

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Е. М. Дианов, З. С. Никонова, В. Н. Серкин, Влияние частотной модуляции на взаимодействие импульсов в волоконных световодах,  
*Квантовая электроника*, 1986, том 13, номер 8, 1740–1743

<https://www.mathnet.ru/qs7364>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением  
<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.82

20 мая 2025 г., 20:15:33



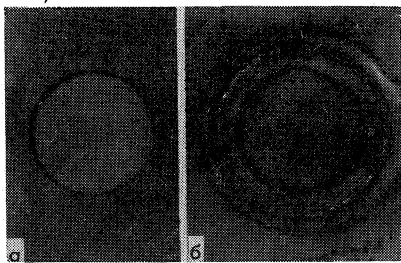


Рис. 3. Кольцевой разрез в листовой нержавеющей стали лучом YAG : Nd-лазера в импульсном (а) и непрерывном (б) режимах

Толщина пластины 0,8 мм, диаметр разреза 27 (а) и 32 мм (б), длительность импульса 0,8 мс, частота повторения 12 Гц, средняя мощность импульсного и мощность непрерывного излучения 50 Вт

прерывного лазера с мощностью 50 Вт. Видно, что качество разреза, полученного в импульсном режиме обработки, существенно выше, чем в непрерывном. Такое различие, очевидно, связано с влиянием теплопроводности и нелинейностью взаимо-

действия лазерного излучения с металлом, приводящего к его разрушению. В случае импульсного излучения теплоотвод из зоны воздействия играет значительно меньшую роль, а эффективность взаимодействия выше, поскольку пиковая мощность на два порядка больше, чем в случае непрерывного излучения (при той же средней мощности).

Были проведены также эксперименты по применению разработанного лазера в хирургии — для разрушения камней желчного пузыря и его протоков, камней почек и мочевого пузыря. Излучение лазера подводилось к разрушаемому образцу камней, помещенным в естественную жидкую среду, с помощью световода. Эти эксперименты показали, что, варьируя длительность, частоту повторения импульсов и их энергию, удается получить эффективное разрушение (дробление) камней различного типа.

Таким образом, разработанный YAG : Nd-лазер является перспективным для технологических, медицинских и других применений, в которых необходимо достаточно мощное излучение с варьируемой длительностью импульсов в микро- и миллисекундном диапазонах длительностей.

1. Н. Н. Крылов. Теоретические основы радиотехники. — М. — Л.: Морской транспорт, 1953.
2. Г. Л. Бенедиктов, А. Е. Овчаренко, В. М. Опре. ПТЭ, № 5, 95 (1955).
3. Ю. С. Забродин. Узлы принудительной конденсаторной коммутации тристоров. — М.: Энергия, 1974.

Институт общей физики АН СССР, Москва

Поступило в редакцию

25 ноября 1985 г.,

после доработки — 11 марта 1986 г.

V. Kh. Bagdasarov, N. N. Denisov, A. A. Manenkov, A. N. Starkovskii. A YAG : Nd Laser With Pulse Duration Tuning in the Range of 0.2—10 ms.

A repetitively pulsed free-running laser is developed with tunable pulse duration in the range of 0.2—10 ms. A schematic diagram is described of the miniature pump lamp power supply unit which is based on cutting out a portion of the sinusoidal supply-line voltage. The experiments have shown that this laser offers promise for physical research on the interaction between the laser radiation and various materials, for technology of processing of various materials and in surgery.

«Квантовая электроника», 13, № 8 (1986)

УДК 621.396.22.029.7

Е. М. Дианов, З. С. Никонова, В. Н. Серкин

### ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСОВ В ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

*Показано, что регулярная фазовая модуляция приводит к уменьшению нелинейного взаимодействия между оптическими солитонами и к подавлению сигнала «помехи», возникающего при взаимодействии многосолитонных импульсов.*

Реализация солитонных режимов распространения оптических импульсов в волоконных световодах (ВС) открывает новые перспективы в разработке высокоинформативных ВОЛС [1—4]. В отличие от линейных систем связи, в которых ско-

рость передачи информации ограничивается дисперсией групповой скорости каналлируемых импульсов, в нелинейных ВОЛС на солитонах скорость передачи информации будет ограничиваться линейными оптическими потерями излучения в ВС и не-

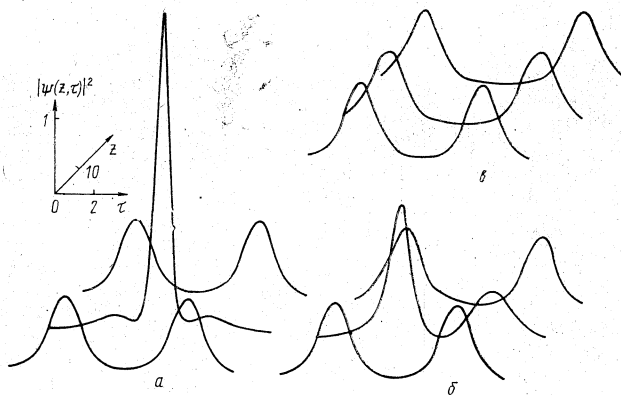


Рис. 1. Динамика взаимодействия солитонов на одном периоде  $P$  в отсутствие диссипации энергии

линейным взаимодействием солитонов на тактовом интервале посылки импульсов.

