

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

§ 5.1. Волоконные световоды

Системы передачи информации на световодах по сравнению с аналогичными на проводах обладают целым рядом преимуществ. К основным достоинствам световодов относятся: широкополосность, достигающая десятков гигагерц; универсальность, поскольку за счет широкополосности возможно применение унифицированной цифровой системы передачи любых видов информации при совмещении их в одном канале; малая масса и размеры; возможность быстрого и точного определения места повреждения; высокая помехозащищенность, вследствие нечувствительности к электромагнитным помехам и наводкам ввиду полной электрической изоляции; гибкость; низкая стоимость, обусловленная экономией дефицитных материалов и существенным уменьшением энергозатрат на производство.

Волоконно-оптические линии передач информации нашли применение в таких областях, как телефонная связь на большие и малые расстояния; соединение блоков контрольно-измерительной аппаратуры в системах управления технологическими процессами; сопряжение периферийных устройств ЭВМ с ее центральным процессором; соединения авиационной бортовой аппаратуры; системы передачи данных; замкнутые системы телевидения, в том числе кабельные; соединения печатных системных плат.

Конструктивно световоды делятся на планарные оптические волноводы и двухслойные волокна.

Планарные оптические волноводы. Они могут внести принципиальное изменение в технику монтажа печатных плат. Оптическая связь позволяет осуществлять бесконтактные соединения между различными планарными слоями в третьем измерении и пространственно уплотнить их за счет взаимного пересечения без взаимодействия.

Конструкции базовых структур планарных волноводов приведены на рис. 5.1, *а* — *в*. Они могут использоваться в качестве направляющих структур оптических устройств и соединительных линий. Разно-

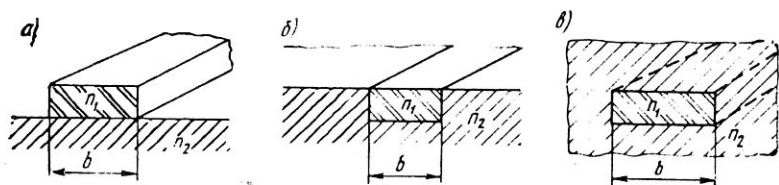


Рис. 5.1. Базовые структуры планарных волноводов:

а — возвышающаяся полоска; *б* — погруженная полоска; *в* — утопленная полоска;
 n_1 , n_2 — показатели преломления материалов

видности волн, которые могут распространяться в оптическом волноводе, называются модами [21]. Достаточно сильное ограничение полей, направляемых по волноводу мод, в поперечном сечении позволяет уменьшить размеры этих устройств и выполнить их в интегральном исполнении. Прямоугольная форма поперечного сечения полоскового волновода является простой и удобной при изготовлении планарных интегральных твердотельных цепей. Все три типа полоскового волновода поперечного ограничения и их направляемые моды имеют сходные характеристики.

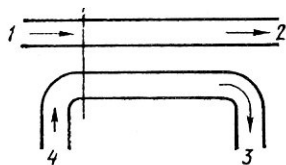


Рис. 5.2. Схема волноводного направленного ответвителя

Ширина полосы пропускания световода определяется его структурными и физическими параметрами, а также свойствами материала, приводящими к хроматической и межмодовой дисперсиям. Хроматическая дисперсия обусловлена различием времен задержки спектральных составляющих сигнала, а межмодовая — различием групповых задержек мод, на которые влияет профиль показателей преломления материала [21].

Связанные волноводы и направленные ответвители. Оптические волноводы, расположенные параллельно друг другу, взаимодействуют между собой спадающими внешними полями. Взаимодействие полей приводит к передаче мощностей из одного волновода в другой, что может привести к искажению работы схемы. В этом случае необходимо уменьшить взаимодействие, пространственно разделяя волноводы или применяя другие способы.

Однако в некоторых случаях волноводы в оптических схемах специально располагаются близко и параллельно друг к другу, чтобы обеспечить передачу части мощности между отдельными модами обоих волноводов. Такие волноводные ответвители (рис. 5.2) используются для контроля мощности волны, распространяющейся в волноводе, или возбуждения определенной моды в одном волноводе с помощью другого волновода. В направленном ответвителе мощность, которая поступает на вход 1, разделяется между выходами 2 и 3; на выходе 4 излучение отсутствует. Такой ответвитель хорошо работает при передаче мощности моды, распространяющейся в прямом направлении относительно падающей волны.

Поскольку планарные волноводные структуры служат в оптических элементах в качестве соединительных линий планарных оптических цепей, их длина находится в пределах нескольких миллиметров. Дисперсия в таких коротких линиях не вызывает заметного искажения.

Двухслойные волокна. При передаче сигналов на большие расстояния необходимы оптические волноводы с низкими потерями и дисперсией. В качестве материалов используются высококачественные, прозрачные и однородные многокомпонентные стекла, а также чистый

плавленный кварц. Волноводными структурами, наиболее полно сохраняющими высокое качество исходных материалов, являются волокна. Они также наиболее просты в изготовлении.

Обычные стеклянные волокна с постоянным показателем преломления тоже можно применять для передачи света, используя явление полного внутреннего отражения света от его стенок. Однако любые посторонние детали, которые соприкасаются с незащищенным волокном при его поддержке или размещении в трубе, нарушают условие полного внутреннего отражения и приводят к потере мощности передаваемого сигнала. Поэтому оптические волноводы обычно имеют стеклянную сердцевину, которая окружена стеклянной оболочкой с показателем преломления n_2 (рис. 5.3, а). Показатель преломления сердцевины $n_1 > n_2$, благодаря чему происходит полное внутреннее отражение света на границе раздела между сердцевиной и оболочкой, и световой луч удерживается внутри сердцевины, распространяясь зигзагообразно. На рис. 5.3, б показаны возможные пути распространения меридиональных световых лучей по такому световолокну.

В зависимости от входного угла наклона волокна θ относительно оси световые лучи будут испытывать полное внутреннее отражение либо от границы сердцевина — оболочка, либо от внешней границы оболочки. При больших углах происходит частичное излучение в окружающую среду. Световой луч, удерживаемый сердцевиной, может сформировать моду оболочки.

Передаточные характеристики волоконных световодов определяются главным образом их геометрией и физическими параметрами, а также свойствами материалов. Выбор волокна и его конструкции зависит от того, какие направляемые моды необходимо использовать для передачи сигналов. Поэтому на практике применяют одномодовые и многомодовые волокна.

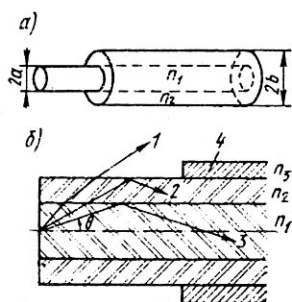


Рис. 5.3. Двухслойное волокно:

а — схема; б — сечение; 1 — моды излучения; 2 — моды оболочки; 3 — моды сердцевины; 4 — защитный чехол

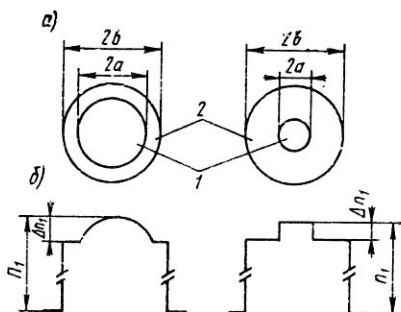


Рис. 5.4. Структура многомодового градиентного (слева) и одномодового (справа) световодов:

а — поперечные сечения; б — профили показателей преломления; 1 — сердцевина; 2 — оболочка

Одномодовый волоконный световод (ОМВС). Световод со ступенчатым распределением показателя преломления (рис. 5.4) работает в одномодовом режиме, если его нормированная частота

$$V = ka(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (5.1)$$

меньше предельного значения, равного 2,405. В этом выражении $k \equiv 2\pi/\lambda$; λ — длина волны света в вакууме; n_1, n_2 — показатели преломления материала (ППМ) сердцевинки и оболочки. Для ОМВС с параметрами $2a = 10$ мкм; $n_1 - n_2 \approx 0,003$ длина волны отсечки $\lambda_c \approx 1,225$ мкм, т. е. на длине волны больше этого значения моды высших порядков распространяться не могут. На практике эффективный одномодовый режим наблюдается на длинах волн, несколько меньших, чем предсказывается теорией, поскольку вблизи частоты отсечки моды высшего порядка испытывают очень сильное затухание из-за потерь на излучение, обусловленных неизбежными изгибами и нерегулярностями световода.

