

О СВЕТЕ МЕДЛЕННОМ И БЫСТРОМ

ПО СЛЕДАМ ПРЕЗЕНТАЦИИ Р.БОЙДА НА OFC-2006

В репортаже с конференции OFC-2006 Джефф Хечт [1] упомянул презентацию Р.Бойда на этой конференции о методах замедления света. Важность такого явления и его практическую ценность для оптических сетей связи и компьютеров трудно переоценить. Оптические сети и компьютеры используют последовательности и пакеты оптических импульсов, эквивалентные электрическим. Для их обработки нужны оптические средства, аналогичные электрическим. Презентация Р.Бойда [2], однако, как и все презентации, – фрагментарна и мало понятна без пояснений, учитывая новизну темы. Поэтому автор, просмотрев цитируемый Бойдом оригинальный материал, попытался объяснить его и представил собственный пересказ и пояснения на ту же тему.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЯВЛЕНИЯ "МЕДЛЕННЫЙ СВЕТ"

Известно, что скорость света в среде c_n зависит от показателя преломления (ПП) среды n , отличного для разных частот излучения ω . Различают *фазовую скорость* света v_ϕ – скорость фазового фронта монохроматической волны с частотой ω в определенном направлении: $v_\phi = c/n_\phi$. Если свет немонохроматический, то есть состоит из группы спектральных составляющих, то вместо фазовой скорости говорят о *групповой скорости* света: $v_g = c/n_g$.

Фазовая скорость света может быть как меньше, так и больше скорости света. Если $v_\phi > c$, то говорят о *быстрых световых волнах* (или "быстром свете"), если $v_\phi < c$, то говорят о *медленных световых волнах* (или "медленном свете"). Обычно измеряют групповую (а не фазовую) скорость света, то есть так называемую скорость сигнала, или скорость передачи энергии, поэтому ниже мы будем использовать именно ее. Степень немонохроматичности света оценивают при этом *дисперсией групповых скоростей* (ДГС, или GVD).

Если есть среда "медленного света" с $n_g > 1$ и длиной L (рис. 1), то обычно используются следующие понятия:

- групповая скорость – $v_g = c/n_g$;
- групповой ПП – $n_g = n_\phi + \omega (dn_\phi/d\omega)$;
- групповая задержка – $T_g = L/v_g = L \cdot n_g/c$;
- управляемая задержка – $T_{uz} = T_g - L/c = L(n_g - 1)/c$.

ЗАМЕДЛЕНИЕ ИЛИ ОСТАНОВКА СВЕТА? В ЧЕМ НАША ЦЕЛЬ?

21 апреля 2006 года Крис Филлипс (Chris Phillips) из Imperial College (Лондон) сообщил на конференции в University of Exeter, что ему и его коллегам удалось замедлить ско-

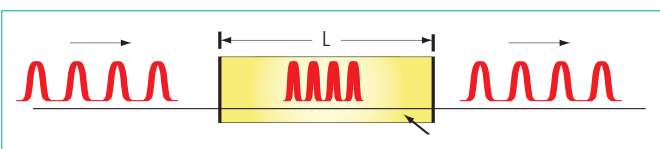


Рис. 1 Модель распространения сигнального импульса в среде "медленного света"

рость света в 40 раз, пропустив его через "сэндвич", изготовленный из полупроводниковых (п/п) тонких пленок (см. physorg.com/news64851319.html) толщиной в несколько нанометров. Это не было первым сообщением о столь значительном замедлении скорости света, но оно продемонстрировало факт замедления света при комнатной температуре и при этом в обычном для п/п технологии материале – InGaAs. Скорость замедления можно менять путем изменения толщины п/п тонкой пленки, в которой сформированы квантовые ямы.

Замедление света в среде с $n > 1$ факт далеко не новый, весь вопрос в том, с какой целью это делается. Первоначально цель была явно амбициозная – замедлить свет и как можно больше. В этой гонке на замедление результаты росли довольно быстро. Уже в 1999 году было экспериментально доказано, что свет можно практически остановить, заставив его, например, распространяться в специально созданной замороженной до температуры 50 нанокельвинов среде, называемой *конденсатом Бозе-Эйнштейна* (БЕС), со скоростью, в 20 миллионов (а не в 40) раз более медленной, чем его скорость в вакууме (полученная скорость света порядка 17 м/с некоторое время была рекордной) [3].

Цель максимально возможного замедления вскоре была достигнута – свет был просто остановлен. Сообщения об этом появились в статье [4]. Ее результаты были подтверждены математическим моделированием динамики поведения светового солитона в парах атомов (в среде БЕС), описанным в работе [5] и экспериментально в работе [6]. В работе [5] было показано, что в этой среде групповая скорость солитона, ударно возбуждаемого лазером, монотонно убывает с убыванием (после выключения) интенсивности поля управляющего лазера. При этом солитон не только замедлялся, но и останавливался, что удалось зафиксировать путем регистрации пространственной локализации солитона, используя его поляризацию (природа как бы пронзила "Черный квадрат" Малевича фотонным лучом, рис.2). Цель достигнута, но полного удовлетворения нет, так как процесс, в общем-то, неуправляемый.

Можно научиться дискретно управлять таким процессом, создавая, например, центры взаимодействия оптических полей и продвигая фронт их взаимодействия от центра к центру, как это описано в работе [7]. В ней предложено для замедления света использовать WGM-резонаторы, работающие в режиме *резонирующего акустического свода* (WGM), позволяющем усилить действие исчезающе малых оптических полей. WGM-резонатор – устройство в виде оптически прозрачного тора (сечением $5 \cdot 5$ мкм) из ниобата лития. Система таких резонаторов формируется на поверхности оптически прозрачного цилиндрического вертикального стержня диаметром 3 мм из того же материала (с показателем преломления 2,2), используемого в качестве волновода (рис.3а). Проводя циф-

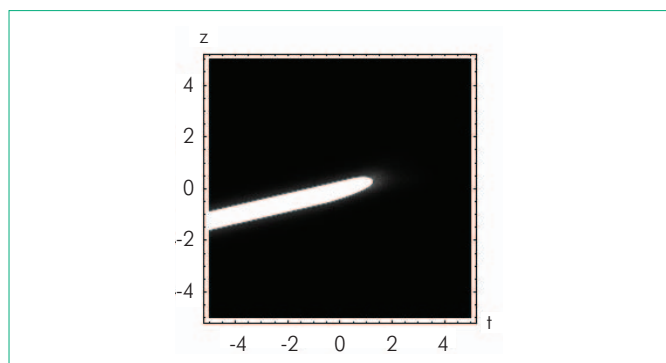


Рис.2 Поляризационный след остановленного оптического солитона

ровое моделирование процесса распространения взаимодействия полей, можно получить картину последовательных откликов (рис.3б), возникающих в результате запуска и сверхмедленного распространения оптического импульса снизу вверх, благодаря последовательному взаимодействию полей нижних резонаторов с верхними, осуществляемому через поле волновода. Скорость распространения света составила менее 20 см/с, что на два порядка медленнее, чем было получено в работе [3], и при этом была достигнута некая управляемость.

Однако речь ниже пойдет не об этом, а о том, как создать легко управляемую задержку при комнатной температуре и в среде, которая широко используется для передачи полезного оптического сигнала, например в оптоволокне (ОВ), в том числе и фотонном, или в волноводах различного типа, или в тонких пленках из п/п материала.

Например, задержку света можно сделать компактной и многократно повторяемой, если использовать решетку Брэгга или микрорезонатор типа Фабри-Перо, в котором световой импульс многократно отражается, пока в определенный момент не будет выведен из него. Используя такую технику, можно реализовать относительно длинные и дискретно изменяемые задержки. Другие типы задержки обеспечивают однократную задержку определенной длины, дробной (FD) или кратной длине задерживаемого импульса, точнее, длине дво-

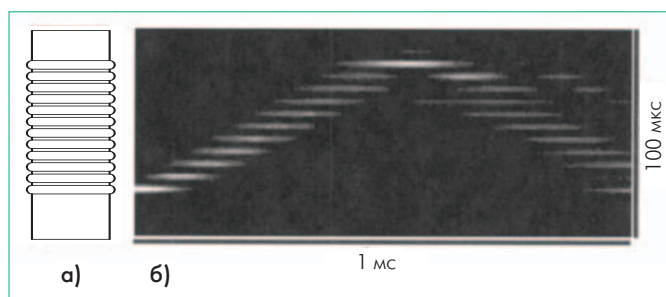


Рис.3 а) Набор кольцевых WGM-резонаторов, связанных оптическим стержнем; б) картина последовательных откликов, полученных при распространении оптического импульса

ичного битового интервала, в котором может располагаться оптический импульс.

