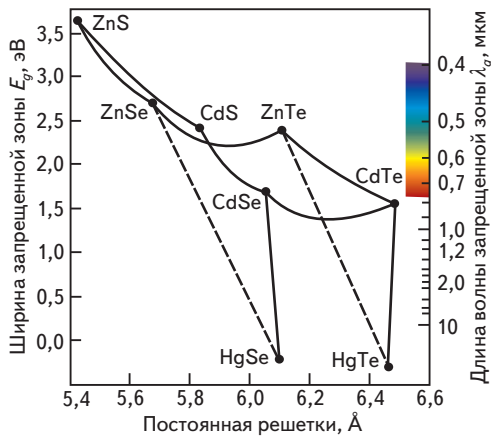
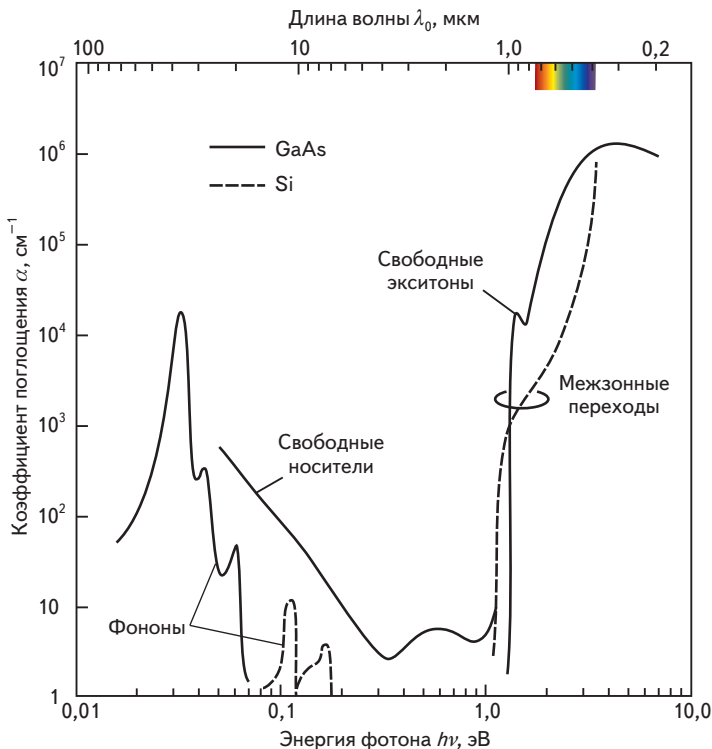


**Рис. 16.7.** Ширины и длины волн запрещенной зоны и постоянные решетки для Si, Ge, SiC и 12 двухкомпонентных соединений  $A^{III}B^V$ . Сплошные и штриховые линии соответствуют прямозонным и непрямозонным полупроводникам. Один и тот же материал может быть прямозонным или непрямозонным в зависимости от соотношения компонентов. Трехкомпонентные материалы представлены линиями, соединяющими два двухкомпонентных материала. Четырехкомпонентным материалам соответствуют участки поверхности, образованные их двухкомпонентными составляющими:

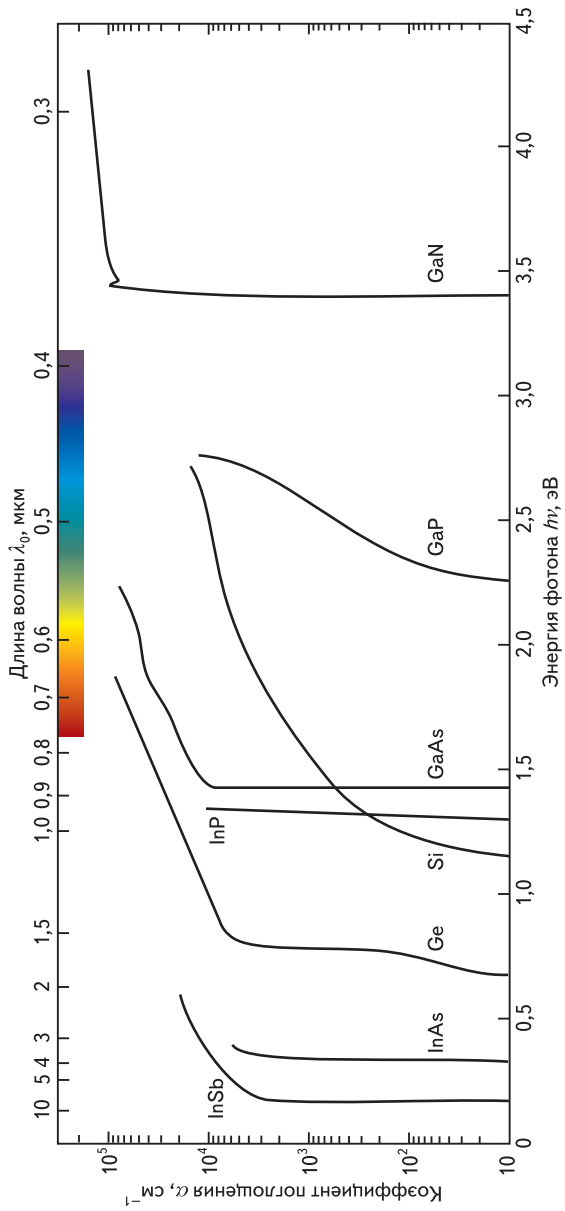
$a$  —  $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$  представлен участком, окрашенным в светло-серый цвет, вершины его границы представляют InP, InAs, GaAs и GaP. Участок, изображающий  $(Al_xGa_{1-x})_{1-y}P_y$ , окрашен в темно-серый цвет и имеет вершины, представляющие AlP, InP и GaP. Оба являются важными четырехкомпонентными соединениями для фотоники, первый — в ближнем ИК, а второй — в видимом диапазоне.  $Al_xGa_{1-x}As$  представлен точками вдоль линии, соединяющей GaAs и AlAs. При изменении  $x$  от 0 до 1 изображающая точка движется вдоль линии от GaAs к AlAs. Поскольку эта линия практически вертикальна, решетка  $Al_xGa_{1-x}As$  такая же, как у GaAs;  $b$  — хотя III-нитрид  $In_xGa_{1-x}N$  в принципе может за счет изменения состава перекрыть весь видимый спектр, этот материал трудно выращивать, когда содержание In становится заметным.  $In_xGa_{1-x}N$  главным образом используется в зеленой, синей и фиолетовой области, тогда как  $Al_xGa_{1-x}N$  и  $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$  — в ультрафиолетовой области. Все эти соединения являются прямозонными полупроводниками