Для расчета параметров ОМВС сначала задаются определенным значением V , а затем выбирают разность ППМ или радиус сердцевинки световолокна, так чтобы добиться их компромиссного сочетания.

Большой размер сердцевинки требует малой разности показателей преломления, но облегчает ввод основной моды и позволяет увеличить допуски при соединении и сращивании волокон. Однако малая разность ППМ при этом приводит к тому, что волокно слабо направляет основную моду и становится очень чувствительным к нерегулярным изменениям структуры. Такие изменения световолокна, например кривизна оси круглого цилиндра, связывают основную моду с полем излучения, вызывая потери мощности из-за излучения в защитную оболочку.

Большая разность ППМ приводит к более эффективному вводу основной моды. Однако соответствующий малый размер сердцевинки и малый диаметр моды в такой сердцевине делают трудным возбуждение основной моды с достаточной эффективностью и накладывают жесткие допуски на соединение и сращивание волокон.

При выборе параметров ОМВС необходимо учитывать также потери, вносимые при сборке кабеля (которая неизбежно ведет к появлению микроизгибов) и при сращивании волокон. При сращивании и соединении волокон неточность юстировки их торцов, а также различия их сечений и ППМ могут вызвать ощутимые потери. Для вычисления таких потерь нужно знать распределение поля канализируемых мод. Распределение поля основной HE_{11} -моды в световоде с достаточной точностью можно аппроксимировать функцией Гаусса. Как показываю результаты теоретических и экспериментальных исследований, потери, вносимые сборкой кабеля и сращиванием оптических волокон, в световоде со ступенчатым распределением ППМ минимальны при $V = 2,2$ [21].

Поскольку в ОМВС со ступенчатым распределением ППМ поле основной моды проникает в оболочку на значительную глубину (на-

пример, при $V = 2,2$ в оболочке оказывается 20% всей оптической мощности), толщина оболочки должна быть достаточной, чтобы предотвратить увеличение потерь, обусловленных поглощением и эффектами «выхода мод» в защитное покрытие, для обеспечения пренебрежимо малого значения таких дополнительных потерь толщина оболочки должна на порядок превышать радиус сердцевины. Ширина полосы пропускания ОМВС определяется главным образом хроматической дисперсией. На длине волны минимальной хроматической дисперсии она зависит от ширины спектра излучения источника. При спектральной ширине излучения, равной 5 нм, максимальное значение произведения ширины полосы пропускания на расстояние (обобщенный параметр широкополосности B) превышает 50 и доходит до 200 ГГц · км, что с большим запасом удовлетворяет требованиям, предъявляемым ко многим типам систем связи.

ОМВС можно возбудить только от одномодовых источников излучения, что является их недостатком. Для эффективного возбуждения основной моды необходимо также согласовать распределения поперечных полей источника излучения и основной моды волокна. Любые рассогласования приводят к потерям мощности вследствие появления вытекающих мод или поля излучения.

Многомодовый волоконный световод (ММВС). Большой практический интерес представляют двухслойные волокна с большими размерами сердцевины, а иногда и с большими разностями ППМ сердцевины и оболочки. Такие световоды со ступенчатым распределением ППМ имеют высокие значения параметра волокна V и направляют $N = V^2/2$ мод. На практике вместо строго двухслойного волокна со скачком ППМ получают волокна с градиентом ППМ, вследствие чего их называют *градиентными*.

Большая разность ППМ сердцевины и оболочки означает, что световод имеет большую числовую апертуру. Числовая апертура ЧА определяется как синус максимального угла падения луча θ_c , входящего в сердцевину, при котором он еще распространяется без потерь. Она служит мерой эффективности ввода излучения в световод и определяется следующим соотношением:

$$ЧА = \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (5.2)$$

где Δ — относительная разность ППМ сердцевины и оболочки, причем $n = (n_1^2 - n_2^2)/(2n_1^2) \approx (n_1 - n_2)/n_1 \approx \Delta n_2/n_1$.

В ММВС сердцевина захватывает все световые лучи, которые падают на ее передний торец при углах, меньших, чем угол θ_c , и направляет их по волокну в виде распространяющихся мод. Помимо канализируемых мод существуют и вытекающие моды, для которых характерны высокие коэффициенты затухания. Они практически не распространяются на расстояние более 1 км и поэтому учитываются только на относительно коротких волокнах.

Сигналы в ММВС можно вести от любого источника излучения. Даже многомодовые источники с частично когерентным или вовсе

некогерентным светом, например обычные светодиоды, можно подсоединить к ММВС и возбуждать их с приемлемой эффективностью. При юстировке источников излучения с ММВС допустимы большие допуски, чем при юстировке ОМВС с одномодовым лазером. Для соединения и сращивания ММВС требуется во много раз меньшая точность по сравнению с ОМВС.

Однако эти достоинства ММВС достигаются ценой некоторого ухудшения характеристик передачи информации. Основным параметром, характеризующим качество передачи информации, является ширина полосы пропускания. Ширина полосы пропускания ММВС главным образом определяется межмодовой дисперсией. Поскольку ММВС может передавать большое число мод,

причем каждая мода имеет свою групповую скорость распространения, то на выходе волокна наблюдается некоторый разброс во времени прибытия волны, хотя на входе все волны вводятся одновременно. Суперпозиция различных мод на конце световода может привести к значительному искажению формы входного оптического сигнала и его уширению. В связи с этим возникает задача оптимизации параметров световолокна для того, чтобы свести к минимуму межмодовую дисперсию. В качестве критерия обычно выбирают минимум уширения сигнала на выходе световода или максимум ширины полосы пропускания. Теоретически показано, что времена прохождения мод могут быть максимально уравнены путем создания распределения ППМ, близкого к параболическому закону [21].

Обычно распределение ППМ задается степенным законом:

$$n(r) = n_1 [1 - 2\Delta (r/a)^d]^{1/2}, \quad (5.3)$$

где d — показатель степени. Параметрами волокна, влияющими на межмодовую дисперсию, являются величины Δ и d . Оптимальное значение, максимизирующее полосу пропускания, для волокна из кварцевого стекла $\text{GeO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ $d = d_0 = 2$. Однако малейшие отклонения распределения ППМ от оптимального могут резко уменьшить этот максимум более чем на порядок. Поэтому при изготовлении ММВС с большой шириной полосы пропускания необходим точный контроль технологии вытяжки волокон.

На рис. 5.5 показана зависимость обобщенной ширины полосы пропускания как функции показателя степени распределения ППМ при $\Delta n = 0,02$, что соответствует $\Delta = 0,0135$. При $|d - d_0| = 0,05$ значение B уменьшается почти на порядок.

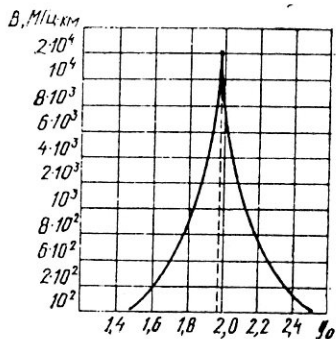


Рис. 5.5. Зависимость обобщенной ширины полосы пропускания B от параметра профиля ППМ g_0

Тип световолокна	$2a$, мкм	$2b$, мкм	Δn_1	ЧА	λ_c , мкм
ОМВС	10	125	0,003	0,24	1,225
ММВС	50	185	0,018	0,23	—

Среднеквадратичная ширина оптического сигнала на выходе световолокна с оптимальным распределением ППМ и длиной L (мкс/км)

$$\sigma_{\min} L \approx 0,14\Delta^2. \quad (5.4)$$

Максимальная скорость передачи информации (Мбит·км/с)

$$B' = L/(4\sigma_{\min}) \approx 1,8\Delta^{-2}. \quad (5.5)$$

Если $\Delta = 0,0135$, то $\sigma_{\min}/L \approx 0,0265$ нс/км; $B' \approx 10 \cdot 10^3$ Мбит × км/с.