Для того, чтобы сделать управляемую задержку $T_{\text{вз}}$ максимально возможной, нужно выбрать максимально возможную длину среды (для того, чтобы уменьшить влияние остаточного затухания) и максимизировать групповой ПП n_g .

СИСТЕМЫ УПРАВЛЯЕМОГО ЗАМЕДЛЕНИЯ СВЕТА

Управляемый медленный свет может использоваться в различных приложениях, таких как:

- управляемые оптические линии задержки (ОЛЗ);
- оптические буферы (ОБ);
- устройства естественной временной задержки для радаров с синтезированной апертурой.

Основной показатель медленного света:

нормализованная временная задержка = общей временной задержке/временной интервал, занимаемый импульсом = информационной емкости хранения среды.

Под временным интервалом, занимаемым импульсом обычно понимается битовый интервал. В оптических системах обычно принимается, что *ширина (оптического) импульса на уровне половинной мощности (FWHM)* составляет 1/2 битового интервала (хотя она может быть равна 1/3 или 2/3 этого интервала в зависимости от используемого метода модуляции). Для скоростей 10 и 40 Гбит/с в системах связи битовый интервал составляет 100 и 25 пс. Лучший результат, достигнутый до сих пор – задержка четырех импульсов (А.Касари, 1995, [2]). Отсутствие сведений о ширине этих импульсов не дает возможности оценить реализованную задержку. Для приведенных нами скоростей, четыре импульса соответствовали бы длительности задержки 400 и 100 пс соответственно.

Если учесть, что длина базового пакета 10-гигабитного Ethernet составляет 1526 бит, то для задержки одного пакета в ОБ потребуется задержка длительностью примерно 153 нс, а для 100-гигабитного Ethernet (на который нацелены оптические специалисты) – 15,3 нс. Возникает вопрос: "Каковы перспективы получения управляемой задержки такой длительности для оптической линии задержки?" Результаты, приведенные ниже, говорят о том, что они не так уж и плохи, что не согласуется с выводом, приведенным в [1].

Моделирование максимальной задержки

Модель задержки, описанная Бойдом в работе [8], включает дисперсию групповых скоростей (ДГС, или GVD) и восста-

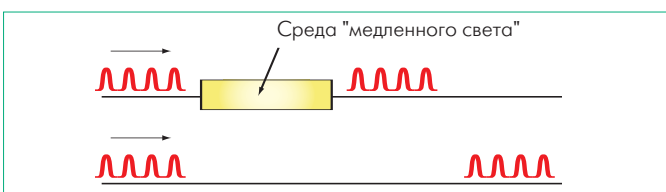


Рис.4 Использование оптической буферизации для устранения состязательной ситуации

новление формы спектра импульсов. По его мнению, не существует теоретических ограничений на величину максимальной задержки импульсов (см. замечания в публикуемой в настоящем номере статье А.Мацко), однако есть серьезные практические ограничения, вызванные главным образом остаточным поглощением. В этой ситуации основной стратегией достижения максимальной задержки является использование интенсивной накачки для наиболее полного насыщения среды с целью уменьшения влияния остаточного поглощения.

Оптическая буферизация

В системах пакетной передачи в оптической связи происходит коммутация оптических пакетов. Она осуществляется оптическими коммутаторами (AOS), а не электрическими. Коммутация пакетов с входных портов на выходные осуществляется в порядке очередности прихода пакетов. Если же два пакета данных пришли на вход одновременно, то один из них посылается в буфер и задерживается до освобождения ресурсов коммутатора (рис.4), чтобы исключить возможность возникновения состязательной ситуации, которая может нарушить работу коммутатора. Эта рутинная процедура коммутации говорит о необходимости использования ОБ.

ЗАМЕДЛЕНИЕ СВЕТА В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Замедление света в твердотельных материалах при комнатной температуре может быть осуществлено различными способами, использующими следующие физические эффекты/явления нелинейной оптики [8,9]:

- вынужденное рассеяние Бриллюэна (ВРМБ, или SBS);
- вынужденное рамановское рассеяние (ВРР, или SRS);
- конвертирование длин волн и дисперсию;
- когерентные осцилляции населенности (КОН, или СРО):
 - в кристаллах рубина и алемандрита;
 - в кристалле PbS (используя п/п квантовые точки);
 - в п/п оптических усилителях (ПОУ, или SOA);
 - в оптических усилителях на ОБ, типа (EDFA).

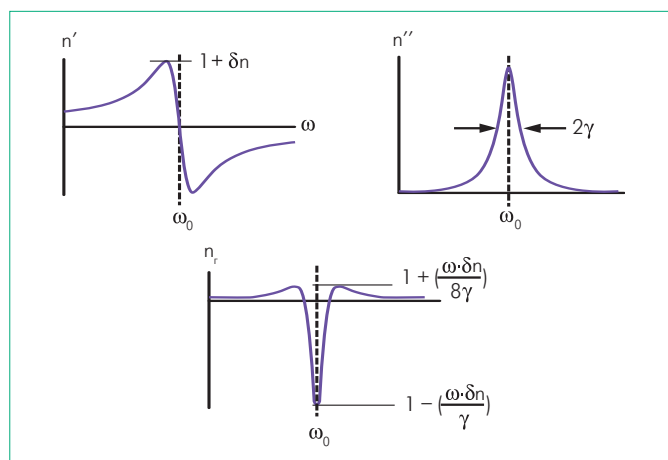


Рис.5 Вид фазовой постоянной n' , постоянной затухания n'' и группового ПП n_g

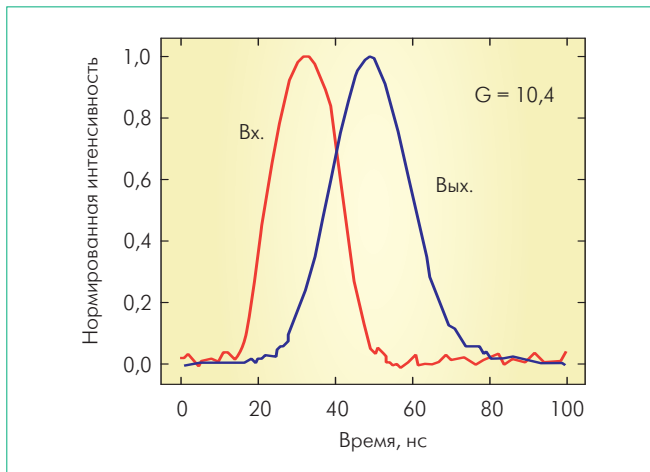


Рис. 6 Задержка световых импульсов с помощью ВРМБ

Замедление света с помощью ВРМБ

Замедление света, связанное с эффектом ВРМБ [9], основано на быстром изменении группового ПП n_g пропорционально коэффициенту резонансного усиления в районе линии (частоты) Бернулли ω_0 (рис.5). Эффект ВРМБ заключается в том, что при непрерывной накачке определенной мощности с частотой ω_H в области, сдвинутой вниз на частоту ω_B (сдвиг Бернулли, для кварцевого стекла примерно равный 13 ТГц), появляется область резонансного узкополосного усиления, обусловленная появлением стоксовой составляющей $\omega_C = \omega_H - \omega_B$.