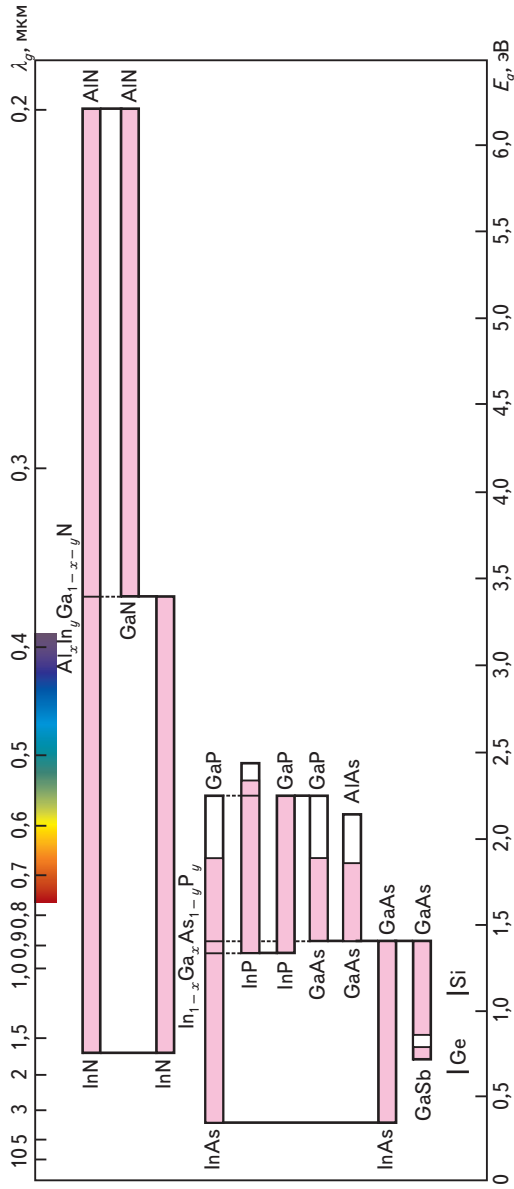
**Рис. 16.8.** Ширины и длины волн запрещенной зоны и постоянные решетки для различных полупроводников II–VI групп (HgSe и HgTe являются полуметаллами с малой отрицательной шириной запрещенной зоны). HgTe и CdTe имеют почти одинаковые решетки, что видно по вертикальности соединяющей их линии, поэтому трехкомпонентный полупроводник  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  можно выращивать без напряжений на подложке CdTe. Это важный материал для фотоприемников в средней ИК-области спектра



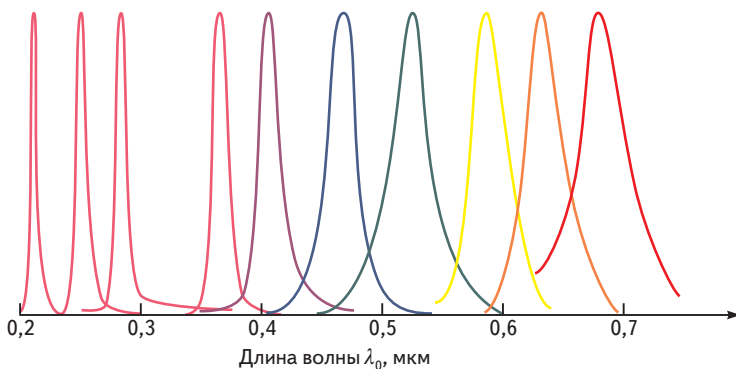
**Рис. 16.31.** Наблюдаемые оптические коэффициенты поглощения  $\alpha$  в зависимости от энергии и длины волны фотона для Si и GaAs в состоянии теплового равновесия при  $T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$ . Ширина запрещенной зоны  $E_g$  составляет 1,12 эВ для Si и 1,42 эВ для GaAs. Кремний сравнительно прозрачен в области  $\lambda_0$  от 1,1 до 12 мкм, тогда как собственный GaAs — в области от 0,87 до 12 мкм (см. рис. 5.84)



**Рис. 16.32.** Коэффициент поглощения в зависимости от энергии и длины волны фотона для Ge, Si, GaAs, GaN и некоторых других двухкомпонентных полупроводников III–V групп при  $T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$  в увеличенном масштабе