Полное число канализируемых мод

$$N = \frac{V^2}{2(1+2\delta)}. \quad (5.6)$$

Типичные градиентные ММВС, выпускаемые промышленностью, характеризуются параметрами, приведенными в табл. 5.1. В качестве материала для сердцевины широко используют легированное кварцевое стекло.

Для градиентного световолокна с квадратичным ($g = 2$) распределением ППМ и $2a = 20$ мкм; $\Delta n_1 = 0,018$, ЧА = 0,23 полное число канализируемых мод на длине волны $\lambda = 1,3$ мкм $N = 192$. Наименьшие потери высокоапертурных световодов составляют 3,8 дБ/км при $\lambda = 0,84$ мкм, 1,1 дБ/км при $\lambda = 1,2$ мкм и 0,8 дБ/км при $\lambda = 1,55$ мкм.

§ 5.2. Источники света

В волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) в качестве источника света наибольшее применение находят полупроводниковые световылучающие устройства типа светодиодов и полупроводниковых лазеров. *Светодиод* представляет собой устройство, в котором используется спонтанное излучение за счет инверсной заселенности энергетических уровней, создаваемых путем инжекции в p - n -переход неосновных носителей заряда. *Полупроводниковый лазер* — более сложное устройство, использующее вынужденное излучение за счет помещения p - n -перехода в резонатор.

Основными требованиями, предъявляемыми к источникам света, используемым в ВОЛС, являются: высокое быстродействие, малые размеры, большая долговечность, простота модуляции излучения, высокая выходная мощность, узкая диаграмма направленности, возможность интеграции с другими активными и пассивными элементами, а также высокая надежность.

В настоящее время получены образцы полупроводниковых излучателей со сроком службы до десятков лет и более. Мощность их излучения составляет несколько милливатт в непрерывном режиме и сотни милливатт в импульсном режиме, что достаточно для большинства линий связи [21, 22].

Светоизлучающий диод (СИД). Выбор того или иного типа источника излучения определяется областью применения систем передачи. Высокая надежность, сравнительно простая конструкция и малая зависимость основных характеристик от температуры окружающей среды делают выгодным использование СИД в системах связи на короткие расстояния.

Наибольшее применение получили СИД на основе двойных гетероструктур, работающие при высоких плотностях возбуждающего тока ($\sim 10^4$ А/см²) и излучающие на длине волны от 0,8 до 1,6 мкм. Схема возбуждения СИД проще, чем у полупроводниковых лазеров. СИД более надежны, чем лазерные источники, их средняя долговечность достигает 10^5 ч. Однако СИД излучает в довольно широком спектре с шириной 30—40 нм (рис. 5.6), что на порядок больше, чем у многомодовых инжекционных полупроводниковых лазеров. Большая ширина спектра излучения СИД ограничивает информационную пропускную способность линии связи из-за хроматической дисперсии в световолокне. Максимальная скорость передачи информации при использовании СИД в цифровых линиях связи составляет 50 мбит/с.

СИД, предназначенные для работы в ВОЛС, должны излучать на длине волны, соответствующей максимальному поглощению световолокна, работать с высоким КПД, т. е. иметь высокий внешний квантовый выход, и обеспечивать эффективный ввод излучения в световолокно. Указанным требованиям отвечает GaAs-светодиод с двойной гетероструктурой.

Наименьшее поглощение современных волоконных световодов наблюдается в области 1,3 мкм, где дисперсия кварцевого стекла мала. СИД, излучающие в этом диапазоне длин волн, изготавливают из четырех элементов (InGa) (AsP).

Одним из основных показателей работы ВОЛС является эффективность связи СИД со световодом, поскольку мощность излучения СИД составляет около 1 мВт. Эффективность возбуждения световода с помощью СИД, площадь излучающей поверхности которого равна площади торца сердцевинки световолокна, приближенно описывается выражением

$$\eta_c = \frac{(ЧА)^2}{(1+2/\partial)} \quad (5.7)$$

Для ММВС с $ЧА = 0,23$; $\partial = 2$ (см. табл. 5.1) $\eta_c \approx 0,026$, т. е. приблизительно 2,6 %. Эффективность возбуждения световода можно повысить за счет увеличения внешнего квантового выхода СИД и уменьшения угловой расходимости его излучения. Для уменьшения угловой расходимости обычно создают фокусирующие элементы между

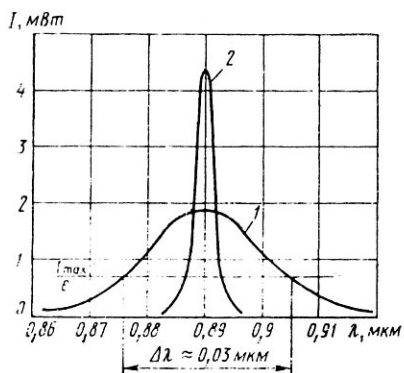


Рис. 5.6. Спектральное распределение излучения полупроводниковых источников света:

1 - светодиода; 2 - инжекционного лазера

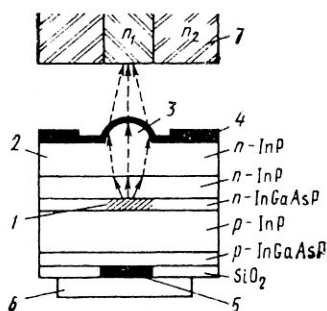


Рис. 5.7. Структура светодиода на гетероструктурах, излучающего на длине волны 1,3 мкм:

1 - излучающая область; 2 - подложка; 3 - сферическая поверхность, фокусирующая излучение; 4 - *n*-контакт; 5 - *p*-контакт; 6 - слой золотого покрытия; 7 - световод

излучателем и световодом (рис. 5.7). Благодаря этому эффективность возбуждения световода удается увеличить и довести до нескольких процентов. Таким образом, мощность излучения, вводимого в ММВС с помощью СИД, мала и не превышает нескольких десятков микроватт.

Модуляция излучения СИД осуществляется изменением тока возбуждения, так как излучаемая ими мощность прямо пропорциональна току возбуждения в широком диапазоне (до 50—100 мА). Быстродействие СИД ограничивается временем рекомбинации носителей заряда (1—10 нс), поэтому ширина полосы пропускания ВОЛС с СИД в качестве источника света составляет порядка 100 МГц. В последнее время были изготовлены СИД на гетеропереходе с хорошим удержанием носителей заряда и фотонов с шириной полосы пропускания 300 МГц [21].

Полупроводниковый лазер (ППЛ). Основными достоинствами ППЛ как источников света для ВОЛС являются: высокое быстродействие; малые размеры; простота модуляции излучения; возможность интеграции в одном кристалле как с активными твердотельными приборами, так и фотоприемниками и делителями света. Для них характерны значительно большая яркость и мощность излучения по сравнению с СИД, а также более узкий спектр излучения, благодаря чему увеличивается информационная пропускная способность ВОЛС.

На рис. 5.8 представлена схема типичной структуры инжекционных лазеров с «утопленной» гетероструктурой, имеющей самые лучшие характеристики излучения [30]. В таких структурах формируется длинная узкая область размером $0,2 \times 5,0 \times 400$ мкм³ с высокой концентрацией электронов ($2 \cdot 10^{18}$ см⁻³), образующая оптический резонатор.

Показанные на рисунке четыре эпитаксиальных слоя предназначены для того, чтобы с помощью гетеробарьеров между GaAs и (Al, Ga) As ограничить распространение оптического излучения и носителей заряда по обе стороны тонкой активной области лазера. Активная область со всех сторон окружена материалом (Al, Ga) As, имеющим большую ширину запрещенной зоны. Оптимальная толщина активной зоны 0,2—0,3 мкм. Аналогичные лазеры можно создать и на основе InP. В этом случае роль ограничивающих слоев играет InP, а в качестве материала активных и покрывающих слоев используется (InGa) (AsP) с меньшей шириной запрещенной зоны. Таким образом, длина волны излучения оказывается в требуемом спектральном интервале 1,2—1,5 мкм.