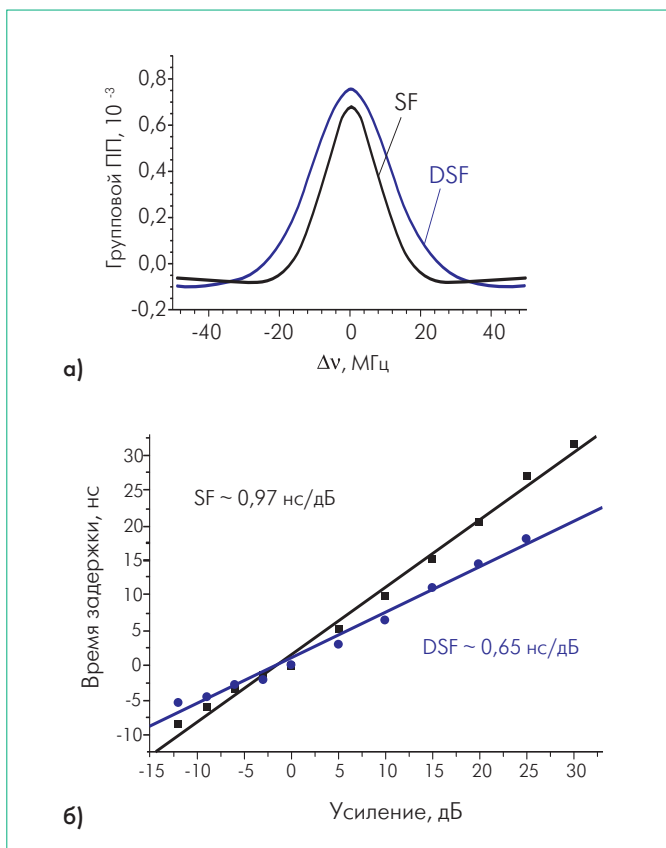


Рис.7 а) Аппроксимация изменения группового ПП при отклонении от частоты Бернулли (максимальное усиление 20 дБ); б) зависимость оптической задержки от усиления ВРМБ

Важное преимущество использования вынужденного рассеяния (как ВРМБ, так и ВРР) для изменения групповой скорости света (по сравнению с другими возможными механизмами ее изменения) в том, что положение и амплитуда резонанса полностью управляются длиной волны и мощностью сигнала накачки [10].

Изменение группового ПП и приводит к замедлению распространения света пропорционально коэффициенту усиления (рис.6). На рис.6 видно, что выходной сигнал (ширина сигнала 15 нс) запаздывает относительно входного примерно на 18 нс при усилении $G = 10,4$ дБ [10]. Используя уравнение для групповой задержки, можно рассчитать оптическую временную задержку, как функцию усиления, если принять, что спектр усиления ВРМБ может быть аппроксимирован профилем Лоренца. Результаты аппроксимации и расчетов временной задержки для двух типов одномодовых (ОМ) волокон – стандартного (SF) и со сдвигом дисперсии (DSF), полученные в [11], приведены на рис.7.

Полученная линейная аппроксимация хорошо согласуется в области задержки импульсов с результатами лабораторного эксперимента (фактические наклоны прямых чуть меньше (0,97 и 0,65 нс/дБ, вместо 1,04 и 0,73 нс/дБ, соответственно). Таким образом, для SF максимальная задержка составила 30 нс при усилении 30 дБ, а для DSF – 18 нс при усилении 25 дБ.

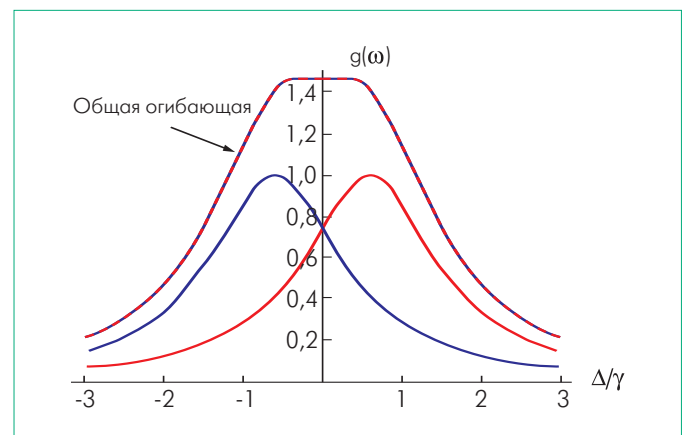


Рис. 8 Вид общей огибающей при двух частотах накачки

Резонансное усиление ВРМБ процесс узкополосный. Ширина его полосы на уровне половинной мощности (FWHM) составляет 30–35 МГц, а коэффициент усиления зависит от накачки и может достигать 30 дБ. Ширину полосы усиления ВРМБ можно увеличить, используя две (или более) частоты накачки, формирующие две (или более) близко расположенные резонансные полосы усиления ВРМБ. Их общая огибающая дает не только расширение полосы усиления, но и приводит к уплощению амплитудно-волновой характеристики (АВХ), см. рис.8.

Влияние мощности накачки на максимальную задержку и усиление ВРМБ показано на рис.9. Параметром семейства

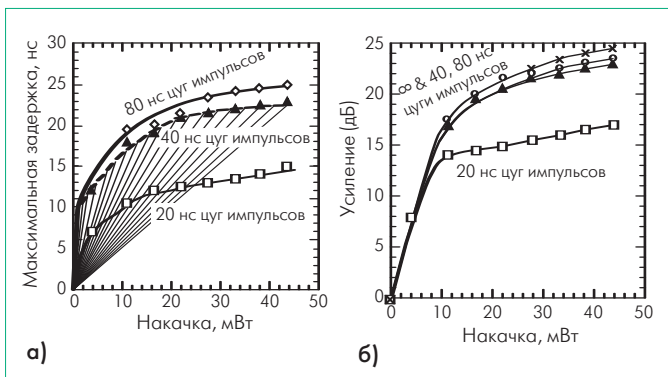


Рис. 9 а) Изменение максимальной задержки от мощности накачки в зависимости от ширины сигнала импульса; б) изменение усиления от мощности накачки в зависимости от ширины сигнала импульса

кривых на рис.9а и 9б выступает ширина импульса. Диапазон ее изменения 20–80 нс, что соответствует длине битового интервала 40–160 нс или в пересчете на скорость передачи 6,25–25 Мбит/с (не характерный диапазон для современных систем оптической передачи). Ясно, что чем импульс короче, тем шире требуемая полоса пропускания для его передачи, тем меньше усиления он будет получать при той же мощности накачки и тем меньшего уровня максимальной задержки можно будет достичь, учитывая характерное насыщение при больших уровнях накачки.

Результаты, приведенные выше, говорят о том, что ВРМБ является удобным инструментом для создания управляемой оптической задержки. Однако нужно иметь в виду и недостатки этого метода: обратно пропорциональная зависимость амплитуды импульса от уровня задержки [11], узкая ширина полосы усиления Бернулли [10,11], а также рост порога ВРМБ, например при увеличении ширины излучения накачки [12]. Увеличить полосу усиления можно путем расширения спектра накачки. Это можно сделать путем уширения спектра источника накачки, или дитеринга (dithering) [10–12], например путем фазовой модуляции центральной частоты источника. Такая мо-

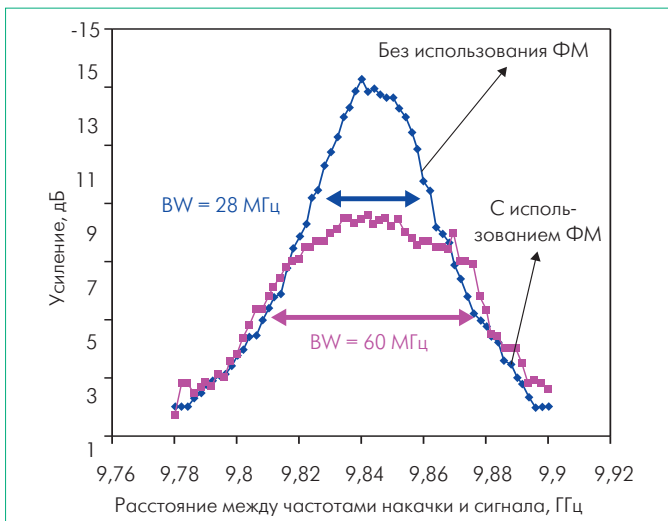


Рис. 10 Использование дитеринга для расширения спектра источника накачки

дуляция (частотой 10 МГц), как показано на рис. 10 [2], позволяет вдвое увеличить ширину полосы усиления (в данном эксперименте с 28 до 60 МГц). Это, однако, приводит к снижению максимального усиления (в данном случае на 4 дБ), а значит и к снижению максимально достижимой задержки. Компенсировать его можно, но за счет увеличения мощности накачки.

Замедление света с помощью ВРР

Замедление света, связанное с эффектом Рамана (комбинационного рассеяния света, или SRS) [9] также возможно [13]. Этот эффект близок по физике явления и по характеру зависимостей к SBS. Он также позволяет позиционировать кривую резонанса ПП в желаемой области длин волн (путем настройки длины волны накачки) и регулировать величину задержки изменением мощности накачки. При этом можно осуществить управляемую задержку импульсов меньшей (пикосекундной) длительности, что важно для современных скоростей передачи, и существенно снизить уровень мощности накачки. Наконец, он допускает применение усилителей Рамана, ставших стандартными устройствами оптических систем связи, причем не только оптоволоконных, но и твердотельных [14].