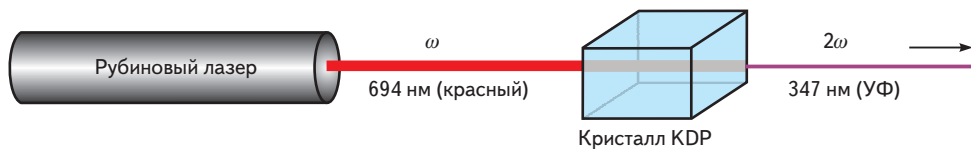
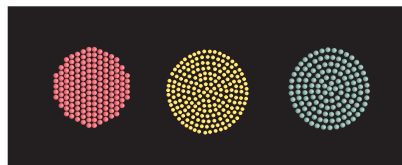


**Рис. 16.33.** Ширина запрещенной зоны  $E_g$  и соответствующая длина волны  $\lambda_g$  для некоторых одно-, двух-, трех- и четырехкомпонентных полупроводников III–V групп. Начиная сверху, полосы представляют AlInGaN, AlGaIn, InGaIn, InGaAsP, AlInGaP, AlInGaP, GaAsP, AlGaAs, InGaAs, InGaAs и GaAsSb. Закрашены области, в которых материалы являются прямыми полупроводниками

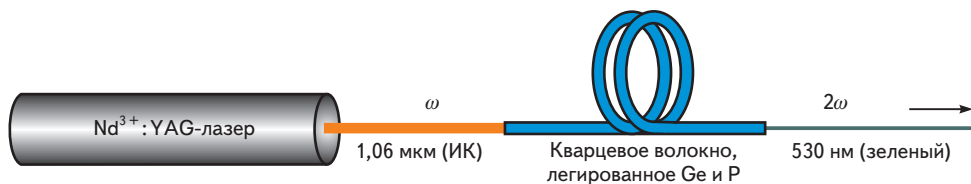


**Рис. 17.15.** Спектральная интенсивность как функция длины волны для СИД, работающих в ультрафиолетовом и видимом диапазоне спектра. Пиковые интенсивности сделаны равными путем нормировки. Для инфракрасных СИД результаты представлены на рис. 17.6

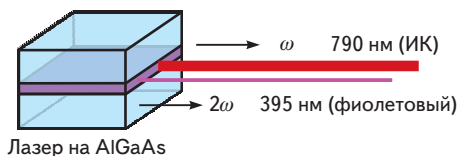
**Рис. 17.17.** Дорожный светофор на основе соединений III–V групп



*a*

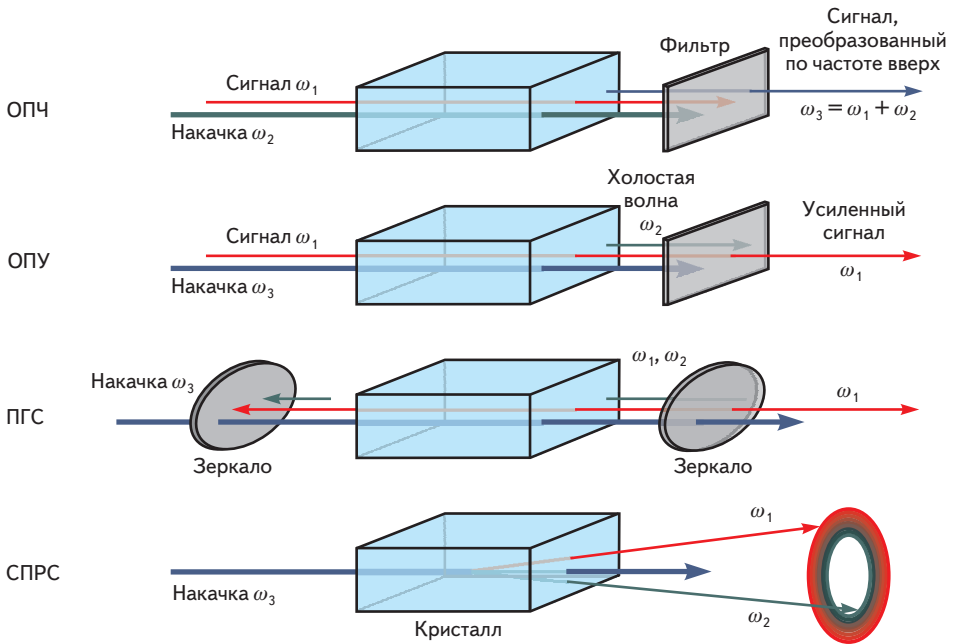


*б*

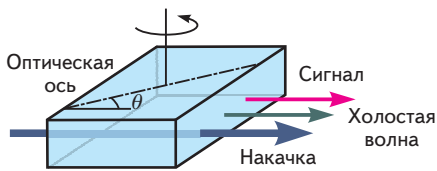


*в*

**Рис. 21.5.** Генерация второй гармоники света в объемном кристалле (*a*), в стеклянном волокне (*б*) и в резонаторе лазерного диода (*в*)

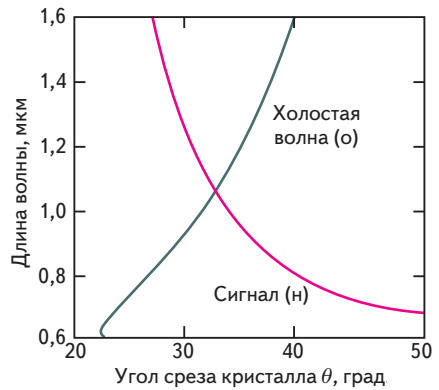
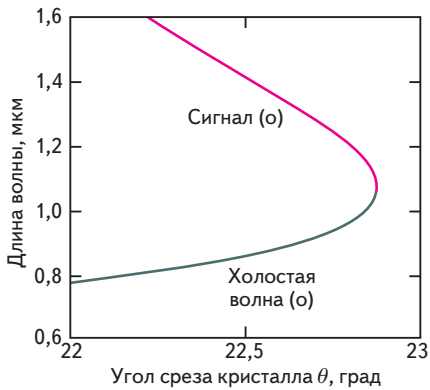


