

Полностью оптический шейпинг трёхмерного солитона самоиндуцированной прозрачности в парах ^{87}Rb

С. Н. Багаев¹, И. Б. Мехов², И. А. Чехонин², М. А. Чехонин²

¹ Институт Лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Впервые экспериментально исследованы солитоны теории самоиндуцированной прозрачности (SIT) лазерных импульсов со сходящимся цилиндрическим волновым фронтом в парах ^{87}Rb (резонансный переход D_2 , длина волны 780,24 нм). Целью работы является разработка прототипов новой элементной базы резонансной радиофотоники (quantum microwave photonics) для лазерного процессинга сигналов в СВЧ области спектра. В каустике пучка лазерного импульса накачки $E(t, x) = E(t) \cdot f(x)$ пространственный профиль поля имел вид или $f(x) = G(x)$ (функция Гаусса), или $f(x) = \sin(x)/x$. Обсуждается эффективность применения разработанных нами компьютерных синтезированных голограмм (CGH) для создания произвольного пространственного профиля импульса накачки $f(x)$. Импульсная мощность лазера не превышала 8.5 мВт при длительности импульса 4–5 нс, временное разрешение системы регистрации — 27 пс. В проведённых экспериментах показано, что полностью оптический контроль несущей частоты входного импульса $E(t)$ определяет величину шейпинга выходного импульса — (i) величину компрессии длительности выходного импульса (строб-импульс), (ii) величину оптической задержки солитона, (iii) величину гетеродинирования несущей частоты солитона.

Ключевые слова: Самодифракция, Площадь импульса, Радиофотоника, Компьютерная синтезированная голограмма.

Цитирование: Багаев, С. Н. Полностью оптический шейпинг трёхмерного солитона самоиндуцированной прозрачности в парах ^{87}Rb / С. Н. Багаев, И. Б. Мехов, И. А. Чехонин, М. А. Чехонин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 40–45.

Введение

Впервые трехмерные солитоны обобщенной теории самоиндуцированной прозрачности (SIT) экспериментально наблюдались в [1] для случая сходящегося сферического волнового фронта импульса. Теория трехмерных солитонов для сходящегося сферического волнового фронта с гауссовым распределением поля по радиусу $E(t, r) = E(t) \cdot G(r)$ была развита в последующих работах, в которых этот эффект получил название «Supertransparency» [2–4].

Теоретически было показано, что 2π -импульс (солитон классической теории самоиндуцированной прозрачности МакКола–Хана) является лишь *частным случаем* трехмерного солитона при том условии, что падающий лазерный импульс имеет идеальный плоский волновой фронт.

1. Экспериментальная установка

В данной работе сообщается о наблюдении трехмерных солитонов SIT для случая цилиндрического волнового фронта импульса с пространственным профилем поля в

каустике сфокусированного пучка $E(t,x) = E(t) \cdot f(x)$ в виде $f(x) = G(x)$ (функция Гаусса) или $f(x) = \sin(x)/x$.

Лазер накачки состоит из непрерывного одночастотного лазерного диода с шириной линии генерации 100 кГц, который может перестраиваться вблизи частоты резонансной линии D_2 ^{87}Rb ($\lambda = 780.24$ нм). Дискретная перестройка частоты генерации в пределах ± 3500 МГц в окрестности линии D_2 ^{87}Rb производится изменением тока инжекции задающего лазерного диода с помощью программируемого в LabVIEW DAQ-устройства NI USB-6363.

Лазерный диод является задающим генератором для импульсного лазерного усилителя.

Полупроводниковый лазерный усилитель возбуждается наносекундным генератором тока. На выходе усилителя формируется лазерный импульс с длительностью 4–5 нс и мощностью 10 мВт с частотой повторения импульсов 200 кГц. Таким образом, энергия импульса не превышает 40 пДж.

Параллельный гауссовый пучок диаметром 800 мкм направляется на регулируемую оптическую щель. Затем в фокальной плоскости цилиндрической линзы с фокусным расстоянием $F = 100$ мм формируется необходимый профиль лазерного пучка накачки $E(x)$ в резонансной ячейке с парами рубидия.