Мощность излучения ППЛ, выпускаемых в настоящее время промышленностью, достигает нескольких милливатт в непрерывном и сотен в импульсном режиме работы. Диаграмма направленности излучения ППЛ несимметрична: ее ширина обычно составляет 10—20° в плоскости, параллельной *p-n*-переходу, и 20—40° в перпендикулярной плоскости (рис. 5.8). В случае, когда ППЛ излучает несколько поперечных мод, в дальней зоне наблюдается ряд боковых лепестков излучения. Главный лепесток излучения ППЛ в дальней зоне представляет собой сферическую волну с эллиптическим сечением и гауссовым распределением интенсивности по сечению.

Модуляция излучения ППЛ на частотах до нескольких гигагерц наиболее просто осуществляется путем модуляции тока инжекции.

Чтобы эффективно ввести излучение ППЛ в световод, эллиптический гауссовый пучок света с помощью скрещенных цилиндрических линз (рис. 5.9) преобразуют в пучок круглого сечения для наилучшего возбуждения основной моды волокна. Эффективность возбуждения свыше 90 %, которая теоретически возможна в такой оптической системе, до сих пор еще не достигнута, так как из-за малых размеров излучающей области ППЛ и сердцевины световолокна предъявляются весьма высокие требования к точности изготовления цилиндрических линз и их юстировки.

Наиболее перспективным эквивалентом является киноформный согласующий элемент, синтезируемый расчетным путем с помощью ЭВМ.

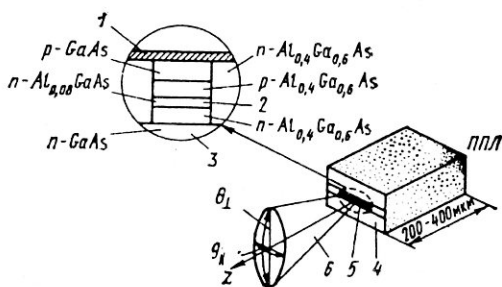


Рис. 5.8. Структура инжекционного лазера на GaAs:

1 — металлический контакт; 2 — активный слой; 3 — подложка; 4 — поверхность скола; 5 — *p-n*-переход; 6 — главный лепесток излучения

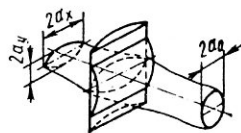


Рис. 5.9. Преобразование эллиптического гауссового светового пучка в круговой скрещенными цилиндрическими линзами

Поскольку ППЛ генерируют сравнительно узкий спектр излучения ($\Delta\lambda \approx 1$ нм), они имеют широкую полосу пропускания (обычно более 500 МГц). Информационная пропускная способность ВОЛС, использующих многомодовые ППД в качестве источника света, превышает 300 Мбит/с и доходит до десятков Гбит/с при применении одномодовых и одночастотных ППЛ.

Проблема надежности и долговечности ППЛ в настоящее время еще не решена в полной мере. Пока еще не созданы ППЛ с высоким КПД и сроком службы, удовлетворяющим требованиям ВОЛС, а именно 10^5 ч.

Таким образом, как источники света инжекционные ППЛ наиболее перспективны для ВОЛС. Однако существует целый ряд нерешенных проблем для получения лазеров с требуемыми характеристиками: сложность обеспечения требуемой структуры, большого срока службы (особенно при температурах порядка $50-70^\circ\text{C}$), стабильности характеристик во времени и линейности оптических характеристик, снижения порогового тока. В настоящее время разрабатываются ППЛ с токами возбуждения 1 мА, что повысит долговечность и позволит упростить схемы электронного облучения лазера [21, 22].

§ 5.3. Модуляция света

Модуляция излучения волн в оптическом диапазоне сводится к изменению одного из следующих его параметров: амплитуды, фазы, интенсивности, поляризации колебаний несущей частоты при непрерывном режиме генерации или длительности импульсов при импульсном режиме генерации источников излучения в соответствии с передаваемым информационным сигналом. В связи с этим различают амплитудную, частотную, фазовую модуляции, а также модуляцию интенсивности [22].

Основные требования, предъявляемые к оптическим модуляторам для ВОЛС, следующие: широкополосность, линейность модуляционной характеристики, большой динамический диапазон, отсутствие нелинейных искажений и экономичность потребления электроэнергии.

Существуют два основных метода модуляции излучения источников света: прямой и внешний. *Прямая модуляция* состоит в модуляции тока накачки источника, например прямая модуляция ППЛ осуществляется посредством управления током инжекции. *Внешняя модуляция* заключается в модуляции излучения. Внешний модулятор представляет собой кристалл, у которого показатель преломления либо поглощение световой волны изменяется с помощью модулирующего сигнала. При этом используются физические явления, основанные на электрооптических, магнитооптических и акустооптических эффектах [22].

Для спонтанных источников света, каким является СИД, применима только прямая модуляция интенсивности. Излучение СИД может быть премодулировано с малыми искажениями в полосе частот до 300 МГц.

Модуляцию излучения ППЛ можно осуществлять путем модуляции тока инжекции как гармоническим, так и импульсным сигналами вплоть до частот СВЧ-диапазона. Однако при высоких частотах модуляции (более 300 МГц) наблюдается резонанс между инжектируемыми носителями заряда и электрическим полем. Наличие резонанса приводит к искажению как формы световых сигналов, так и линейности модуляционной характеристики ППЛ. Модуляционной характеристикой СИД является зависимость мощности излучения P от тока инжекции I , которая практически линейна вплоть до насыщения:

$$P = k(I - I_s), \quad (5.8)$$

где I_s — пороговый ток; k — коэффициент пропорциональности.

Следовательно, ППЛ может быть промодулирован по интенсивности с линейной модуляционной характеристикой в зависимости от $I - I_s$.

При разработке ВОЛС предпочтение отдается импульсно-кодовой модуляции (ИКМ). Передаваемое сообщение преобразуется в последовательность токовых импульсов, принимающих квантовые значения «0» или «1». Эти импульсы модулируют ток инжекции ППЛ, в результате чего преобразуются в квантовую последовательность световых импульсов. Предельная частота их следования определяет скорость передачи информации в ВОЛС.

На рис. 5.10 представлена структурная схема цифровой ВОЛС [21]. Модулятор 1 осуществляет модуляцию тока инжекции ЛД в соответствии со входным сигналом, подлежащим передаче. Световые импульсы, генерируемые ЛД, вводятся в световод 2, распространяются по нему и поступают на вход приемника. Приемная часть ВОЛС состоит из лавинного фотодиода (ЛФД), широкополосного усилителя 3, схемы фильтрации 6, ИКМ-регенератора 5 и блока предобработки сигнала 4. ЛФД, непосредственно подключенный к световоду, преобразует пришедшие световые импульсы в электрические сигналы — импульсы тока. Последующий усилитель, имеющий высокоомный входной контур, усиливает эти сигналы с малыми шумами. В схеме фильтрации усиленные импульсы формируются так, чтобы ИКМ-регенератор, несмотря на имеющиеся шумовые помехи, мог с максимальной надежностью решить, пришел импульс или нет. ИКМ-регенератор формирует импульсы с заданными частотой и фазой.