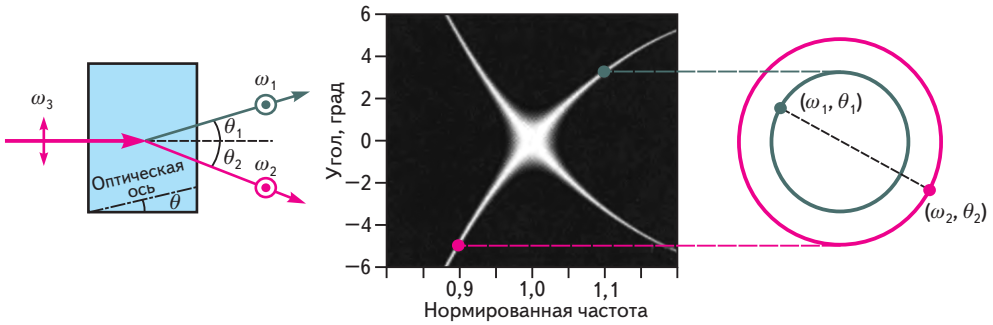
**Рис. 21.10.** Оптические параметрические приборы: оптический преобразователь частоты (ОПЧ), оптический параметрический усилитель (ОПУ), параметрический генератор света (ПГС) и преобразователь частоты вниз на основе спонтанного параметрического рассеяния света (СПРС)



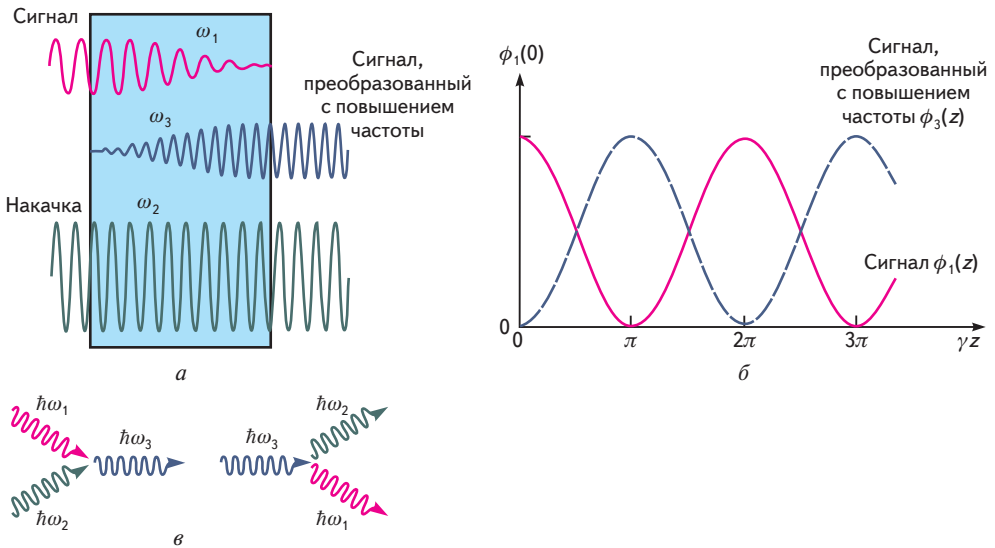
**Рис. 21.13.** Кривые настройки для коллинеарного ПГС на кристалле ВВО с накачкой на 532 нм, которая легко получается удвоением частоты Nd : YAG-лазера:

$a$  — типа I;  $b$  — типа II



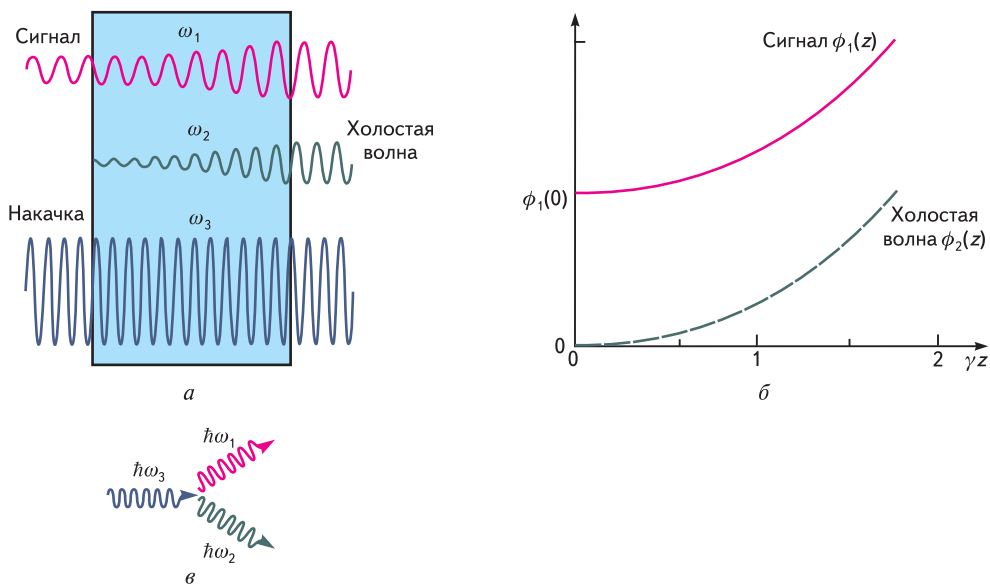


**Рис. 21.15.** Кривые настройки для неколлинеарного о-о-н типа I спонтанного параметрического рассеяния света с понижением частоты в кристалле ВВО под углом  $33,53^\circ$  при накачке на  $351,5$  нм (аргоновый ионный лазер). Каждая точка светлой области на среднем рисунке соответствует частоте  $\omega_1$  и углу  $\theta_1$  для возможной волны с пониженной частотой. Каждой такой точке соответствует точка с дополнительной частотой  $\omega_2 = \omega_3 - \omega_1$  и углом  $\theta_2$ . Частоты нормированы на величину  $\omega_0 = \omega_3/2$ . Например, две показанные точки представляют пару волн с частотами  $0,9\omega_0$  и  $1,1\omega_0$ . Из-за осевой симметрии каждая точка на самом деле представляет кольцо точек: всем им соответствует одинаковая частота, но каждая точка на кольце согласована только с одной диаметрально противоположной точкой на соответствующем кольце, как показано на правом графике



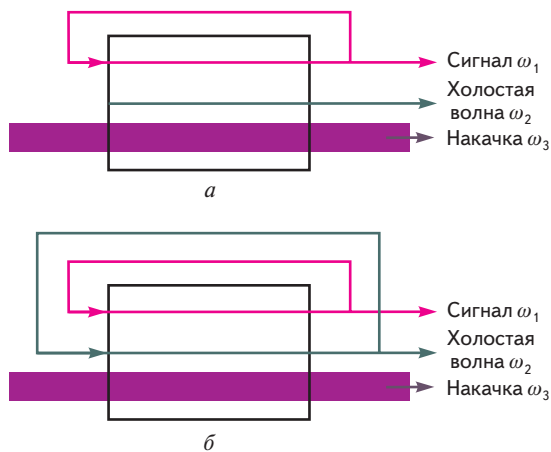
**Рис. 21.32.** Преобразователь частоты вверх:

$a$  — смешение волн;  $b$  — эволюция плотностей потока входной  $\omega_1$ -волны и преобразованной по частоте вверх  $\omega_3$ -волны. Волна накачки  $\omega_2$  предполагается постоянной;  $c$  — взаимодействие фотонов



**Рис. 21.33.** Оптический параметрический усилитель:

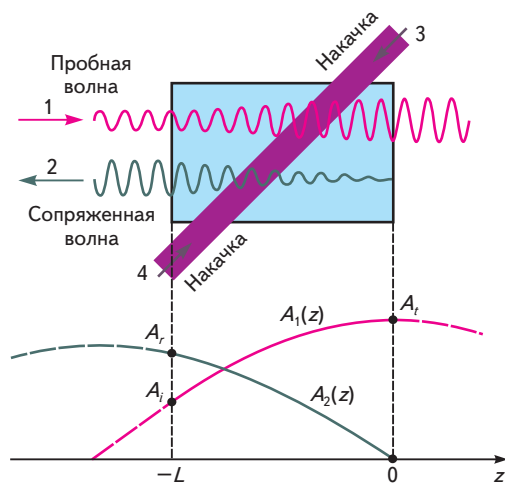
$a$  — смещение волн;  $b$  — плотности потока фотонов для сигнальной и холостой волн (плотность потока фотонов накачки считается постоянной);  $c$  — взаимодействие фотонов



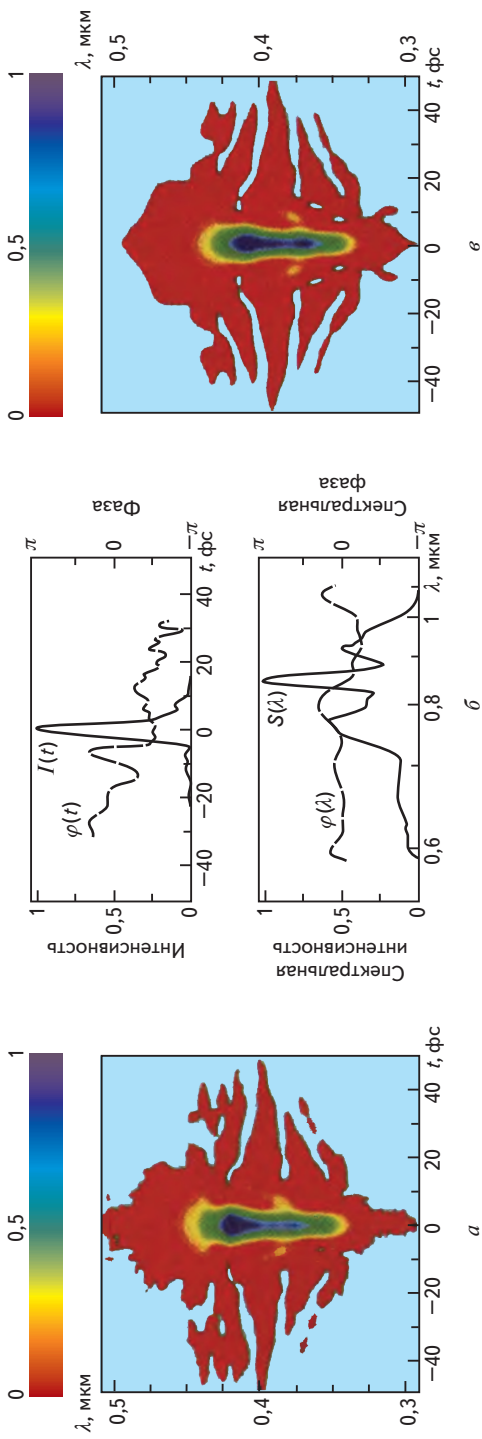
**Рис. 21.34.** Параметрический генератор генерирует свет на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Накачка с частотой  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$  служит источником энергии:

$a$  — ПГС с одним резонансом;  $b$  — ПГС с двойным резонансом





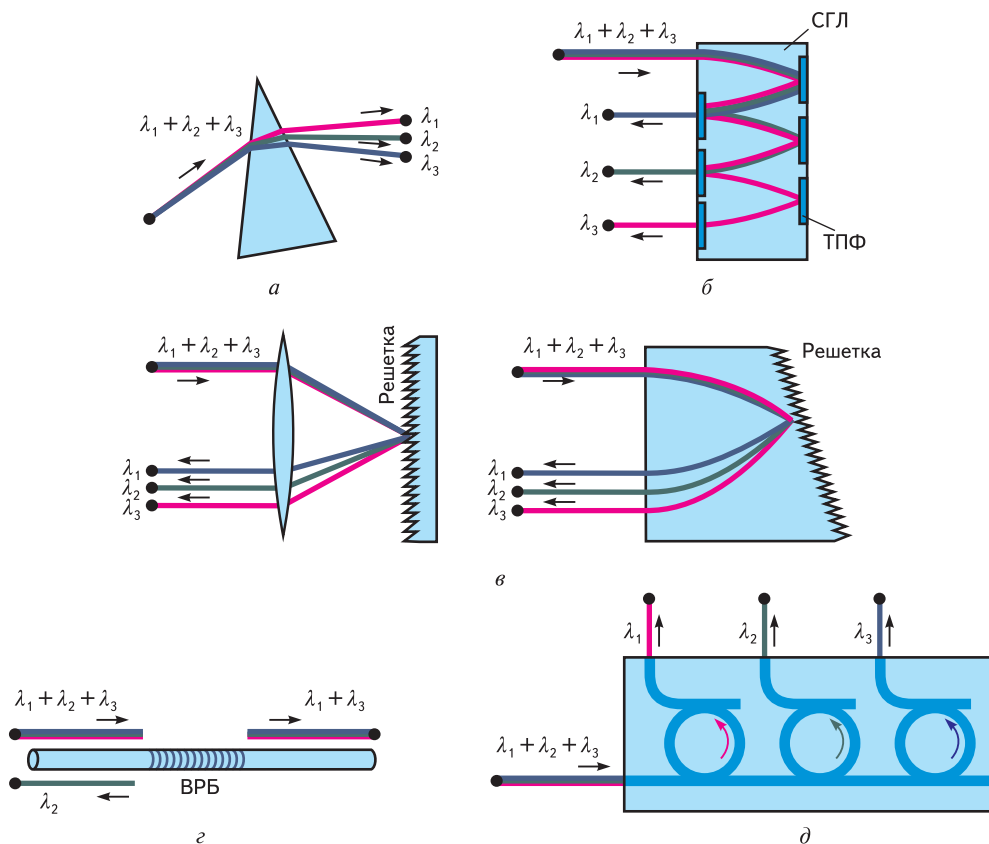
**Рис. 21.35.** Вырожденное четырехволновое смешение. Волны 3 и 4 — интенсивные волны накачки, распространяющиеся в противоположных направлениях. Пробная волна 1 и сопряженная волна 2 также распространяются в противоположных направлениях и имеют нарастающие амплитуды



**Рис. 22.63.** Измеренная методом ГВГ-FROG спектрограмма импульса длительностью 4,5 фс, содержащего 2,5 оптических периода (а). Рассчитанные временные и спектральные характеристики импульса (б). ГВГ-FROG-спектрограмма, рассчитанная для импульса (б), примерно совпадает с измеренной (а) (в). (Займствовано из *Baltuška A., Pshenichnikov M.S., Wiersma D.A. IEEE Journal of Quantum Electronics. Vol. 25. P. 459–478, рис. 17, а, б и 18. ©1999 IEEE*; R. Trebino, ed. *Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses*. Kluwer, 2000, рисунок на прилагаемом CD-ROM.)

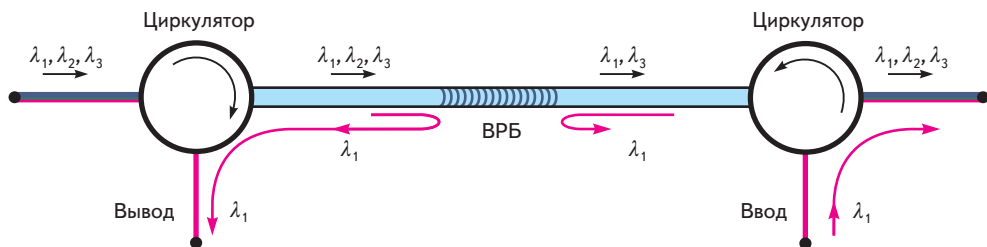


Серьезная разработка оптических межсоединений и фотонных коммутаторов началась в 1980-х гг. под руководством Лабораторий Белла, организованных в 1925 г. компанией АТТ. Лаборатории Белла стали частью компании Люсент Текнолоджиз в 1996 г, а затем влились в компанию Алкател в 2006 г.