Как и для ВРМБ, когда частота импульса настраивается точно на пик усиления ВРР, групповая задержка приблизительно равна:

$$Dt = g/D_p; g = g_0 \cdot P_{\text{макс.н}} / A_{\text{эфф}},$$

где g_0 – усиление в точке максимума резонансной кривой Рамана, $P_{\text{макс.н}}$ – максимальная мощность накачки, L и $A_{\text{эфф}}$ – длина и поперечное сечение ОБ рамановского усилителя, а D_p – ширина полосы рамановского резонанса.

В лабораторном эксперименте, описанном в [13], использовалась диодная накачка импульсами с длиной волны 1535 нм и шириной 500 пс, которые модулировались импульсным сигналом оптического параметрического генератора (ОПГ) шириной 430 фс, несущая которого непрерывно перестраивалась в диапазоне длин волн 1590–1643 нм. Сигнал и накачка одновременно подавались на рамановский усилитель и при прохождении по ОБ они на какое-то время перекрывались, что приводило к их усилению и формированию вносимой задержки у сигнала. Задержка затем измерялась путем сравнения с эталонным (не усиленным) сигналом. В результате были получены следующие зависимости: усиления от мощности накачки для разных длин волн в диапазоне перестройки (рис.11а), усиления и задержки сигнала от мощности накачки (рис.11б) и вид входного и выходных (задержанных) импульсов с длиной волны 1637 нм (рис.11в). Максимальная задержка импульсов с коррекцией на нелинейные эффекты составила 370 фс, что соответствует 85% от ширины импульса. Эта задержка соответствует $g = 7$ и экстраполированной ширине полосы рамановского усиления 3 ТГц.

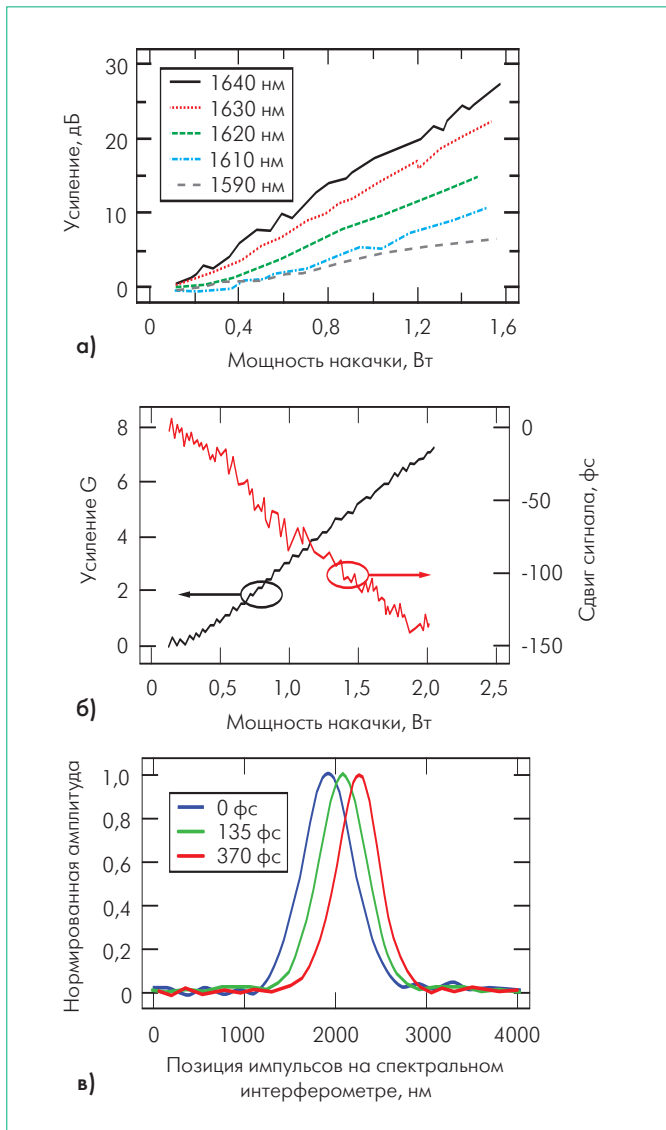


Рис. 11 а) Зависимость усиления от максимальной мощности накачки для разных длин волн; б) зависимость усиления и задержки сигнала от мощности накачки; в) вид задержанных импульсов

В работе [13] приведена ссылка на аналогичные исследования, проведенные с твердотельными рамановскими усилителями на основе кристалла $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и опубликованные в работе [14]. В ней сообщалось о максимальной задержке 105 пс, реализованной для импульса с длиной волны 1200 нм и шириной 90 пс.

Замедление света с помощью ВРР в кремниевой наноструктуре

В этом случае средой для создания условий ВРР может быть планарный волновод, сформированный путем напыления полоски кремния (сечением $250 \cdot 400$ нм и длиной 8 мм) на подложку из диоксида кремния (рис. 12а), изготовленную, например, M. Lipson's Group [2]. Ширина резонансной линии Рамана – 1 нм, длина волны 1603,5 нм (рис. 12б), наблюдаемый коэффициент усиления Рамана – 14 дБ [15]. Планарный волновод допускает формирование управляемой оптической задержки в КМОП-совместимой структуре.

Использование волнового конвертирования и дисперсии

Схема оптической задержки на основе конвертирования длин волн использует эффект четырехволнового смешения (ЧВС) [9] и среду с дисперсионным коэффициентом $D(\lambda)$. Совместное действие ЧВС и дисперсии дает возможность [16]:

- генерировать задержки в диапазоне от 1–10 нс, позволяющие достичь относительной задержки до 400 (для импульсов 25 пс – SDH STM-256 – 40 Гбит/с) или 1000 (для импульсов 10 пс – 100 Гбит/с Ethernet);
- формировать непрерывно изменяемую задержку;
- добиться совместимости с короткими (10 пс) и длинными (1 нс) импульсами;
- обеспечить одинаковую ширину полосы и длину волны сигнала на входе и на выходе;
- связать фазу выходного сигнала с фазой входного сигнала, установив необходимость фазовой совместимости.

Концептуально схема формирования оптической задержки включает управляемый сдвиг длины волны импульса под действием ЧВС (конвертирования), пропускания задерживаемого импульса через дисперсионную среду и обратный управляемый сдвиг его длины волны под действием ЧВС (реконвертирования). Общая задержка, получаемая импульсом, пропор-

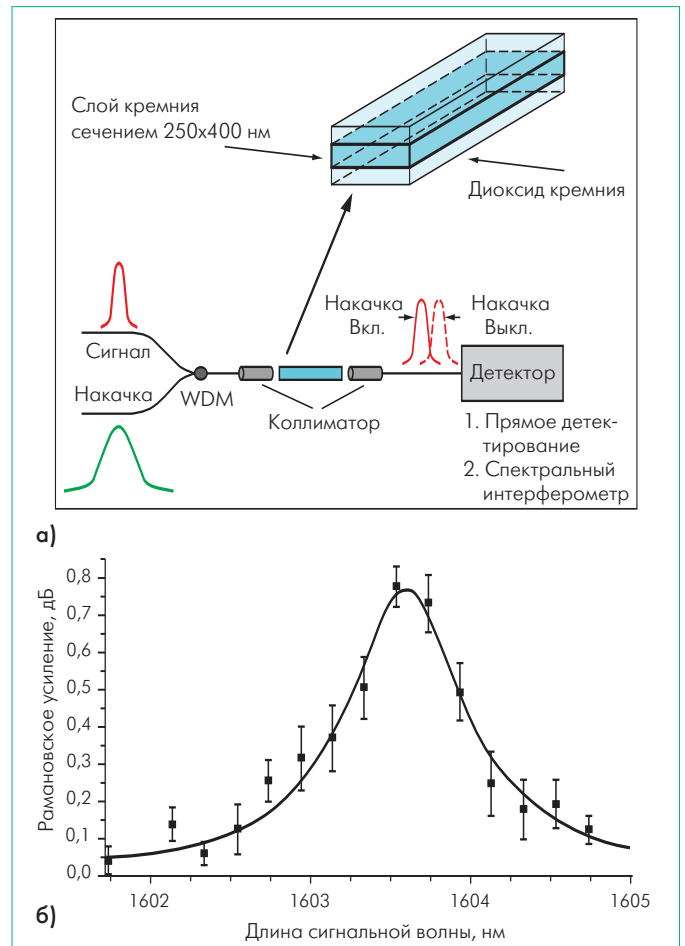


Рис. 12 а) Кремниевая наноструктура – среда ВРР и блок-схема эксперимента; б) вид резонансной линии Рамана