Затухание и искажения оптического сигнала в световолокне, а также ограниченная чувствительность ЛФД ограничивают расстояние между передатчиком и приемником. Поэтому цифровые ВОЛС обычно имеют промежуточные ретрансляторы, которые устраняют помехи и искажения, происшедшие в предыдущем участке, и посылают в следующий участок линии световые импульсы с первоначальными формой и

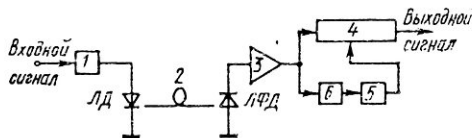


Рис. 5.10. Структурная схема цифровой оптической системы передачи информации

Параметр	Источник света ($\lambda=0,9$ мкм)		
	ППЛ	СИД	СИД
Тип волокна	ОМВС	ММВС	ММВС
Мощность передатчика в импульсе	10	10	3
$P_{и}/\eta_c$, мВт			
Ширина импульса	2,5	5	10
Эффективность возбуждения η_c , %	50	90	1,3
Расстояние между ретрансляторами (при затухании 5 дБ/км и вероятности ошибки менее 10^{-8} на бит), км	9,4	10,7	6,8

положением во времени. Ретранслятор обрабатывает сигналы в видеополосе; он включает в себя фотодетектор, электронный усилитель, схему фильтрации, ИКМ-регенератор и источник света, т. е. по существу представляет собой приемник, выходной сигнал которого управляет непосредственно источником световых импульсов для следующего участка линии передачи информации.

Параметры ВОЛС, выпускаемых в настоящее время промышленностью, приведены в табл. 5.2 [21, 22].

Если сигнал, подлежащий передаче, является аналоговым, то его необходимо перевести в цифровую форму (рис. 5.11). Это осуществляется

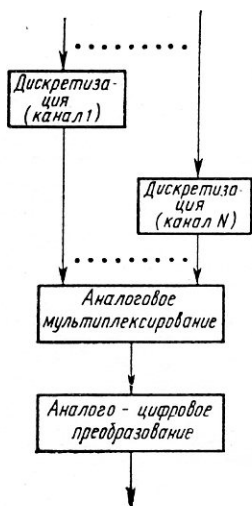


Рис. 5.11. Схема получения цифрового сигнала при ИКМ

путем дискретизации (уплотнения дискретизированных импульсов, соответствующих разным каналам) и аналого-цифрового преобразования. Временной аналоговый сигнал дискретизируется отдельно по каждому каналу при частоте следования стробирующих импульсов, в 2 раза превышающей верхнюю частоту спектра сигнала. При этом, согласно теореме Котельникова — Шеннона, дискретный сигнал содержит всю информацию об исходном аналоговом сигнале. Например, при телефонной связи с применением ИКМ, передаваемый сигнал охватывает спектр частот 300—3400 Гц, поэтому частоту дискретизации выбирают несколько выше 7000 Гц. С помощью мультиплексора осуществляется уплотнение сигналов с разделением каналов во времени следующим образом: в свободном интервале между двумя последовательными импульсами одного канала размещаются дискретизированные импульсы других каналов, которые, следуя друг за другом, образуют новую последовательность из N импульсов. Амплитуды импуль-

сов, полученных в результате дискретизации, подвергаются квантованию и кодированию в двоичном коде с помощью АЦП. Каждый уровень квантования обычно представляется восьмиразрядным двоичным числом, так что возможны $2^8 = 256$ уровней квантования.

Для восстановления аналогового сигнала из цифрового указанные операции выполняют в обратной последовательности: цифро-аналоговое преобразование, разделение каналов с помощью демультимплексора и низкочастотная фильтрация [21].

§ 5.4. Фотодетекторы

Фотодетекторы в ВОЛС преобразуют выходной оптический сигнал в электрический, который затем может быть подвергнут обработке электронными схемами. В идеальном случае фотодетектор должен точно воспроизводить форму принимаемого сигнала, обеспечивать максимальную мощность выходного электрического сигнала при заданной оптической мощности, а также иметь небольшие размеры, быть высоконадежным и недорогим. Существующие фотодетекторы не удовлетворяют перечисленным требованиям, но их рабочие характеристики позволяют реализовать на практике ВОЛС, которые разрабатываются в настоящее время.

В оптических линиях связи наибольшее распространение получили полупроводниковые фотодиоды (ФД). Физические процессы, протекающие в полупроводниковых ФД, обратны процессам, протекающим в источниках света. В *p-n*-переходе, на который подается обратное смещение, существует обедненная зона, в которой отсутствуют свободные носители заряда. Фотоны с достаточно большой энергией, попадающие в эту зону, выбивают электроны из валентной зоны. Последние переходят в зону проводимости, в результате чего образуется пара свободных носителей заряда (электрон-дырка), которые, перемещаясь за границы обедненной зоны, образуют фототок. Если электрическое поле в обедненной зоне достаточно сильное, то ускоренные им носители заряда могут приобрести энергию, равную энергии ионизации, и выбить другие носители заряда, которые, в свою очередь, также ионизируют атомы и т. д., так что концентрация носителей заряда будет лавинно нарастать.

Характеристики ФД зависят от материала, конфигурации и структуры *p-n*-перехода, а также от приложенного напряжения. Материал определяет коэффициент поглощения света и квантовый выход. Квантовый выход $\eta_{\text{ФД}}$ измеряется числом пар электрон-дырка, образовавшихся в результате поглощения одного фотона, т. е. по существу представляет собой КПД фотоприемника. При лавинном усилении ширина обедненного слоя зависит от внешнего напряжения и удельного сопротивления материала, причем, чем больше ширина обедненного слоя, тем меньше емкость *p-n*-перехода и тем меньше постоянная времени ПФД, а следовательно, тем больше его быстродействие. Основной характеристикой ПФД является чувствительность $S_{\text{ФД}}$, измеряемая

полным КПД преобразования световой мощности в электрический ток. Чувствительность прямо пропорциональна квантовому выходу; она также зависит от длины волны падающего излучения.

В качестве материала для ПФД наиболее широкое применение находят три полупроводника: кремний, германий и арсенид галлия. Германиевые ФД работают при $\lambda > 1,6$ мкм, кремниевые — при $\lambda < 1,1$ мкм, а арсенид-галлиевые — при $\lambda < 0,9$ мкм. В большинстве существующих систем связи, работающих в области длин волн 0,8—0,9 мкм, используются кремниевые ФД, которые достаточно хорошо отработаны, обладают удовлетворительными характеристиками, высокой надежностью и довольно дешевы. В системах связи, работающих в длинноволновой области спектра (1,3—1,6 мкм), применяются германиевые ФД. Однако они пока еще не столь совершенны, как кремниевые ФД. На рис. 5.12 представлена спектральная характеристика германиевого ФД, которая наглядно показывает, что максимум чувствительности приходится на $\lambda \approx 1,6$ мкм.

Из множества типов ФД, различающихся структурой и значением внешнего напряжения, наиболее распространены *P-i-n*-ФД и лавинные ФД. Если между слоями *p*- и *n*-типа с малым удельным сопротивлением ввести слой *i*-типа с большим удельным сопротивлением, почти равным собственному удельному сопротивлению материала, то получают *p-i-n*-ФД. В таком ФД на каждый поглощенный фотон рождается одна электронно-дырочная пара, что обеспечивает квантовый выход, близкий к единице. Эти ФД просты по своей структуре, обладают хорошей линейностью в широком динамическом диапазоне (от нескольких пиковатт до десятков милливольт), а главное дешевы. Для лавинных ФД характерно наличие внутреннего усиления. За счет лавинной ионизации на каждый фотон рождается более одной электронно-дырочной пары. Такой процесс усиления называется *лавинным умножением*. Этот процесс является статистическим, в ходе которого вторичные носители заряда имеют случайный характер, вследствие чего возникает дополнительный шум, называемый *дробовым*.

Выбор типа ФД для ВОЛС диктуется необходимостью минимизации принимаемого оптического сигнала, требуемой для получения заданного отношения сигнал/шум. Как известно, шум ФД складывается из шума входного усилителя и дробового шума. Если требуемое отношение сигнал/шум мало, то определяющим является уровень шума приемного усилителя, в противном случае шум усилителя становится менее важным и первичным становится дробовый шум.