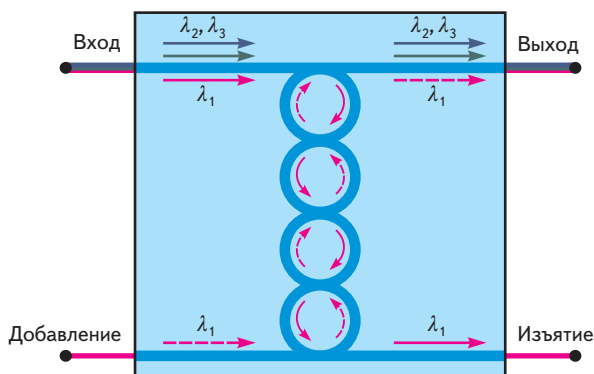


**Рис. 23.18.** Демультимплексоры с разделением по длине волн:

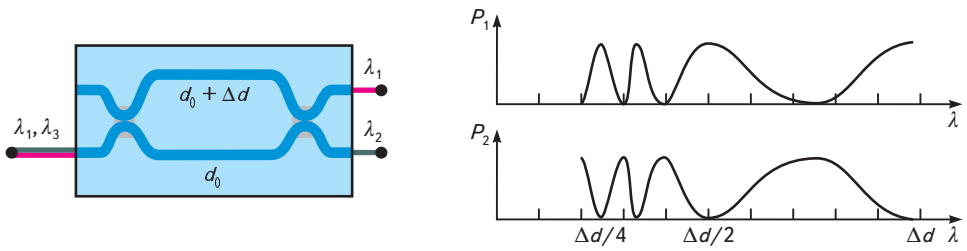
*a* — призма; *б* — диэлектрические интерференционные тонкопленочные фильтры (ТПФ); *в* — дифракционная решетка с обычной или стрелевой градиентной линзой (СГЛ); *г* — волоконная решетка Брэгга (ВРБ); *д* — фильтр на кольцевых микрорезонаторах



**Рис. 23.19.** В оптическом мультиплексоре ввода-вывода (ОМВВ) волоконная решетка Брэгга (ВРБ) отражает выводимую компоненту с длиной волны  $\lambda_1$ , а циркулятор направляет ее на приемник. Другие компоненты ( $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ ) проходят через решетку. Другой циркулятор служит для ввода света на длине волны  $\lambda_1$ , промодулированного новыми данными. ВРБ отражает распространяющийся обратно свет на длине волны  $\lambda_1$

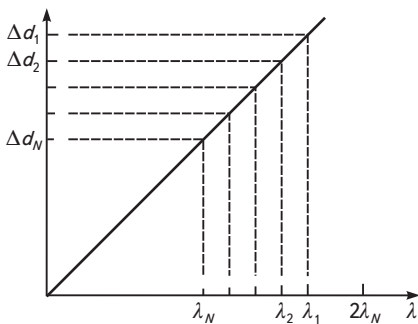
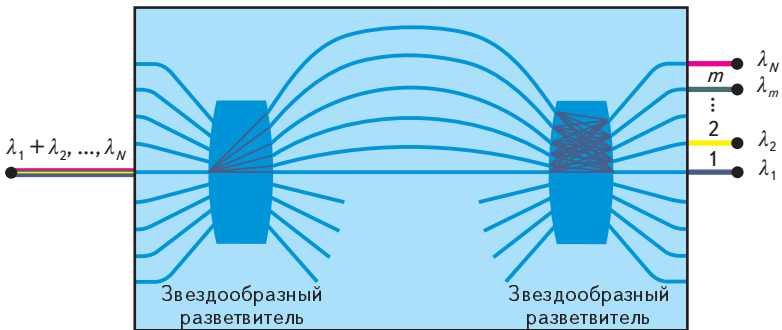
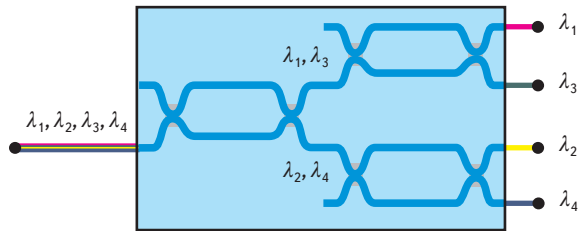


**Рис. 23.20.** В оптическом мультиплексоре ввода-вывода (ОМВВ) используется множество кольцевых микрорезонаторов для изъятия канала  $\lambda_1$  из входящего пучка многоканальной связи и направления его на приемник. Другие компоненты ( $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ ) пропускаются. Новые данные на  $\lambda_1$  выбираются фильтром и добавляются в выходной пучок. Множество кольцевых микрорезонаторов имеют большую селективность по длине волны (т. е. более узкую спектральную ширину и больший коэффициент подавления, чем одиночный кольцевой микрорезонатор)

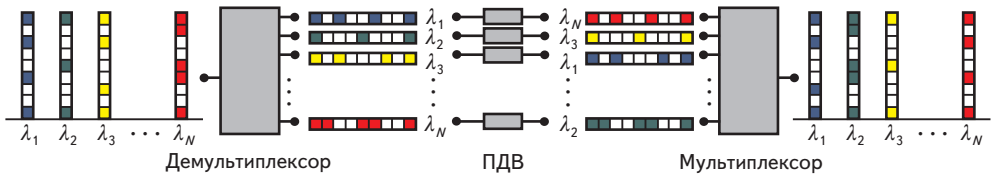


**Рис. 23.21.** Маршрутизация с разделением по длине волны (демультиплексирование) с использованием интегрально-оптического интерферометра Маха—Цендера