Предметом настоящей работы является анализ возможности использования для целей передачи информации нелинейных режимов распространения импульсов с регулярной фазовой модуляцией (ФМ). Показано, что ФМ позволяет управлять характером нелинейного взаимодействия солитонов в ВС. Так, ФМ может привести к подавлению эффекта периодического «слияния» солитонов в линии передачи.

Физическая картина взаимодействия солитонов огибающей нелинейного уравнения Шредингера (НУШ)

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau^2} + R |\psi|^2 \psi - i \gamma \psi \quad (1)$$

в отсутствие диссипации энергии ( $\gamma=0$ ) наиболее подробно исследовалась в [5–6]. Применительно к задачам передачи информации оптическими солитонами аналогичные результаты получены недавно в [7, 8]. Как показано в [6], динамика слабозадействующих солитонов тождественна динамике классических частиц с парным потенциалом взаимодействия. При действительных начальных условиях вида

$$\psi = (z=0, \tau) = \text{sech}(\tau - \Delta/2) + \text{sech}(\tau + \Delta/2), \quad (2)$$

представляющих наибольший интерес в задачах передачи информации по ВС, оказывается возможным существование связанных состояний солитонов, при которых расстояние между солитонами и сдвиги их фаз периодически изменяются во времени: солитоны периодически сближаются от максимального расстояния между ними вплоть до полного перекрытия волновых полей (рис. 1, а). Асимптотическая зависимость периода колебаний связанной пары солитонов (2) от максимального расстояния  $\Delta$  между ними имеет следующий вид при  $\Delta \gg 1$  [5–8]:

$$P = (\pi/2) \exp(\Delta/2). \quad (3)$$

Таким образом, эффект нелинейного взаимодействия солитонов приводит к пол-

ной потере информации в точке перекрытия волновых полей — длине «слияния» солитонов.

В [8–10] рассматривались различные способы уменьшения взаимодействия между солитонами: введение сдвига по фазе на  $\pi$  в начальных импульсах [9], инжекция солитонов различной амплитуды и фазы [8]. В данной работе мы хотим обратить внимание еще на одну возможность управления силами взаимодействия между солитонами с помощью фазовой модуляции начальных импульсов.

Известно [11], что регулярная фазовая модуляция препятствует достижению стационарного режима распространения импульса в ВС: его амплитуда и длительность осциллируют с расстоянием в противофазе. При этом тот факт, что дисперсия фазово-модулированного импульса осциллирует в ограниченном интервале [11], позволяет предложить импульс с регулярной ФМ для передачи информации по ВС. Однако следует подчеркнуть, что величина частотной модуляции в импульсе ограничивается условиями существования солитонного режима:  $H < 0$ , где  $H$  — гамильтониан уравнения (1), и не должна превышать критического значения  $\beta_{кр}$  [12].

Рассмотрим динамику нелинейного взаимодействия импульсов с ФМ следующего вида:

$$\psi(z=0, \tau) = \text{sech}(\tau - \Delta/2) \exp[-i\beta \text{sech}^2(\tau - \Delta/2)] + \text{sech}(\tau + \Delta/2) \exp[i\beta \text{sech}^2(\tau + \Delta/2)]. \quad (4)$$

При взаимодействии импульсов вида (4) эффекты рассогласования их фаз и противофазные осцилляции длительности приводят к уменьшению «сил притяжения» между солитонами. Как показывают численные расчеты, для каждого фиксированного значения параметра  $\Delta$  существует оптимальное значение скорости частотной модуляции в импульсе  $\beta_{орт}$ , при котором траектории солитонов не претерпевают значительных изменений с расстоянием. На рис. 1, а, б показаны характерные особенности взаимодействия солитонов, рас-

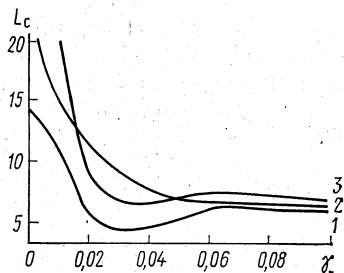


Рис. 2. Зависимости длины «слияния»  $L_c$  от уровня линейных оптических потерь в ВС  $\gamma$ , рассчитанные при  $\beta=0$  (1);  $\beta=0,5$  (2) и  $\beta=1,0$  (3)

считанные при  $\Delta=6$ ,  $\beta=0$  (а) и  $\beta=\beta_{opt}=0,3$  (б).