В лавинных ФД за счет возрастания тока сигнала при заданных параметрах усилителя мощность оптического сигнала, необходимая для получения заданного отношения сигнал/шум, снижается пропор-

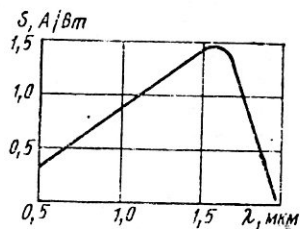


Рис. 5.12. Спектральная характеристика германиевого ФД

дионально коэффициенту лавинного умножения. Чувствительность лавинного ФД намного выше чувствительности $p-i-n$ -ФД. Однако дальнейшее увеличение чувствительности лавинного ФД ограничивается темновым током. Например, если необходимо получить чувствительность приемника 60 дБ при первичном фототоке сигнала $I \approx 1$ нА, то темновой ток до усиления не должен превышать 0,1 нА. Малейшее увеличение темнового тока приводит к снижению чувствительности приемника.

К недостаткам лавинных ФД следует отнести также и то, что они работают при более высоких напряжениях, чем $p-i-n$ -ФД, поскольку требуют создания сильного поля в области $p-n$ -перехода. Рабочее напряжение кремниевых лавинных ФД достигает сотен вольт, тогда как $p-i-n$ -ФД работают при более низких напряжениях.

Простота применения $p-i-n$ -ФД позволяет использовать их в тех случаях, когда они удовлетворяют требованиям по чувствительности или свойства полупроводникового материала ограничивают эффективную работу лавинного ФД.

В последнее время наблюдается тенденция к интеграции оптоэлектронных элементов. Для интеграции фотоприемных модулей ФД его электронное обрамление изготавливают из того же полупроводникового материала, что и ФД, например кремния. В интегральном приемном модуле ВОЛС последовательно соединяют ФД, предусилитель, усилитель и устройство обработки сигнала. В настоящее время созданы однокристалльные оптические приемники на кремниевом $p-i-n$ -ФД с оптической чувствительностью 20 дБ при скорости передачи 165 Мбит/с (коэффициент ошибок по битам менее 10^{-11}). Интеграция передающего модуля представляет более сложную задачу. Получены и успешно испытаны первые образцы и таких модулей (рис. 5.13), которые изготавливают следующим образом. В подложке из арсенида галлия методом анизотропного травления создают трапециевидные канавки глубиной 10—15 мкм и шириной 300—400 мкм. На пластине проводят эпитаксиальное выращивание слоев, образующих активную лазерную структуру, после чего селективно стравливают их пластины, исключая канавки; на свободной поверхности формируют МОП-интегральные схемы возбуждения лазера [21, 22].

§ 5.5. Перспективы развития волоконно-оптических систем передачи данных для ЭВМ

Быстродействие и производительность центральных устройств ЭВМ в последние десятилетия продолжают расти. Ожидается, что в конце 80-х годов быстродействие универсальных процессоров превысит совре-

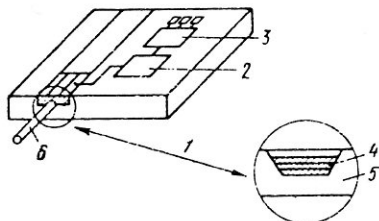


Рис. 5.13. Схема передающего модуля в интегральном исполнении: 1 — лазер; 2 — модулятор; 3 — мультиплексор; 4 — активная область генерации лазера; 5 — GaAs-подложка; 6 — световолокно

менные скорости обработки данных в десятки раз. Если архитектура систем и структура программного обеспечения останутся прежними, то производительность устройств ввода — вывода (УВВ) также должна возрасти на порядок и более. Такой прогноз означает существенное повышение требований к канальным соединениям как по скорости передачи данных, так и по длине линий. Следовательно, необходимо либо увеличить скорость передачи данных до 1 Гбит/с за счет развития технологии изготовления линий, либо значительно увеличить число каналов и УВВ. Разработчики ЭВМ видят наилучшее решение в применении волоконно-оптических систем передачи данных и новых правил обмена данными, разработанных для высокоскоростной последовательности передачи.

Современные крупные вычислительные системы (ВС) содержат огромное число соединений: от микронных проводников интегральных микросхем сверхбольшой степени интеграции (СБИС) до наземных линий связи в вычислительных сетях, общая длина которых достигает тысяч километров. Скорость передачи информации по этим соединениям изменяется также в широком диапазоне — от 100 бит/с в линии связи с печатающим устройством до сотен мегабит в секунду во внутренних соединениях микросхем. Свойства ВОЛС представляют определенный интерес с точки зрения усовершенствования большинства таких соединений.

Наиболее вероятная область применения волоконной оптики в ВС — межблочные соединения и каналы данных. Использование световодов при внутриблочном монтаже нецелесообразно, поскольку преобразования электрического сигнала в оптический и обратно приводят к значительным временным задержкам, а оптические и электрооптические материалы в настоящее время еще несовместимы с технологией изготовления ИС. Немногие современные ВС выиграют, если их соединения просто заменить световодами (исключение составляют линии связи, требующие повышенной защиты от шумов). Это объясняется особенностями существующих правил обмена данными. Например, в ЕС ЭВМ интерфейс между каналом и блоком управления устроен таким образом, что после получения каждого байта информации приемник должен выдать сигнал подтверждения. Такой подход обеспечивает высокую надежность передачи сообщений, однако суммарные временные задержки уменьшают скорость передачи. При таком высоконадежном средстве передачи, как оптическое волокно, необходимо формировать более длинные пакеты данных и уменьшить число сигналов подтверждения. Поэтому перспективным направлением в разработке ВОЛС для ЭВМ является эффективное использование большой полосы пропускания световолокон путем введения новых правил обмена данными.

Для того чтобы волоконно-оптическая аппаратура соответствовала возможностям центральных устройств ВС, она должна обеспечивать более высокую производительность, чем предполагает современное состояние промышленной технологии производства оптических воло-

кон. Скорости передачи данных должны соответствовать самым высоким скоростям, встречающимся в устройствах дальней связи, хотя расстояния будут существенно меньше. В качестве источников излучения будут применяться быстродействующие ППЛ, а в качестве приемников — кремниевые *p-i-n*-ФД, полевые транзисторы на GaAs или биполярные фототранзисторы. Основные технологические задачи связаны с надежностью и стоимостью лазеров. Лазер должен работать в течение 5 л при температуре окружающей среды до 50° С. Среднее время наработки на отказ существующих ППЛ при такой температуре составляет около 10⁴ ч. Современные лазеры стоят дорого, что обусловлено главным образом малым объемом выпускаемой продукции. Однако можно надеяться, что с увеличением объема производства лазеров их стоимость уменьшится, а надежность возрастет до приемлемых значений.

Качество передачи в линиях должно быть выше уровня, необходимого в системах дальней связи. Требования к существующим каналам, согласно которым допускается не более одной нераспознанной ошибки в день, не представляются завышенными. Если учесть скорость передачи данных в канале, такое требование ограничивает коэффициент ошибок по битам (10⁻¹¹ — 10⁻¹³). Общеизвестно, что световолокно невосприимчиво к электромагнитным воздействиям, однако до сих пор неизвестно, можно ли внутри оборудования достаточно надежно экранировать от электромагнитных воздействий оптические приемники, которые более чувствительны к наводкам, чем медные проводники. Независимо от наличия защиты приемники и передатчики ВОЛС должны быть конструктивно совместимы с выполненными на печатных платах малогабаритными типовыми модулями, которые применяются в электронном оборудовании ВС.

Исследования по дальнейшему повышению скорости передачи информации по световолокну применительно к системам передачи данных ЭВМ ведутся в следующих направлениях:

1) совершенствования градиентных ММВС с целью максимального уравнивания скоростей распространения различных мод для того, чтобы добиться пропускной способности порядка 50 ГГц/км;

2) преодоления технических трудностей, связанных со вводом излучения и стыковкой при переходе на высококачественные кварцевые ОМВС, позволяющие довести пропускную способность до 100 ГГц/км и более;

3) взаимной компенсации хроматической и межмодовой дисперсий, которые при близости по абсолютному значению могут отличаться по знаку;

4) использования нелинейных оптических эффектов, позволяющих при достаточно больших плотностях оптической мощности возбудить в световолокне солитонный режим, когда импульс распространяется без уширения.

