных световодов позволили убрать полосу поглощения гидроксильных групп; в результате спектральная область, оптические потери в которой не превышают 0.3 дБ/км, имеет ширину примерно 500 нм (в диапазоне 1200–1700 нм). Использование всей этой области для передачи информации позволит резко увеличить информационную емкость волоконно-оптических систем со спектральным уплотнением каналов.

Беря уже достигнутые разность длин волн соседних каналов и скорость передачи информации индивидуального канала 0.2 нм и 160 Гбит/с, получаем, что число уплотненных каналов равно 2500, а суммарная скорость передачи информации составляет 400 Тбит/с, или 0.4 Пбит/с. Учитывая быстрый прогресс в развитии волоконно-оптической связи, можно с большой долей уверенности предположить, что использование спектральной области 1.2–1.7 мкм позволит в будущем получать скорости передачи информации ~ 1 Пбит/с. Ясно, что для создания таких систем связи потребуются обширные фундаментальные исследования и разработка новой элементной базы. В частности, будет необходим оптический усилитель с полосой усиления порядка нескольких сотен нанометров.

1. XXV Europ. Conf. on Optical Communication (Nice, 1999, session PD2).
2. Poulsen H.N. et al. 1607 nm DFB Fiber Laser for Optical Communication in the L-band. XXV Europ. Conf. on Optical Communication (Nice, 1999, v.1, p.70).
3. Ibsen M. et al. All-fiber DFB laser WDM Transmitters with Integrated Pump Redundancy. XXV Europ. Conf. on Optical Communication (Nice, 1999, v.1, p.74).

4. Novak G.A. et al. *Stable 200 nm TDM/WDM source based on continuum generation in 2 m of fiber. OFC Conf. (San Diego, 1999, TuB3).*
5. Mori A. et al. *Ultra-broadband amplification for DWDM systems. XXV Europ.Conf. on Optical Communication (Nice, 1999, v.1, p.260).*
6. Dianov E.M. *Raman fiber amplifiers. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Applications (Nara, 1999, ThA1).*
7. Karpov V.I. et al. *Optics Letts, 24, 887 (1999).*
8. Dianov E.M. et al. *Optics Letts, 25, 402 (2000).*
9. Dianov E.M. et al. *Electron.Letts, 34, 669 (1998).*
10. Masuda H. et al. *Wide-band and low-noise optical amplification using distributed Raman amplifiers and Er-doped fiber amplifier. OFC Conf. (San Jose, 1998, PD7).*
11. Gardner W.B. *Fiber for high capacity systems. XXV Europ.Conf. on Optical Communication (Nice, 1999, v.2, p.270).*
12. Liu Y. et al. *Large effective area dispersion-shifted fibers with dual-ring index profiles. OFC Conf. (San Jose, 1996 WK15); Nouchi P. et al. New dispersion-shifted fibers with effective area larger than $90 \mu\text{m}^2$. Europ.Conf. on Optical Communication (Oslo, 1996, Mo.B.3.2).*
13. Dianov E.M. et al. *Optics Letts, 25, 390 (2000).*
14. Dianov E.M. et al. *Optics Letts, 15, 314 (1990).*

E.M.Dianov. On the threshold of Tera era.

A brief review is presented of the state of the art of fibre optic communication based on materials of the conferences held in 1999. The main attention is paid to fibre optic systems with the spectral multiplexing of channels and the data transfer rate $\sim 1 \text{ Tbit s}^{-1}$.