«Силы притяжения» солитонов к общему центру масс определяются степенью перекрытия «хвостов» отдельных солитонов [5, 6], поэтому фазовая модуляция излучения в области перекрытия «хвостов» ( $\tau=0$ )

$$\psi(z=0, \tau) = [\text{sech}(\tau - \Delta/2) + \text{sech}(\tau + \Delta/2)] \exp[i\beta \text{sech}^2(\tau/\eta)] \quad (5)$$

приведет к эффективному уменьшению взаимодействия между солитонами. Как и в случае (4), существует область оптимальных значений  $\eta_{opt}$ ,  $\beta_{opt}$ , при которых не происходит существенных искажений траекторий канализуемых импульсов (рис. 1, в,  $\beta=1$ ,  $\eta=1$ ).

Оптические потери значительно искажают динамику взаимодействия солитонов. Определим длину «слияния»  $L_c$ , на которой происходит практически полное перекрытие волновых полей отдельных солитонов, следующим соотношением:

$$|\psi_{\max}(L_c, \tau)|^2 - |\psi(L_c, \tau=0)|^2 \leq 0,1 |\psi_{\max}(L_c, \tau)|^2, \quad (6)$$

где  $|\psi_{\max}(L_c, \tau)|^2$  — максимальная интенсивность импульса.

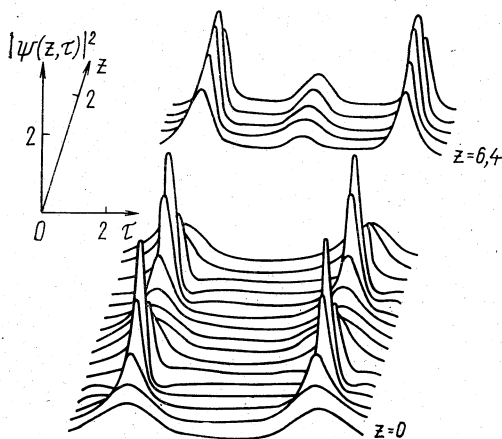


Рис. 3. Динамика взаимодействия связанных состояний солитонов НУШ ( $R=4$ )

На рис. 2 показаны зависимости  $L_c$  от безразмерных оптических потерь  $\gamma$ , рассчитанные при начальных условиях вида (5) и  $\beta=0; 0,5; 1$ . Как следует из проведенных расчетов, значительное увеличение  $L_c$  происходит в области параметров  $\gamma \leq 0,01$  и  $\beta \approx 1$ . При увеличении потерь совместное действие эффектов нелинейного расплывания импульсов [12] и их взаимодействия приводит к уменьшению  $L_c$ . Поэтому ФМ начальных импульсов не дает преимуществ при передаче информации на большие расстояния в ВС с уровнем потерь  $\gamma > 0,01$ .

Как показывают численные расчеты, характерной чертой взаимодействия  $N$ -солитонных импульсов ( $R \geq 4$ ) является возникновение сигналов «помехи», приводящее к частичной потере информации (рис. 3). Частотная модуляция вида (5) позволяет подавить возникновение сигналов «помех». На рис. 4 показаны рассчитанные зависимости максимальной интенсивности сигнала «помехи» от длины нелинейного взаимодействия импульсов в сравнении со случаем взаимодействия немодулированных по частоте импульсов. Увеличение скорости сканирования частоты в области перекрытия «хвостов» импульсов приводит к уменьшению максимальной интенсивности сигнала «помехи».

Таким образом, использование фазомодулированных импульсов для передачи информации в солитонных ВОЛС позволит существенно подавить эффекты «слияния» солитонов в ВС и возникновения сигналов «межсимвольных помех».

При практической реализации предложенного способа наиболее перспективными методами предварительной ФМ информационных импульсов являются метод сканирования частоты в капиллярах, заполненных сильно нелинейными средами ( $CS_2$ ,  $CCl_4$  и т. д.), и метод обращения ФМ, предложенный недавно в [13]. Укажем также допустимые отклонения закона ФМ импульсов (5), при которых необходимый эффект подавления нелинейного слияния солитонов сохраняется. С этой целью в расчетах варьировались скорость частотной модуляции  $\beta$  и ширина модулируемой области  $\eta$ . Как показывают расчеты, при уменьшении параметров  $\beta$  и  $\eta$  эффект «расталивания» солитонов исчезает уже при  $\beta=0,5\beta_{opt}$  и  $\eta=0,5\eta_{opt}$ . При увеличении скорости свипирования частоты  $\beta$  и ширины модулируемой области  $\eta$ , начиная со значений  $\beta=2\beta_{opt}$  и  $\eta=2\eta_{opt}$ , солитоны