Теоретические оценки показывают, что это позволит достигнуть терабитных скоростей передачи данных, т. е. свыше 1000 ГГц/км.

Новые возможности применения ВОЛС для сетей ЭВМ откроются в случае успешного перехода от систем прямого усиления к супергеродиному приему, что приведет к резкому повышению помехоустойчивости и увеличению дальности передачи до 200 км и более.

При создании ВОЛС для ВС и сетей ЭВМ одной из важнейших проблем является проблема распределения данных. Наиболее перспективным для использования в ВС считается устройство последовательного распределения данных с Т-образной и звездообразными ответвлениями (рис. 5.14). Основное ограничение на построение таких систем распределения данных налагают потери света в разветвителях. Другой тип ответвления — это создание дуплексной ВОЛС, использующей один оптический кабель (рис. 5.14, г). Ответвители в линии такого типа представляют собой стеклянные стержни диаметром 2—3 мм. Фокусировка луча света в стержне осуществляется за счет параболического распределения показателя преломления вдоль радиуса сечения стержня. Применение дуплексной ВОЛС позволяет вдвое уменьшить длину оптического кабеля. Если необходимо подключить большое число выводов, оптимальным вариантом использования ВОЛС является пассивное соединение звездой главным образом потому, что такая конфигурация содержит один узел, а в системах с ограниченным запасом мощности потери в узлах имеют решающее значение.

Соединения между устройствами ВС, предназначенных для передачи, можно разделить на каналы вывода — вывода и сети связи. В больших современных ВС, например ЕС ЭВМ, операции ввода — вывода выполняются с помощью устройств, называемых каналы ввода — вывода

(КВВ). КВВ представляет собой процессор, подключенный непосредственно к основной памяти ЭВМ; он осуществляет полное управление вводом — выводом в соответствии с командами ЦП. Каждый канал содержит интерфейс для ряда блоков управления вводом — выводом, которые предназначены для управления устройствами ввода — вывода (УВВ) и организации обмена данными между УВВ и каналом. Современные крупные ВС могут иметь в своем составе до 16 каналов, причем к каждому каналу можно подключить до 8 блоков УВВ, а каждый блок управления может обслуживать одно или более УВВ, таких,

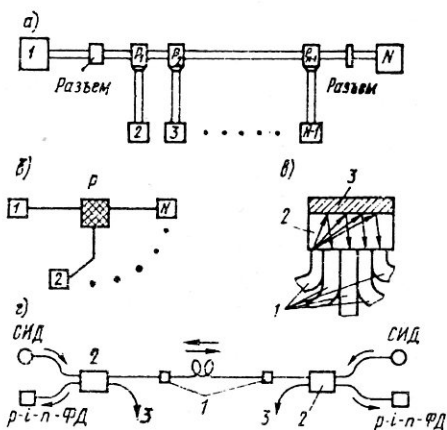


Рис. 5.14. Схемы волоконно-оптических систем распределения данных:

а — Т-образное ответвление; б — ответвление типа звезда; в — разветвитель; Р — полужоки; 2 — стеклянный смеситель; 3 — зеркало; г — дуплексная ВОЛС со стеклянными ответвителями; 1 — разъем; 2 — разветвитель; 3 — монитор

как дисплей, печатающее устройство (АЦПУ), накопители на магнитных дисках и лентах (НМД и НМЛ). На рис. 5.15 показана структура КВВ, типичная для современных ВС. Интерфейс между каналом и блоками управления представляет собой параллельную шину, которая состоит из 48—72 коаксиальных линий, объединенных в два или три кабеля. Скорость передачи данных в канале достигает 3 Мбайт/с. Диаметр обычного кабеля 2,5 см, а размер типичного разъема 10 см. Полная длина кабеля в каждом канале ограничена электрическими параметрами системы; она не превышает 61 м. Такая линия обеспечивает высокую надежность передачи данных. Однако ей присущ ряд принципиальных недостатков: большой объем и масса кабеля; ограниченная длина; сложность монтажа и изменения конфигурации линии при случайных нарушениях контакта в разъеме.

Преимущества малогабаритных ВОЛС, обеспечивающих высокую скорость передачи данных при невосприимчивости к внешним воздействиям, делают их наиболее перспективными при создании КВВ будущих высокопроизводительных ЭВМ и ВС. Более того, малые потери энергии и менее жесткие ограничения на длину оптического канала позволяют расширить границы применения быстродействующих каналов и перейти от масштабов машинного зала к масштабам целого предприятия. Наиболее важные блоки хранения данных можно установить в защищенных местах, а процессоры, расположенные в изолированных помещениях здания, могут быть подключены с помощью быстродействующих ВОЛС, которые заменят используемые в настоящее время низкоскоростные линии дистанционной обработки данных. Расположение блоков в машинном зале будет определяться только соображениями удобства, а не ограничениями на длину кабеля, что часто имеет место в настоящее время.

Объединение нескольких процессоров позволит равномерно распределить их рабочую нагрузку и повысить надежность системы, причем все процессоры совместно используют УВВ и память. В этом случае не только увеличится число соединений, но появится также потребность в статической и динамической коммутациях линий канала. Большое число линий, которые необходимо одновременно коммутировать в современных интерфейсах, обуславливает значительную стоимость таких операций, поэтому реальное число узлов коммутации оказывается меньшим, чем требуется для оптимальной работы системы. Если

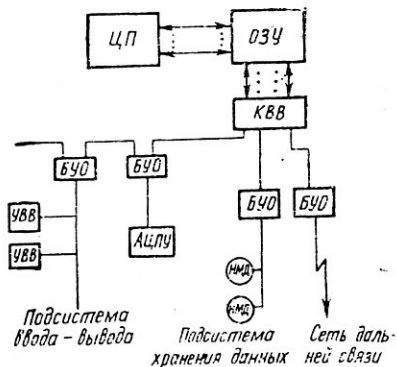


Рис. 5.15. Структурная схема каналов ввода—вывода ЭВМ:

БУО — блок управления обменом данных; АЦПУ — алфавитно-цифровое печатающее устройство; УВВ — устройства ввода-вывода; НМД — накопитель на магнитных дисках

передача данных ведется на оптической несущей, то ослабляются шумы и перекрестные помехи, характерные для быстродействующих широкополосных переключателей. Благодаря этому можно создать объединенные оптические линии передач, позволяющие реализовать необходимые переключения.

Перспективно применение ВОЛС при создании сетей связи ЭВМ. Сначала рассмотрим локальные сети. Под локальной сетью понимают совокупность соединений, которые находятся внутри здания или на территории комплекса зданий. Такая сеть может обслуживать терминалы, соединенные с центральной ЭВМ, удаленные устройства управления процессорами промышленного производства, а также осуществлять связь с другими системами. Окружающая среда, в которой функционирует локальная сеть, может обладать такими неблагоприятными факторами, как электромагнитные помехи, электростатические разряды, корродирующие агенты в атмосфере, а также ограниченность пространства, отведенного под кабельный канал. Протяженность сетей иногда достигает нескольких километров; они имеют от десятков до сотен узлов, а расстояния между узлами составляют порядка километра. В настоящее время требуемая скорость передачи данных обычно не превышает 1 Мбит/с. Сети, выполненные на световолокнах, способны полностью удовлетворять этим условиям благодаря широкой полосе пропускания, невосприимчивости к шумам и внешним воздействиям, защищенности от несанкционированного доступа, малым размерам и массе кабеля. Многие ВОЛС, используемые в настоящее время в системах обработки данных, включены в структуру локальных сетей главным образом потому, что они устойчивы по отношению к воздействиям внешней среды. Применение ВОЛС значительно уменьшает объем линий связи, не внося при этом логических усложнений и не ухудшая оптимальное время отклика таких соединений. Например, замена 144 волоконными кабелями того же числа аналогично уложенных 144 коаксиальных кабелей позволит в 40 раз уменьшить площадь сечения кабельного канала, предназначенного для размещения линий связи с терминалами.