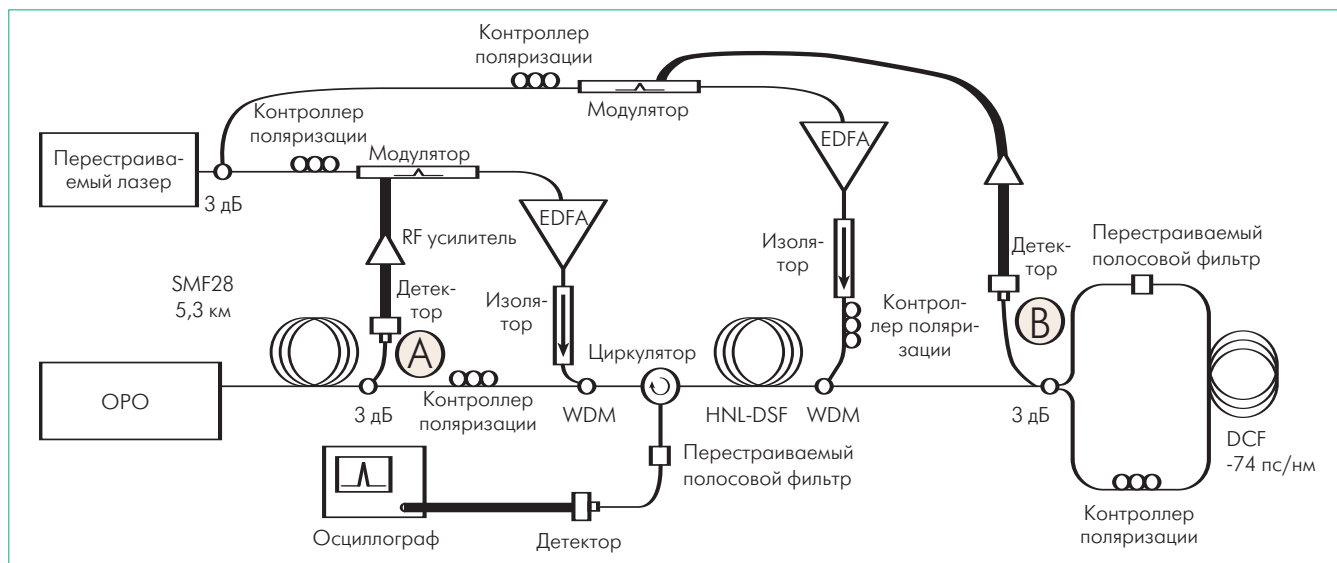


Рис. 13 Блок-схема линии задержки с волновым конвертированием и дисперсионной средой

циональна сдвигу исходной длины волн, умноженному на ДГС ОВ дисперсионной среды: $\Delta t \sim D(\lambda_1 - \lambda_2)$. Конвертирование длин волн осуществляет *оптоволоконный параметрический усилитель* (FOPA), что позволяет избежать оптоэлектронного преобразования сигнала.

Блок-схема оптической задержки приведена на рис.13. Сигнальные импульсы частотой 75 МГц и шириной 10 пс генерируются оптическим параметрическим генератором ОРО. Часть этого сигнала детектируется в точке А и используется

для модуляции перестраиваемого непрерывного лазера, применяемого для первичной накачки. В результате модуляции накачки формируются импульсы накачки шириной 500 пс. Они усиливаются усилителем EDFA и синхронно объединяются мультиплексором WDM с сигнальными импульсами. Параметрическое усиление сигнальных импульсов в ОВ со сдвигом нуля дисперсии (длиной 1 км) и с высокой степенью нелинейности (HNL-DSF) приводит к генерации (за счет ЧВС) дополнительных импульсов по схеме: $2\omega_H = \omega_C + \omega_D$, где ω_H , ω_C и

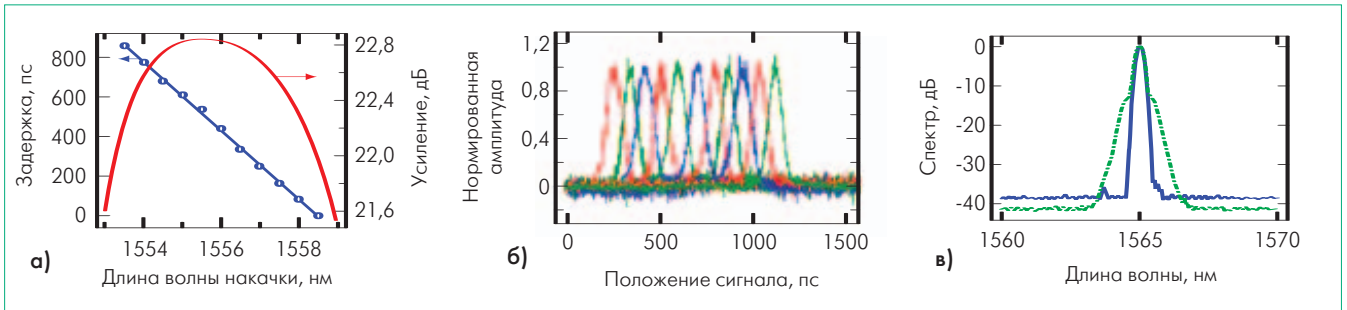


Рис. 14 а) Зависимость задержки и усиления от длины волны накачки; б) вид задержанных на разной стадии импульсов; в) вид входного и выходного импульсов

$\omega_{ЧВС}$ – частоты импульсов накачки, сигнала и ЧВС соответственно. На выходе ОВ HNL-DSF импульсы накачки и сигнала отфильтровываются, а импульсы ЧВС для компенсации дисперсии проходят через петлю ОВ (типа DCF) с дисперсией групповых скоростей $D(\lambda) = -74$ пс/нм. Задержка, приобретаемая импульсами ЧВС, пропорциональна сдвигу исходной длины волны, умноженному на коэффициент ДГС волокна DCF.

Аналогично тому, как это делалось на входе, выходной сигнал петли ОВ DCF детектируется в точке В и модулирует сигнал вторичной накачки. В результате импульсы ЧВС сдвигаются обратно к исходной частоте, пройдя через ту же петлю ОВ HNL-DSF усилителя FOPA. После этого, пройдя через циркулятор и фильтр (отфильтровывающий накачку и ЧВС-импульсы), задержанный выходной сигнал детектируется и подается на осциллограф. На рис. 14 приведены зависимости длительности задержки и коэффициента параметрического усиления от длины волны накачки (рис. 14а) и вид сдвинутых выходных импульсов (рис. 14б), позиции которых соответствуют точкам на прямой рис. 14а. Из рис. 14а видно, что максимальная задержка превышает 800 пс, а форма импульсов не изменилась (рис. 14в) и сдвига длины волны выходного сигнала (по сравнению с входным 1565 нм) нет, но есть существенное уширение импульса на уровне -8дБ от пика, вызванное усиленным спонтанным излучением (ASE), фазовая информация импульса при этом сохраняется.

Другой вариант схемы оптической задержки можно представить в виде пары пространственных призм (рис. 15а). Первая призма изменяет волновой вектор k падающего поля на k' , что приводит к его пространственному сдвигу. Вторая такая же (но перевернутая) призма меняет вектор k' обратно на k , но оставляет полученный пространственный сдвиг Dd . Пространственные призмы можно заменить временными, так как математически последние приводят к линейной временной задержке (линейной фазе) входящего поля, аналогично тому, как это делает обычная призма в пространстве.