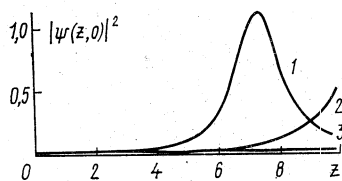


Рис. 4. Зависимость максимальной интенсивности импульса «помехи» от длины  $z$  при  $\beta=0$  (1);  $\beta=0,5$  (2) и  $\beta=1,0$  (3)

вообще расходятся, так что на трассах длиной  $z \approx 30z_d$  ( $z_d$  — дисперсионная длина) расстояние между ними достигает  $\Delta = 2\Delta_0 = 12$ .

Приведем оценки основных параметров задачи, при которых возможна экспериментальная реализация рассмотренных выше эффектов. При начальной длительности импульсов  $\tau_0 = 3$  пс, уровне оптических по-

терь  $\gamma = 0,01$  ( $\Gamma = 0,2$  дБ/км) и дисперсии групповой скорости  $D = 15$  пс/(нм·км) критическая мощность формирования солитона  $P = 0,8$  Вт,  $z_d = \tau_0^2 / |k''_{\omega_0}| = 0,5$  км,  $\omega_{\max} - \omega_0 = 0,77$  ( $\beta/\tau_0$ ) =  $0,26 \cdot 10^{12}$  рад/с.  $L_c = 10$  км. При тактовом интервале посылок импульсов  $T = 6\tau_0$  можно достигнуть скорости передачи информации  $M = 500$  Гбит·км/с.

1. A. Hasegawa, J. Kodama. *Proc. IEEE*, **69**, 1145 (1981).
2. В. А. Выслоух. *УФН*, **136**, 519 (1982).
3. K. J. Blow, N. J. Doran. *IEEE J. QE-19*, 1883 (1983).
4. A. B. Shvartsburg, I. N. Sysakyan. *Opt. Quant. Electron.*, **16**, 207 (1984).
5. V. I. Karpman, V. V. Solov'ev. *Physica*, **3D**, 142 (1981).
6. K. A. Gorshkov, L. A. Ostrovsky. *Physica*, **3D**, 428 (1981).
7. K. J. Blow, N. J. Doran. *Electron. Letts*, **19**, 429 (1983).
8. J. P. Gordon. *Optics Letts*, **8**, 596 (1983).
9. B. Hermansson, D. Yevick. *Electron. Letts*, **19**, 570 (1983).
10. P. L. Chu, C. Desem. *Electron. Letts*, **21**, 228 (1983).
11. А. М. Фаттахов, А. С. Чиркин. *Квантовая электроника*, **11**, 2349 (1984).
12. Е. М. Дианов, З. С. Никонова, В. Н. Серкин. Препринт ИОФАН, М., 1985, № 13.
13. Р. Данелюс, А. Пискаркас, В. Сируткайтис и др. *Письма в ЖЭТФ*, **42**, 101 (1985).

Институт общей физики  
АН СССР, Москва

Поступило в редакцию  
25 ноября 1985 г.

E. M. Dianov, Z. S. Nikonova, V. N. Serkin. An Effect of the Frequency Modulation on the Interaction of Pulses in Fiber-Optic Waveguides.

The regular phase modulation is shown to result in weakening of the nonlinear interaction between optical solitons and in suppression of the «interference» signal which arises under the interaction of multisoliton pulses.

#### КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, т. 13, № 8, 1986

Научные редакторы А. К. Запольский, д-р ф.-м. н. В. С. Зуев,  
к. ф.-м. н. Б. Ф. Полковников, к. ф.-м. н. А. С. Семенов  
Редакторы Т. С. Волохова, М. Л. Гартаницкая, А. И. Корнилова, Т. А. Рештакова  
Технический редактор Т. Н. Зыкина  
Корректор Т. В. Покатова

Сдано в набор 12.06.86. Подписано в печать 24.07.86. Т-07600 Формат 70×108<sup>1/16</sup>.  
Печать высокая. Усл. п. л. 18,2. Усл. кр.-отт. 18,725. Уч.-изд. л. 20,55. Изд. № 21790.  
Зак. № 1636 Цена 2 р. 80 к.

Адрес редакции: 117924, ГСП, Москва, В-333, Ленинский проспект, 53. Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР. Телефоны 132-66-66, 135-02-17

Ордена Трудового Красного Знамени Чеховский полиграфический комбинат ВО «Союзполиграфпром» Государственного комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, г. Чехов Московской области