

- [1] Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / Под ред. Л. Ченга и К. Плога. М.: Мир, 1989. С. 462-546.
- [2] A b s t r e i t e r G., B a u s e r E., F i s c h e r A., P l o o g K. // Appl. Phys. 1978. V. 16. N 4. P. 345-352.
- [3] Андреев В.М., Минтаиров А.М., Нахимович М.В., Смекалин К.Е., Румянцев В.Д., Хвостиков В.П., Якимов А.Ю. Тез. докл. I Всес. конф. по физич. основам твердотельной электроники, т. В, Л., 1989. С. 102-103.
- [4] Алферов Ж.И., Андреев В.М., Конников С.Г., Ларионов В.Р., Погребницкий К.Ю., Хвостиков В.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 2. С. 171-176.
- [5] Рассеяние света в твердых телах / Под ред. М. Кардоны и Г. Гюнтеродта, т. 2. М.: Мир, 1984. С. 65-71.
- [6] S h e m g Y., J a w D., J o u M., S t r i n g f e l l o w G. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. N 8. P. 3285-3288.
- [7] F u k a s a w a R., W a k a k i M., O h t a K., O k u m u r a H. // Jpn. J. Appl. Phys. 1986. V. 25. N 3. P. 652-653.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
20 февраля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 9

12 мая 1990 г.

06.3; 07; 12

© 1990

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АКТИВНЫХ СВЕТОВОДОВ,
ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er^{3+} В КАЧЕСТВЕ
СОЛИТОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

А.Б. Г р у д и н и н, Д.В. К о р о б к и н

В экспериментах [1] был осуществлен квазистационарный режим распространения сверхкоротких импульсов (СКИ) света на длине волны 1,6 мкм благодаря компенсации оптических потерь за счет ВКР-усиления сигнального излучения. Использование непре-

рывной накачки на 1.497 мкм позволило осуществить данный режим распространения на протяжении 4000 км трассы. Однако эффективное ВКР-усиление СКИ света требует удовлетворения достаточно жестких условий на мощность и длину волны излучения накачки, так что подходящие источники не всегда могут быть в наличии.

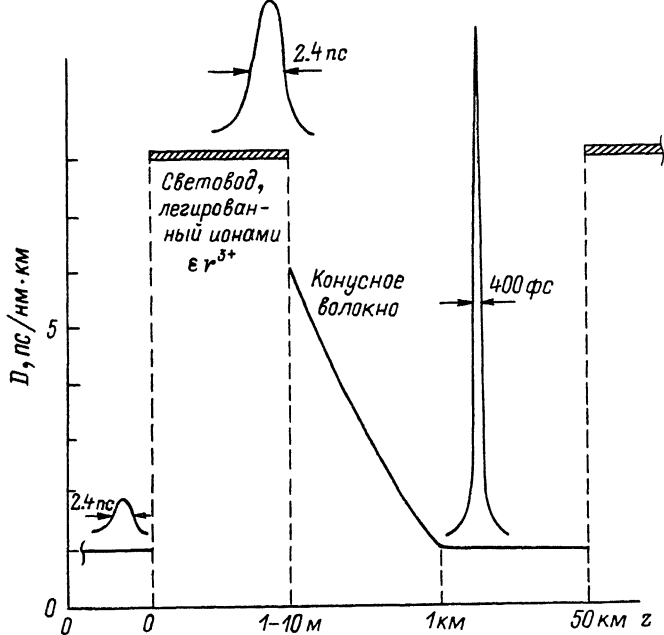
В настоящее время благодаря разработке световодов, легированных ионами Er^{3+} [2], стало возможным усиление СКИ света длительностью вплоть до 70 фс [3] в диапазоне длин волн 1.55 – области минимальных оптических потерь световодов, изготовленных на основе SiO_2 . Оптическая накачка здесь может быть осуществлена практически в любую из многочисленных полос поглощения, таких как 514, 532, 650, 807, 980 нм, 1.49 мкм [4]. Но трехуровневая схема Er^{3+} усилителя налагает ограничения на длину активного световода; обычно используются длины от нескольких сантиметров до нескольких метров [3, 5]. Поэтому в случае значительных коэффициентов усиления возникает проблема, связанная со стабильностью солитонов при неадиабатическом усилении. Известно [6], что при выполнении

$$\text{условия } \frac{\alpha_{yc} L_g}{2} > 0.6 \quad (\alpha_{yc} - \text{коэффициент усиления, см}^{-1}, \\ L_g = \frac{\tau_u^2}{3.1k''}, \tau_u - \text{длительность импульса на полувысоте, } k'' = \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2},$$

k – волновое число, ω – несущая частота) первоначально одно-солитонный импульс может превратиться в связанное состояние двух солитонов, которое затем распадается [7], что недопустимо в линии связи.