Реализация этой идеи была описана в [17], где пара временных призм моделировалась парой электрооптических фазовых модуляторов (на LiNbO_3) и дисперсионной средой, включенной между ними (рис. 15б). Первый модулятор изменял частоту поля (вносил фазовый сдвиг) $D \omega t$, а второй – возвращал ее обратно, внося фазовый сдвиг $-D \omega t$, тогда как

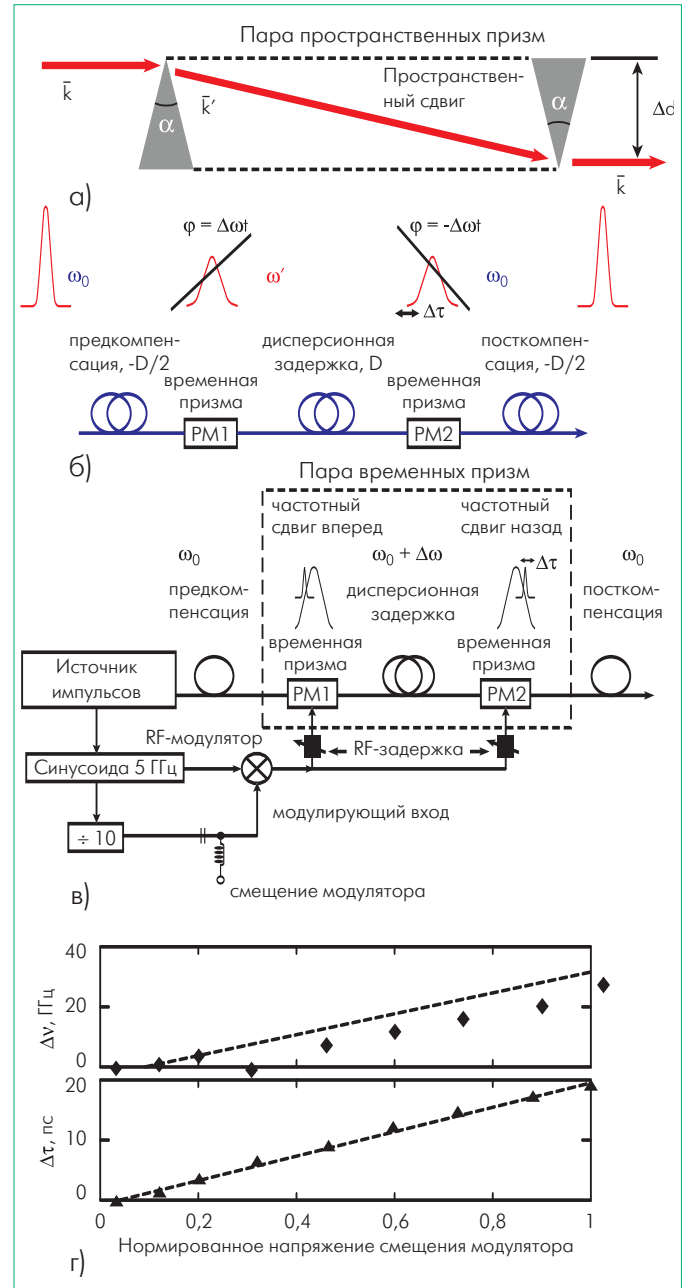


Рис. 15 Схема эксперимента по задержке импульсов парой временных призм с обычным режимом передачи: а) идея использования пары пространственных призм; б) реализация идеи с использованием пары временных призм; в) схема эксперимента с парой призм в обычном режиме; г) зависимость задержки от напряжения смещения модулятора

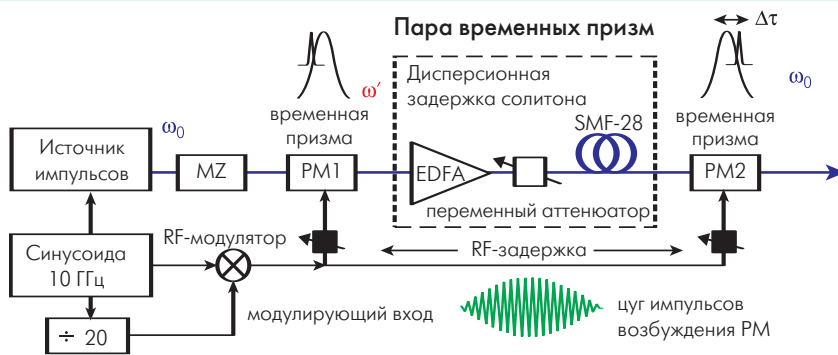


Рис. 16 Схема эксперимента по задержке импульсов парой временных призм с солитонным режимом передачи

дисперсионная среда вносила временную задержку $Dt = \Delta l D$, где l – центральная длина волны падающего цуга импульсов, $\Delta l = (\lambda/2\pi c) D \omega$ – соответствующий сдвиг длины волны, вызванный фазовой модуляцией, а D – дисперсионный параметр (пс/нм).

В схеме эксперимента (рис. 15в) импульсный источник генерировал цуг импульсов (частотой 5 ГГц и длительностью импульсов 8 пс), который компенсировался до (pre-comp) и после (post-comp) для устранения уширения импульсов за счет дисперсионной задержки путем пропускания через катушки волокна с дисперсионным параметром 37 пс/нм каждая. Согласованная с компенсаторами дисперсионная задержка (-74 пс/нм) использовалась для генерации временной задержки. Временные призмы, возбуждаемые 5 ГГц синусоидальным сигналом, модулировались RF-модуляторами, которые управляли напряжением смещения оптических фазовых модуляторов. В результате достигался определенный частотный сдвиг и соответствующая временная задержка (рис. 15г). Максимально достигнутая величина задержки составила 19 пс.

Основным ограничением используемой схемы является то, что дисперсия, используемая для получения необходимой временной задержки, неизбежно приводит к уширению импульсов, которое приходится компенсировать, что уменьшает возможность получения большой относительной задержки (она составила 2,4 для импульсов шириной 8 пс). Устранить эффект уширения импульсов можно, применив, например, солитонный режим распространения волны [9] между временными призмами.

Такую модификацию своего предыдущего эксперимента авторы представили в работе [18]. В схеме модифицированного эксперимента (рис. 16) для демонстрации больших возможностей использовались импульсы длительностью 5,5 пс в цуге 10 ГГц импульсов с центральной частотой 1549,3 нм. Частота повторения цуга импульсов делилась пополам модулятором Маха-Цендера (MZ). Длина волны несущей затем сдвигалась вверх первой временной призмой, или оптическим фазовым модулятором (PM-1), возбуждаемым 10 ГГц синусоидальным сигналом и модулируемым 0,5 ГГц сигналом. Для формирования солитонного режима модулированный сигнал усиливался оптическим усилителем EDFA (примерно до уровня 19–20 дБм) и пропускался через дисперси-

онную среду в виде волокна SMF-28 (2,88 км с общей дисперсией 49 пс/нм). После чего несущая длина волны сдвигалась обратно с помощью второго фазового модулятора (временной призмы PM-2). Достигнутая задержка составила 33 пс, а относительная задержка – 6 (вместо 2,4). Дополнительным преимуществом схемы явилось то, что не нужно было использовать пре- и посткомпенсацию.

Использование когерентной осцилляции населенности СРО

Использование СРО (или КОН) позволяет получить (причем при комнатной температуре) групповую скорость 58 м/с (кристалл рубина [19]), сравнимую с тем, что было получено при глубокой отрицательной температуре в конденсате ВЕС. Что же такое СРО и как оно влияет на характеристики материалов?