В случае пространственного профиля в виде функции Гаусса, его размер по координате x составляет 20 мкм, распределение $E(x)$ в каустике пучка имеет вид: $E(x) = E_0 \cdot \exp[-(x/\sigma)^2]$, $\sigma = 0,017$ мм.

При формировании пространственного профиля поля с помощью оптической щели в виде дифракционного паттерна $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$, $E(x) = E_0 \cdot \text{sinc}(\beta x)$, ($\beta = 24,3$ мм $^{-1}$).

Лазерный импульс накачки фокусируется цилиндрической линзой в ячейку с изотопически чистым рубидием ^{87}Rb . Концентрация атомов Rb изменяется от $N_0 = 1,87 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$ ($T = 32,0$ °C) до $N_0 = 4,08 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$ ($T = 98,0$ °C).

Излучение, выходящее из ячейки, проецируется объективом на торец одномодового световода диаметром 10 мкм и направляется в Single Photon Avalanche Diode (SPAD).

Импульсы от одиночных фотонов, сформированные SPAD, поступают в многоканальный временной анализатор, который формирует временную гистограмму зарегистрированных фотонов – число фотонов на временной канал. Число каналов – 4096. Временное разрешение всей системы регистрации определяется временным разрешением применённого SPAD и составляет 27 пс.

2. Полученные результаты

Трёхмерные солитоны SIT были обнаружены в экспериментах с импульсами накачки, имеющими пространственный профиль накачки в виде функции Гаусса: $E(x) = E_0 \cdot \exp[-(x/\sigma)^2]$, $\sigma = 0,017$ мм при концентрации атомов рубидия $N_0 = 8,93 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$.

Затем трёхмерные солитоны SIT были воспроизведены и для иного пространственного профиля поля вида $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$, $E(x) = E_0 \cdot \text{sinc}(\beta x)$, ($\beta = 24,3$ мм $^{-1}$) при концентрации атомов рубидия $N_0 = 4,08 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$.

Выходные импульсы из ячейки с рубидием регистрировались под углом $\varphi = 0$.

На рисунке 1 приведены формы выходных лазерных импульсов при отстройке частоты лазера в длинноволновую область спектра от частоты резонанса атомов рубидия.

Как видно на рисунке 1, на длинноволновом крыле линии D_2 ^{87}Rb наблюдается формирование трехмерного солитона SIT с крутым передним фронтом, компрессией длительности в 3–4 раза и его задержкой во времени (см. также рис. 2). Временная задержка солитона сокращается при увеличении $\Delta\nu$. Соответственно, скорость солитона увеличивается от $C/30$ до $C/6$. Энергия импульса при распространении в плотной резонансной поглощающей среде практически не изменяется.

При дальнейшем увеличении расстройки $\Delta\nu$ происходит скачкообразный возврат формы выходного импульса к форме входного импульса (см. рисунки 1 и 2б).

В соответствии с существующей теорией, при перестройке частоты лазера на коротковолновом крыле линии D_2 ^{87}Rb солитон SIT не наблюдается (см. рисунок 3). Как видно на рисунке 3, при уменьшении частотной расстройки $\Delta\nu$ наблюдается лишь затягивание переднего фронта импульса и появление дополнительных осцилляций на заднем фронте импульса.

Важно отметить, что солитон МакКола–Хана классической теории самоиндуцированной прозрачности (SIT) (для плоского волнового фронта) должен возникать при совпадении частоты лазерного импульса с частотой атомного резонанса линии D_2 ^{87}Rb ($\Delta\nu = 0$).

Однако, как показывают данные эксперименты, при сходящемся цилиндрическом волновом фронте трехмерный солитон SIT возникает только на длинноволновом крыле линии D_2 ^{87}Rb (см. рисунок 1).