Одним из возможных способов решения данной проблемы является использование световода с изменяющейся дисперсией („конусное“ волокно) [8, 9], что позволяет трансформировать много-солитонный импульс в высокоэнергетичный фундаментальный солитон. Фактически процесс усиления проходит в две стадии: собственно усиление в активном световоде и формирование односолитонного импульса с нужными параметрами в „конусном“ волокне.

Оценим параметры системы, состоящей из собственно линии связи и солитонного усилителя. Мы предполагаем, что связь осуществляется при помощи оптических солитонов [10] в диапазоне длин волн 1.55 мкм. Используется световод с рабочей величиной дисперсии групповых скоростей 1 пс/нм·км. При распространении по световоду с потерями солитон уширяется [11]. При уровне потерь $\alpha = 0.16$ дБ/км уширение на длине $L = 50$ км составит ~ 6 раз, согласно теории возмущений [11]. Однако следует отметить, что теория возмущений неадекватно описывает процесс распространения солитона, если трасса, на которой распространяется солитон, существенно превышает некоторую эффективную длину, связанную с потерями и равную $1/\alpha$ [6]. Поэтому наши расчеты представляют собой оценку сверху, т.е. минимальные размеры трассы.



Эволюция солитонов в системе связи (относительные интенсивности импульсов даны не в масштабе).

Основной задачей солитонного усилителя является восстановление формы и энергии солитона, поэтому первоначально он усиливается в 6 раз в сравнительно с L_g коротком куске активного световода. На второй стадии импульс поступает в „конусное“ волокно. Величина начальной дисперсии при этом составляет 6 пс/нм·км, так что здесь импульс является односолитонным. Чтобы осуществить адиабатическое сжатие, параметры „конусного“ волокна должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить условие $L_k \gg L_g$ (L_k – длина „конусного“ волокна). Конечная величина дисперсии – 1 пс/нм·км, так что импульс здесь сожмется в 6 раз с сохранением своей односолитонности. Далее идет отрезок световода длиной 50 км с дисперсией 1 пс/нм·км, и процесс повторяется.

На рисунке изображен импульс в различных частях системы. Следует подчеркнуть, что в данной схеме импульс остается односолитонным, что является важным условием его устойчивости.

Эволюция импульса в световоде с изменяющейся дисперсией описывается уравнением:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial \xi} = \frac{1}{2} \beta(\xi) \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau^2} + |\psi|^2 \psi, \quad \beta(0) = 1. \quad (1)$$

Здесь ψ - нормированная волновая функция, z - нормированное на z_0 "бегущее" время, ξ - нормированная на L_g длина, β - нормированная на начальную величину дисперсия.

$$\text{Заменой [12] } \eta = \int_0^z \beta(\xi') d\xi', \nu = \frac{1}{\sqrt{\beta}} \psi \quad (1) \text{ сводится к виду}$$

$$i \frac{\partial \nu}{\partial \eta} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \nu}{\partial z^2} + |\nu|^2 \nu - i \Gamma(\eta) \nu, \quad \Gamma = \frac{1}{2} \frac{\partial \beta}{\partial \eta} \frac{1}{\beta}. \quad (2)$$

При законе изменения дисперсии $\beta(\xi) = \beta(0) \frac{1}{1 + \alpha \xi}$, $\Gamma = \frac{1}{2} \alpha$.
 Для достижения условия адиабатичности необходимо $\Gamma < 0.6$ [6], тогда $\alpha = 1.2$ и $L_g < \frac{L_k}{4}$.

Современная технология позволяет изготавливать "конусные" волокна длиной до 1 км [9]. Это соответствует длительностям входного и выходного импульсов 2.4 пс и 400 фс соответственно.

Как видно из структуры уравнения (2), использование световода с изменяющейся дисперсией эквивалентно усилению сверхкоротких импульсов, поэтому возможные линейные потери в "конусном" световоде легко компенсируются надлежащим выбором закона изменения дисперсии.

Существует проблема, связанная с непрерывным изменением несущей частоты солитона из эффекта вынужденного комбинационного саморассеяния (ВКС) [13]. В соответствии с теорией [14], несущая частота 400 фс импульса после 50 км сместится в "красную" область на 5 нм (эффективная длина саморассеяния при уровне потерь $\alpha = 0.16$ дБ/км $Z_{\text{эфф}} = \frac{1}{4\alpha} = 6.8$ км). Так как эффективная ширина полосы усиления в световодах, легированных ионами Er^{3+} составляет 50 нм, то данная схема позволяет осуществить не более 10 ретрансляций, что соответствует 500 км трассы.

Одним из способов решения данной проблемы является подавление ВКС за счет эффекта "затягивания" частоты сигнала к центру линии при усилении [15]. Численные оценки показывают, что спектр 100-фемтосекундного импульса значительно (до 10 нм) смещается к центру полосы при усилении. Поэтому для компенсации ВКС необходимо сформировать 100 фс импульс и усилить его в дополнительном световоде.