Эффект СРО в рубине и александрите. Применительно к экспериментам авторов с рубином (1988 год) в [19,20] приводятся следующие объяснения. В экспериментах для накачки населенности полосы поглощения (зоны 4F_2 кристалла рубина использовался пучок аргонового лазера (длина волны 514,5 нм). Накачанные электроны (в результате релаксации) в течение нескольких пикосекунд переходят из этой зоны на метастабильный уровень и, фактически, возвращаются к основному состоянию в течение нескольких миллисекунд – времени релаксации T_1 . В кристалле рубина распространялся также сигнальный пучок, который приводил к модуляции интенсивности накачки и был представлен в виде боковых по-

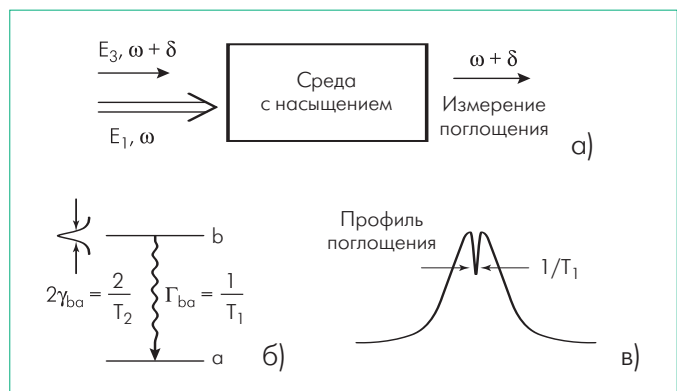


Рис. 17 Когерентные колебания населенности: а) колебания населенности основного состояния; б) распределение населенности; в) спектральный провал в профиле поглощения

лос симметрично сигналу накачки. Этот пучок и вызывал осцилляцию электронной населенности между основным и метастабильным уровнями с частотой биений $\bar{\omega}$ между частотами накачки и сигнала. Однако из-за большого времени релаксации эти осцилляции имели заметную амплитуду тогда, когда произведение $\bar{\omega}T_1 \gg 1$. При выполнении этого условия поглощение сигнальной волны уменьшалось на очень узком частотном интервале порядка $1/T_1$ (37 Гц) (см. профиль поглощения на рис.17в), что приводило к быстрому возрастанию ПП в этой области (особенность, хорошо известная в оптике и описываемая соотношениями Крамерса-Кронига). В результате быстрого спектрального изменения $n(\bar{\omega})$, групповой ПП $n_g = n_0 + \omega dn(\bar{\omega})/d\bar{\omega}$ становится очень большим и скорость $v_g = c/n_g$ резко снижается. Если провал (уменьшение) на спектральном профиле поглощения приводит к замедлению света, то горб (возрастание) на профиле поглощения вызывает ускорение света.

Резюмируя, можно описать суть СРО и его влияние на характеристики материалов так (рис. 17):

- населенность основного состояния осциллирует с частотой биений $\bar{\omega}$ ($\bar{\omega} < 1/T_1$, T_1 – время релаксации населенности), см. рис. 17а,б;
- осцилляция населенности приводит к возникновению провала в спектре поглощения оптического сигнала (рис. 17в);
- быстрые спектральные изменения ПП, ассоциированные с провалом в профиле поглощения (рис. 17в), приводят к огромному групповому ПП в этой области и широкому диапазону его вариаций в различных материалах (кристаллах):
 - сверхмедленный свет наблюдается в кристалле рубина ($n_g > 10^6$), ширина провала 8,4 Гц [19];
 - сверхбыстрый свет наблюдается в кристалле александрита ($n_g = -4 \cdot 10^5$), ширина горба 612 Гц [20];

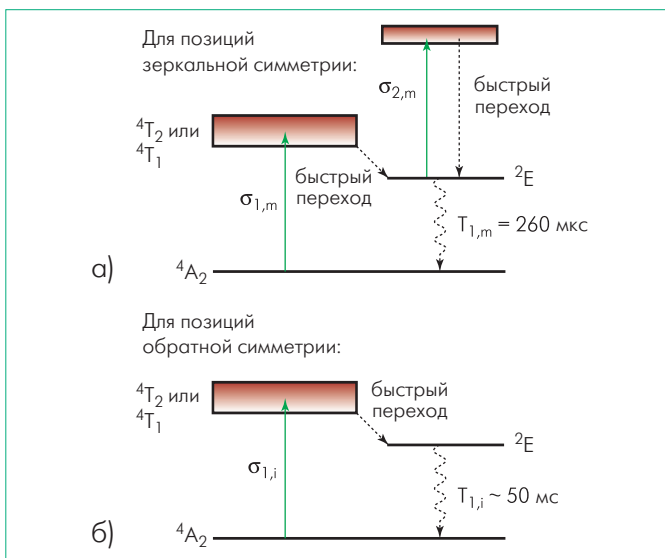


Рис. 18 Диаграммы энергетических уровней для ионов Cr^{3+} в структуре александрита: для иона с позицией зеркальной симметрии (а) и позицией обратной симметрии (б)

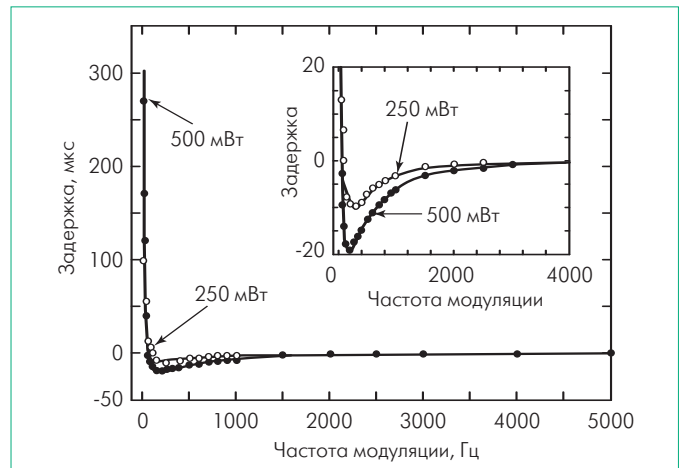


Рис. 19 Зависимость временной задержки от частоты модуляции

- эффект медленного и быстрого света наблюдается при комнатной температуре.

В александрите [20] можно наблюдать как замедление, так и ускорение света. Александрит можно сформировать путем легирования кристалла BeAl_2O_4 ионами Cr^{3+} . Эти ионы замещают ионы Al^{3+} . Одна часть (78%) ионов Cr^{3+} получает зеркальную симметрию, другая – инверсную симметрию. В результате их сечения поглощения s , времена релаксации населенности T_1 и интенсивности насыщения $I_s = \hbar\omega/s_1T_1$ – различны (рис. 18). Ионы с зеркальной симметрией имеют время релаксации населенности 260 мкс, а с инверсной симметрией – 50 мкс. В эксперименте с 4-см кристаллом александрита [20] аргонный лазер накачки (длина волны накачки 488 нм) модулировался по интенсивности синусоидальным сигналом, вызывая появление боковых мод, которые, модулируя сигнальный пучок, взаимодействовали с пучком накачки. На рис. 19 показаны результаты эксперимента в части достигнутой задержки света. Максимально достигнутая задержка составила порядка 300 мкс при частотах модуляции, не превышающих 60 Гц, а максимальное опережение – 20 мкс. Достоинством СРО в кристаллах является большая достижимая величина задержки и опережения. Недостатком – узкая полоса реализации эффекта (единицы-десятки герц).

Эффект СРО в системах с квантовыми точками. Медленный и быстрый свет, объясняемый механизмом СРО, одновременно наблюдается в ряде кристаллов (минералов), а не только в рубине и александрите. Так, в минерале галенит (сульфид свинца – PbS), содержащем п/п квантовые точки в жидком растворе (2,9 нм в диаметре), согласно обзору [2], наблюдается 3 пс задержка 16 пс оптических импульсов длиной волны 795 нм в режиме насыщения интенсивности (по отношению к линейному режиму).

Эффект СРО в SOA. Управляемую задержку, объясняемую механизмом СРО, можно получить и в п/п оптических средах типа п/п оптических усилителей (ПОУ, или SOA). Так в работе [21] сообщается о достижении 40% управляемой относительной задержки коротких (170 фс) импульсов при прохо-

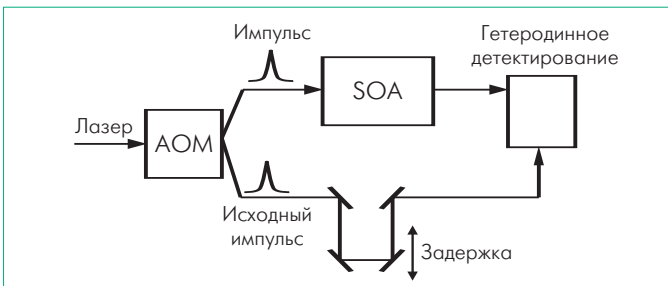


Рис.20 Схема задержки импульсов в SOA с квантовыми точками

ждения их через SOA с квантовыми точками при комнатной температуре. Схема эксперимента приведена на рис.20.

Сигнал от источника импульсов – Ti-сапфирового лазера (длина его волны 1260 нм соответствует переходу основного состояния квантовой точки) подается на акустооптический модулятор (АОМ), работающий на частоте 40 МГц. Биения, моделирующие схему СРО, возникают между импульсами источника и АМ-составляющими импульсами, формируемыми с помощью АОМ, при прохождении комплексного сигнала через SOA. Этот сигнал затем детектируется и сравнивается на выходе с опорным сигналом от АОМ. Характер изменения относительной длительности задержки от энергии входного импульса показан на рис.21. Параметром этого семейства кривых является ток смещения, увеличение которого приводит к уменьшению задержки и переходу из режима задержки в режим опережения.