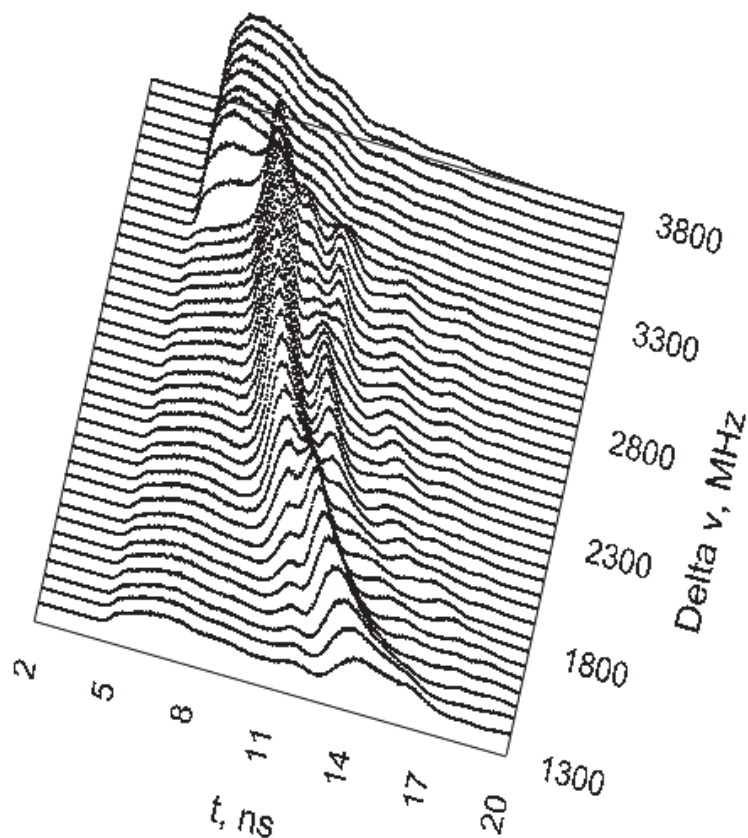
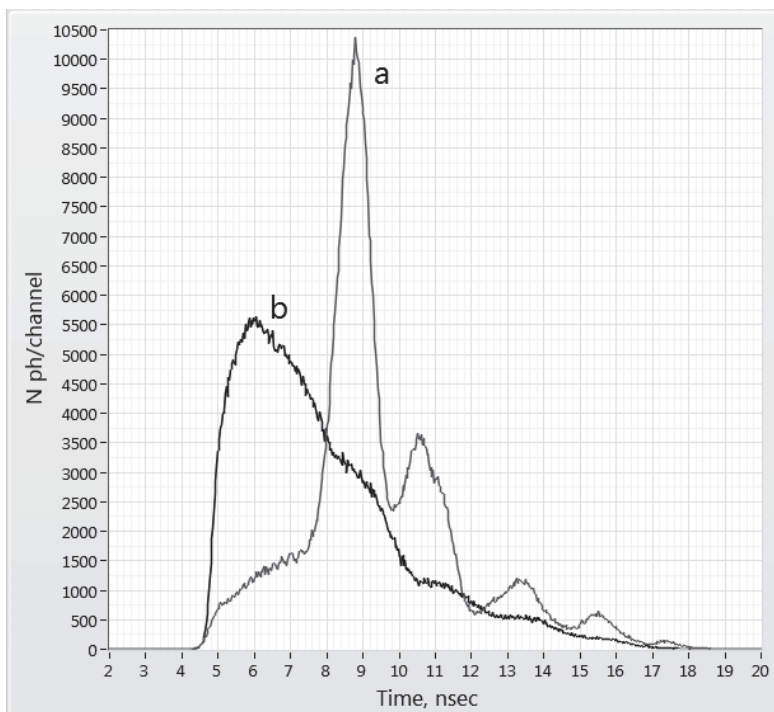


Рис. 1. Форма выходного импульса при изменении расстройки $\Delta\nu$ импульса накачки в длинноволновой области спектра перехода D_2 ^{87}Rb . "Delta ν , MHz" = " $\Delta\nu$, MHz"



(a) форма солитона SIT при $\Delta\nu = 2692$ МГц в длинноволновой области спектра перехода D_2 ^{87}Rb
 (b) форма выходного импульса при $\Delta\nu = 3414$ МГц в длинноволновой области спектра перехода D_2 ^{87}Rb .
 При данной частотной расстройке $\Delta\nu$ солитон SIT отсутствует