Таким образом, варьированием коэффициентов усиления в основном и дополнительном активных световодах, выбором соответствующих величин начальной и конечной дисперсий "конусного" волокна, а также введением еще одного волокна с необходимыми потерями можно восстановить начальную энергию, длительность и несущую частоту солитона.

Что же касается развита процесса ВКР с уровня спонтанных шумов, то им можно пренебречь. Действительно, с учетом дисперсионного разбегания длина взаимодействия 400 фс солитона в области 1.55 мкм с шумовой „затравкой“ в области 1.67 мкм (данная частотная отстройка соответствует максимальному значению коэффициента усиления ВКР) при среднем значении дисперсии групповых скоростей 5 пс/нм·км равно $Z = 80$ см. При интенсивности 400 фс солитона $I = 2 \cdot 10^7$ Вт/см² значение инкремента усиления $G = gIz \approx 10^{-2} \ll 15$ - пороговое значение [16] ($g = 6 \cdot 10^{-12}$ см/Вт в области 1.55 мкм).

В заключение оценим скорость передачи информации в данной системе связи. Для предотвращения взаимодействия солитонов расстояние между ними должно не менее чем в 10 раз превышать их длительность [17]. Поэтому в данном случае скорость передачи информации ограничена величиной 50 Гбит/с. Однако следует иметь в виду, что величина интенсивности насыщения в эрбиевых стеклах составляет $I_H \approx 10^4$ Вт/см² и может явиться фактором, ограничивающим скорость передачи информации. Решение этого вопроса требует дополнительных исследований.

Следует отметить, что наши оценки приведены для световодов с экстремально малыми потерями. Использование световодов с большими линейными потерями приведет к пропорциональному сокращению расстояния между ретрансляторами. Так, при уровне потерь $\alpha = 0.2$ дБ/км (коммерчески доступный световод со смещенной дисперсией) соответствующее расстояние между ретрансляторами составит 40 км.

Таким образом, в данной работе предложен солитонный усилитель, позволяющий восстанавливать параметры солитона вплоть до его несущей частоты за счет подавления эффекта вынужденного комбинационного саморассеяния.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] M o l l e n a u e r L.F., S m i t h K. // Opt. Lett. 1988. V. 13. N 8. P. 675-677.
- [2] P o o l e S.B., P a y n e D.N., F e r m a n n M.E. // Electron. Lett. 1985. V. 21. N 17. P. 737-738.
- [3] D i a n o v E.M. et al. VI Intern. symp. Ultrafast phenomena in spectroscopy, Neubrandenburg, GDR 1989, Abstracts, paper PTh 36.
- [4] L a m i n g R.I. et al. XXIV ECOC'88, Brighton, UK, Tech. Digest, Part 2, P. 25-28.
- [5] M e a r s R.J. et al. // Electron. Lett. 1987. V. 23. N 19. P. 1026-1028.
- [6] B l o w K.J., D o r a n N.J., W o o d D. // Jour. Opt. Soc. Am. B. 1988. V. 5. N 2. P. 381-390.

- [7] Грудини́н А.Б. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. № 5. С. 175-177.
- [8] T a j i m a K. // Opt. Lett. 1987. V. 12. N 1. P. 54-56.
- [9] B o g a t y r e v V.A. Nonlinear guided-wave phenomena, Houston, USA, 1989, Postdeadline papers PD9.
- [10] M o l l e n a u e r L.F., S t o l e n R.H., G o r d o n J.P. // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. N 13. P. 1095-1097.
- [11] H a s e g a w a A., K o d a m a Y. // Proc. IEEE. 1981. V. 69. N 9. P. 1145-1150.
- [12] D i a n o v E.M. et al. // Opt. Lett. 1989. V. 14. N 18. P. 1008-1010.
- [13] M i t s c h k e F.M., M o l l e n a u e r L.F. // Opt. Lett. 1986. V. 11. N 10. P. 659-661.
- [14] G o r d o n J.P. // Opt. Lett. 1986. V. 11. N 10. P. 662-664.
- [15] S a r g e n t III M., S c u l l y M.O., L a m b, Jr.W.E, Jr. // Laser physics. London, 1974. 432 p.
- [16] Кузи́н Е.А. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 7. С. 410-413.
- [17] M o l l e n a u e r L.F., G o r d o n J.P., I s l a m M.N. // IEEE J. of Quant. Electr. 1986. V. QE-22. N 1. P. 157-173.

Институт общей физики
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
17 октября 1989 г.
В окончательной редакции
26 февраля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 9

12 мая 1990 г.

06.3; 07

© 1990

СРАВНЕНИЕ ДВУХЛУЧЕВЫХ СХЕМ ОДНОВРЕМЕННОЙ
ЗАПИСИ И СЧИТЫВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ГОЛОГРАММ
В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ ТИПА $Bi_{12}SiO_{20}$

А.А. Камшилин, Е.В. Мокрушина

Динамические среды для записи голограмм (в частности, фото-рефрактивные кристаллы) позволяют проводить считывание объемных голограмм одновременно с их записью. Особый интерес пред-