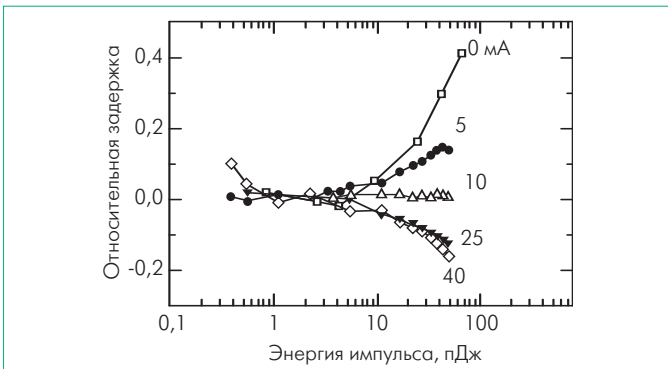


Рис.21 Зависимость задержки усиливаемых импульсов от энергии сигнала накачки

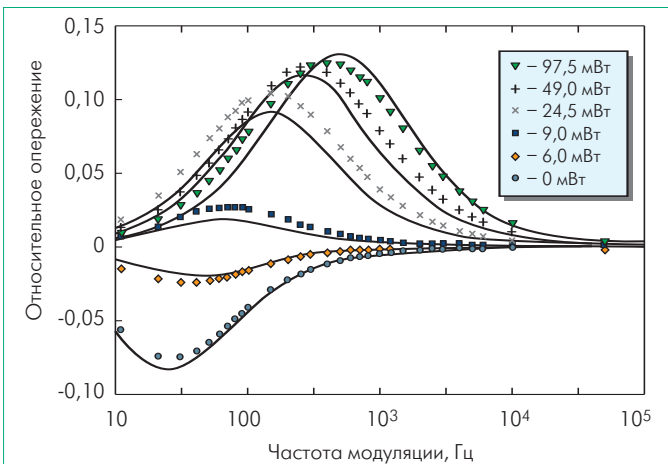


Рис.22 Зависимость относительной задержки от частоты модуляции и мощности накачки

В этих экспериментах (в отличие от СРО в кристаллах) эффект задержки наблюдался при очень малом изменении группового ПП ($\Delta n_g = 4 \cdot 10^{-3}$), однако ширина полосы была очень большой – 2,6 ТГц.

Эффект СРО в усилителях EDFA. Управляемую задержку, объясняемую механизмом СРО, можно наблюдать при комнатной температуре и в оптоволоконных усилителях типа EDFA. Так в работе [22] сообщается, что при передаче через такой усилитель синусоидально модулированного сигнала 1550 нм мощностью 0,8 мВт можно наблюдать как его запаздывание, так и ускорение в зависимости от мощности сигнала накачки 980 нм (рис.22). При этом максимальное относительное запаздывание составило 0,08 при отсутствии накачки. С ростом сигнала накачки оно уменьшалось, и при накачке 9,0 мВт запаздывание перешло в опережение, которое достигло максимума 0,125 при накачке 97,5 мВт. Характер изменения задержки и опережения в зависимости от логарифма величины, обратной ширине импульса, показан на рис.23а,б. Частота модуляции менялась от 10 Гц до 100 ГГц (рис.22), причем на частотах выше 1 кГц практически пропал эффект замедления, а выше 10 кГц – эффект ускорения.

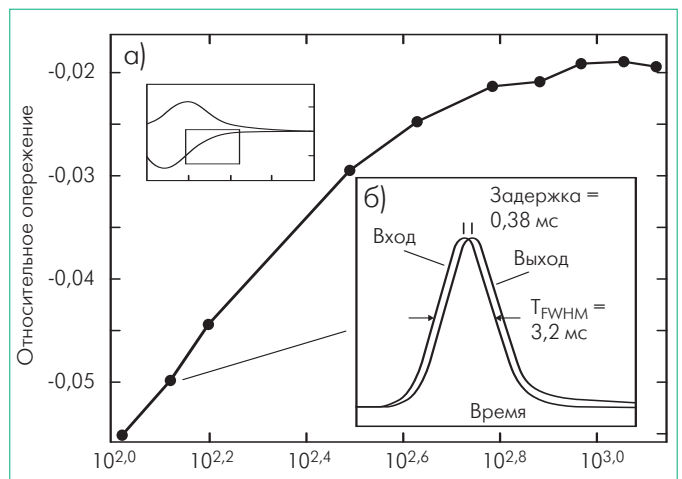


Рис.23 Зависимость относительных величин задержки (а) и опережения (б) от логарифма обратной ширины импульса

ИТОГИ

Замедление и ускорение света в различных средах стало в последнее время предметом пристального внимания исследователей не только потому, что это им интересно, а потому, что это (особенно замедление) важно для выяснения возможностей создания управляемых оптических запоминающих устройств динамического типа – регистров памяти, основных элементов будущих оптических вычислительных устройств – оптических элементов как полностью оптических сетей (AON) пакетной передачи, так и компьютеров будущего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д.Хечт. Замедляем свет и ускоряем передачу данных. Репортаж с конференции OFC-2006. – Наст. номер, с. 10.

2. **R.Boyd** et al. Slow Light in Bulk Materials and Optical Fibers. – OFC-2006, OTuA1.
3. **L.V.Hau** et al. Light speed reduction to 17 m/c in an ultra-cold atomic gas. – Nature, 1999, 397, p.594.
4. **M.Bajcsy** et al. – Letters to Nature, 2003, 426, p.638.
5. **A.V.Rybin** et al. An exact solution of the slow-light problem. – Phys. Review, 2004, Vol.70.
6. **Z.Dutton** and **L.V.Hau**. – Phys. Review A, 2004, Vol.70, p.053831.
7. **A.B.Matsko** et al. Vertically coupled whispering-gallery-mode resonator waveguide. – Optics Letters, 2005, Vol.30, No.22, p.3066.
8. **R.Boyd** et al. – Phys. Review A, 2005, Vol.71, p.023801.
9. **Агравал Г.** Нелинейная волоконная оптика / Пер. с англ. под ред. П.В.Мамышева. – М.: Мир, 1996. – 324 с.
10. **Y.Okawachi** et al. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber. – Phys. Review Letters, 2005, Vol.94, p.153902.
11. **K.Song** et al. Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering. – Optics Express, 2005, Vol.13, No.1, p.82.
12. **Слепов Н.** Семинар компании Corning в Москве. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, №5, с.86–87.
13. **J.Sharping** et al. Wide bandwidth slow light using a Raman fiber amplifier. – Optics Express, 2005, Vol.13, No.16, p.6092.
14. **K.Lee** and **N.M.Lawandy**. Optically induced pulse delay in a solid-state Raman amplifier. – Appl. Phys. Letters, 2001, Vol.78, p.703.
15. **C.Xu** et al. Opt. Express, 2004, Vol.12, No.20, p.4790.
16. **J.Sharping** et al. All-optical, wavelength and bandwidth preserving, pulse delay based on parametric wavelength conversion and dispersion. – Optics Express, 2005, Vol.13, No.20, p.7872.
17. **J. van Howe** and **C.Xu**. Ultrafast optical delay line by use of a time-prism pair. – Optics Letters, 2005, Vol.30, No.1, p.99.
18. **J. van Howe** and **C.Xu**. Ultrafast optical delay line using soliton propagation between a time-prism pair. – Optics Express, 2005, Vol.13, No.4, p.1138.
19. **M.S.Bigelow** et al. Observation of ultraslow light propagation in a ruby crystal at room temperature. – Phys. Review Letters, 2003, Vol.90, p.113903.
20. **M.S.Bigelow** et al. Superluminal and slow light propagation in a room temperature solid. – Science, 2003, Vol.301, p.200.
21. **Mike van der Poel** et al. Controllable delay of ultrashort pulses in a quantum dot optical amplifier. – Optics Express, 2005, Vol.13, No.20, p.8032.
22. **A.Schweinsberg** et al. Observation of superluminal and slow light propagation in erbium-doped optical fiber. – Europhysics Letters, 2006, Vol.73, No.2, p.218.