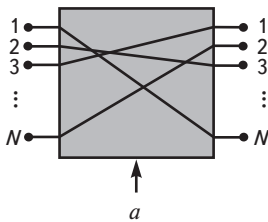
**Рис. 23.22.** Демультиплексирование с разделением по длине волны с использованием интегрально-оптического каскада интерферометров Маха—Цендера



**Рис. 23.24.** Демультиплексирование с разделением по длине волны с помощью маршрутизатора на решетке волноводов (WGR)

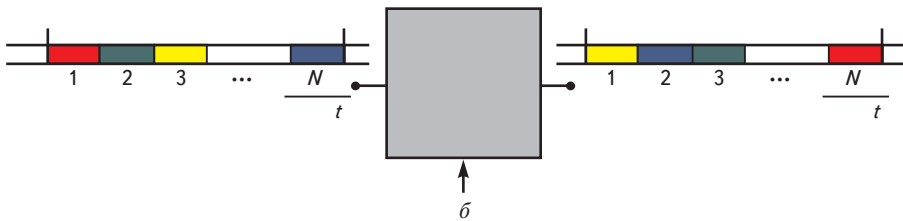


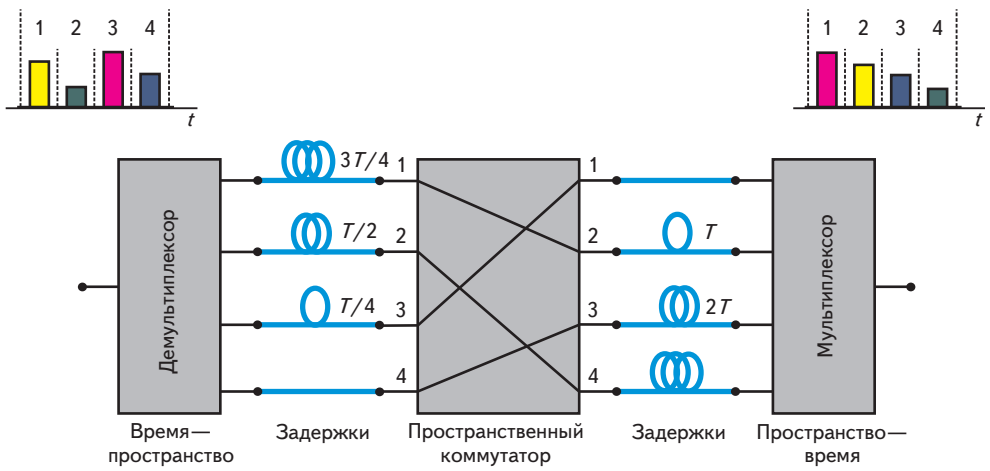
**Рис. 23.52.** Реализация обмена между каналами с разделением по длине волны (WCI). В данном примере данные в канале с длиной волны 2 (зеленый цвет) входящего пучка направляются в канал 3 с другой длиной волны (желтый цвет) выходящего пучка. Биты данных изображены как цветные и белые квадратик. Такой коммутатор реализуется с помощью демультиплексора с разделением по длинам волн, который разделяет каналы и направляет их на набор преобразователей длины волны. Собирающий  $N \times 1$ -мультиплексор обеспечивает объединение переключенных каналов в единый пучок



**Рис. 23.55.** Соответствие между временным и пространственным коммутатором:

$a$  — пространственный коммутатор. В показанном примере данные из линии 2 направляются в линию 3;  $b$  — коммутатор с разделением по времени, реализующий межинтервальный обмен (TSI). В показанном примере данные из временного кванта 2 направляются во временной квант 3 в каждом кадре

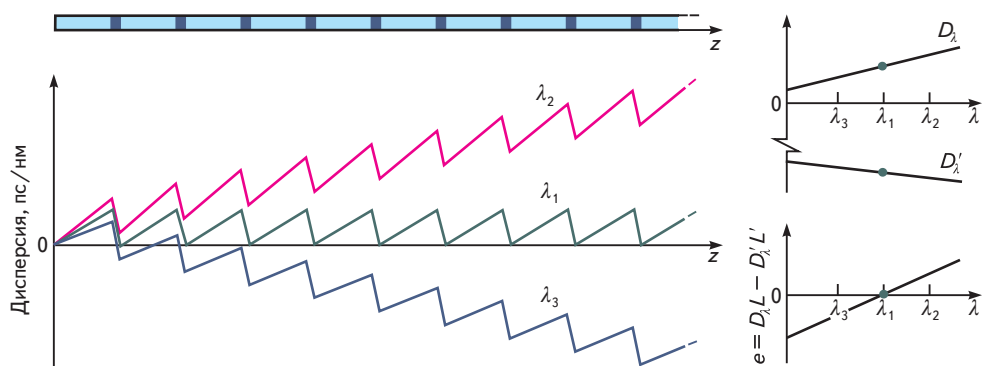




**Рис. 23.59.** Межинтервальный обмен (TST)



Межконтинентальная сеть волоконно-оптической связи



**Рис. 24.23.** Полная компенсация дисперсии на  $\lambda_1$  и неполная компенсация с положительной и отрицательной результирующей дисперсией на  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  соответственно. Ошибка  $e_\lambda$  исчезает, если наклоны  $D_\lambda$  и  $D'_\lambda$  равны