ГЛАВА 6

КОГЕРЕНТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АНАЛОГОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

§ 6.1. Когерентный аналоговый оптический процессор, использующий методы пространственной фильтрации

Основными компонентами оптических систем обработки информации, как и систем, формирующих изображения, являются тонкие сферические линзы (рис. 6.1), выполняющие двумерное преобразование Фурье. Входная и выходная плоскости системы совпадают с передней

и задней фокальной плоскостями линзы. Если на вход такой системы поступает оптический сигнал $U_I(x_I, y_I)$, то на выходе появляется сигнал, связанный со входным сигналом следующим соотношением:

$$U_H(x_H, y_H) = \frac{1}{i\lambda f} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_I(x_I, y_I) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda f}(x_H x_I + y_H y_I)\right] dx_I dy_I = k_{IH} U_I\left(\frac{x_H}{\lambda f}, \frac{y_H}{\lambda f}\right). \quad (6.1)$$

Таким образом, выходной сигнал рассматриваемой простейшей оптической системы с точностью до постоянного множителя совпадает с фурье-образом входного сигнала. Поэтому выходную плоскость такой системы называют спектральной или фурье-плоскостью. Пространственно-частотные координаты ξ и η в этой плоскости определяются соотношениями:

$$\xi = x_H/(\lambda f); \quad \eta = y_H/(\lambda f). \quad (6.2)$$

Следует отметить, что фурье-образ входного оптического сигнала существует в виде физически реального пространственного распределения комплексных амплитуд света. Благодаря этому когерентные оптические системы могут быть эффективно использованы для решения широкого круга задач, связанных с получением, преобразованием и обработкой фурье-спектров, корреляционных функций и свертков [23].

Поскольку фурье-образы двумерных оптических сигналов реализуются в виде реальных физических сигналов с помощью простейшей оптической системы, над ними можно производить различные математические операции методами пространственной фильтрации. Оптическая система обработки информации методами пространственной фильтрации (рис. 6.2) состоит из следующих компонентов: источника света, двух последовательно расположенных простейших систем преобразования Фурье, устройства ввода информации, пространственного операционного фильтра и детектора выходных сигналов. Устройство ввода информации, операционный фильтр и детектор выходных сигналов располагаются соответственно во входной (x_I, y_I) , спектральной (x_H, y_H) и выходной (x_D, y_D) плоскостях системы. Заметим, что в этих плоскостях приняты одинаковые масштабы.

Рассмотрим прохождение оптического сигнала через искомую систему. Свет от точечного когерентного источника S коллимируется линзой L_1 и направляется во входную плоскость системы. Таким образом входная плоскость системы освещается плоской

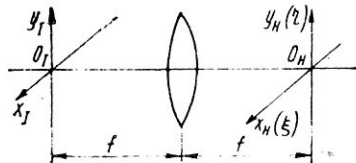


Рис. 6.1. Схема оптической системы, осуществляющей преобразование Фурье

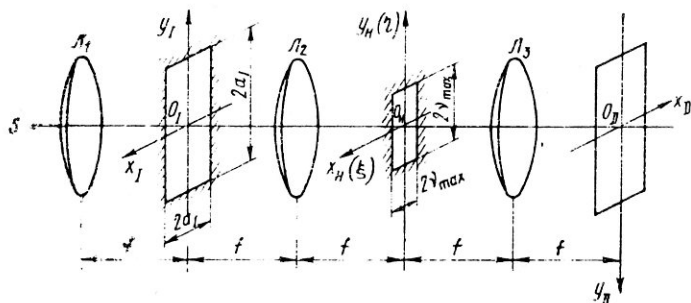


Рис. 6.2. Схема когерентной оптической системы пространственной фильтрации

световой волной амплитудой A . Во входной плоскости, как уже отмечалось, располагается устройство ввода информации, которое представляет собой транспарант, в частности УТ (см. § 3.3). Устройство ввода формирует изображение, соответствующее входной информации $U_1(x_1, y_1)$, так что его можно характеризовать амплитудной функцией пропускания $t_1 = k_1 U_1(x_1, y_1)$. Следовательно, входной оптический сигнал системы имеет комплексную амплитуду:

$$U_1^{(+)} = k_1 A U_1(x_1, y_1). \quad (6.3)$$

Линза L_2 осуществляет преобразование Фурье (6.3), поэтому в спектральной плоскости системы непосредственно перед операционным фильтром распределение комплексных амплитуд света пропорционально фурье-образу входного сигнала, т. е.

$$U_H^{(+)}(\xi, \eta) = \frac{k_1 A}{i\lambda f} U_1(\xi, \eta). \quad (6.4)$$

Амплитудный коэффициент пропускания операционного фильтра

$$t_H = k_H H(\xi, \eta), \quad (6.5)$$

где k_H — комплексная константа.

Функция $H(\xi, \eta)$ соответствует математической операции, которую необходимо выполнить над входным сигналом, ее называют *передаточной функцией фильтра*. В результате пространственной фильтрации получается сигнал, описываемый распределением комплексных амплитуд:

$$U_H^{(+)}(\xi, \eta) = \frac{k_1 k_H A}{i\lambda f} U_1(\xi, \eta) H(\xi, \eta). \quad (6.6)$$

Отфильтрованный сигнал подвергается повторному преобразованию Фурье с помощью линзы L_3 . В результате в выходной плоскости системы свет будет иметь распределение:

$$U_D(x_D, y_D) = k \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_I(\xi, \eta) H(\xi, \eta) \exp [2\pi i (x_D \xi + y_D \eta)] d\xi d\eta;$$

$$k = -\frac{k_I k_H A}{(\lambda f)^2}. \quad (6.7)$$

Направления координатных осей в выходной плоскости системы выбраны противоположно направлениям осей координат во входной плоскости для того, чтобы учесть инверсию, которая получается в результате двух последовательных преобразований Фурье и выражается соотношением $\mathcal{F}\{\mathcal{F}[U(x, y)]\} = U(-x, -y)$. Соотношение (6.7) можно записать в виде свертки:

$$U_D(x_D, y_D) = k U_I(x_I, y_I) * h(x, y) =$$

$$= k \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_I(x_I, y_I) h(x_I - x_D, y_I - y_D) dx_I dy_I, \quad (6.8)$$

где $h(x, y)$ — обратное преобразование Фурье передаточной функции фильтра. Таким образом, оптическая система, представленная на рис. 6.2, способна выполнять линейные интегральные преобразования типа свертки, описываемые уравнением (6.8). В частном случае, когда $H(\xi, \eta) \equiv 1$, искомая система превращается в систему, создающую изображение входного сигнала. Действительно, при этом $h(x, y) = \delta(x, y)$. Из уравнения (6.1) следует, что $U_D(x_D, y_D) = k U_I \times (x_D, y_D)$.

При выводе основного соотношения (6.8), связывающего вход и выход оптической системы, не учитывалась конечность полосы пропускания системы. Ширина полосы пропускания реальной системы ограничена эффектом виньетирования, обусловленным конечностью размера апертуры линзы, что учитывают введением в спектральную плоскость идеальной системы диафрагмы, пропускающей свет только в пределах квадратной области размером $2v_{\max}$ (см. рис. 6.2). В математических соотношениях это ограничение можно учесть, применяя модификацию передаточной функции фильтра:

$$H'(\xi, \eta) = H(\xi, \eta) \operatorname{rect}\left(\frac{\xi}{2v_{\max}}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{\eta}{2v_{\max}}\right). \quad (6.9)$$

Для системы, создающей изображение при $H(\xi, \eta) \equiv 1$, получим

$$H'(\xi, \eta) = \operatorname{rect}\left(\frac{\xi}{2v_{\max}}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{\eta}{2v_{\max}}\right);$$

$$h(x, y) = 4v_{\max}^2 \operatorname{sinc}(2v_{\max} x) \operatorname{sinc}(2v_{\max} y).$$



Профессор С. А. Майоров (второй справа) председательствует на торжественном заседании Ученого совета ЛИТМО по случаю 60-летия ректора вуза С. П. Митрофанова (второй слева). 1975 год