Рис. 2. Форма выходного импульса из ячейки с ^{87}Rb

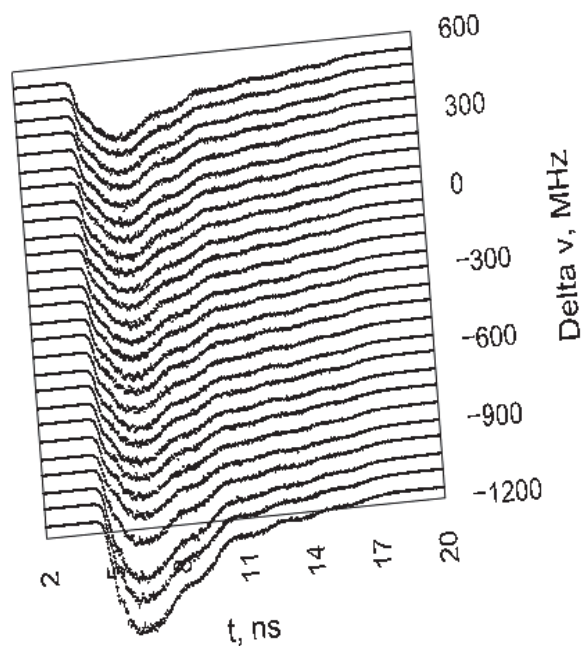


Рис. 3. Форма выходного импульса при изменении расстройки $\Delta\nu$ импульса накачки в коротковолновой области спектра перехода D2 87Rb. "Delta ν , MHz" = " $\Delta\nu$, MHz"

Заключение

В заключение следует сделать одно существенное замечание. Насколько нам известно, существующая теория трехмерных солитонов SIT разработана только для сходящегося сферического волнового фронта с гауссовым распределением амплитуды по радиусу $E(r)$.

Как показывают проведённые эксперименты, эффект образования трёхмерных солитонов SIT теперь наблюдается в гораздо более широких условиях — для сходящегося цилиндрического волнового фронта с различным пространственным профилем $f(x)$: функцией Гаусса $G(x)$ и $\sin(x)/x$. Фундаментальная теория таких солитонов в настоящее время отсутствует.

В проведённых экспериментах показано, что полностью оптический контроль несущей частоты входного импульса $E(t)$ определяет величину шейпинга выходного импульса — (i) величину компрессии длительности выходного импульса (строб-импульс), (ii) величину оптической задержки солитона, (iii) величину гетеродинирования несущей частоты солитона.

Благодарность

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 17–19–01097.

Список источников

- [1] **Egorov, V. S.** Characteristics of coherent propagation of a superradiant pulse through an optically dense resonantly absorbing medium / V. S. Egorov, N. M. Reutova // Optics and Spectroscopy. — 1989. — Vol. 66. — № 6. — P. 716–718.
- [2] **Козлов, В. В.** К теории самоиндуцированной прозрачности в сфокусированном световом пучке / В. В. Козлов, Э. Е. Фрадкин // Письма в ЖЭТФ. — 1991. — Том 54. — № 5. — С. 266–269.

- [3] **Egorov, V. S.** Supertransparency of a resonantly absorbing medium for short pulses with a nonplane wave front / V. S. Egorov, E. E. Fradkin, V. V. Kozlov, N. M. Reutova // *Laser Physics*. — 1992. — Vol. 2. — P. 973.
- [4] **Kozlov, V. V.** Supertransparency / V. V. Kozlov, E. E. Fradkin, V. S. Egorov, N. M. Reutova // *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* — 1996. — Vol. 110. — P. 1688–1711.

All-optical shaping of a 3D self-induced transparency soliton in ^{87}Rb vapours

S. N. Bagayev², I. B. Mekhov¹, I. A. Chekhonin¹, M. A. Chekhonin¹

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

² Institute of Laser Physics, Novosibirsk, Russia

We experimentally study for the first time the solitons of self-induced transparency of laser pulses with converging cylindrical wave front in ^{87}Rb vapours (the D_2 resonant transition of the 780.24 nm wavelength). Our aim is the development of prototypes for new devices of quantum microwave photonics for laser signal processing in the super high frequency range (microwave range). In the caustic of the pump laser pulse $E(t,x) = E(t) \cdot f(x)$, the spatial field profile was either $f(x) = G(x)$ (Gaussian), or $f(x) = \sin(x)/x$. We discuss the efficiency of the developed synthesised computer generated holograms (CGH) for creation of an arbitrary spatial profile of the pump pulse $f(x)$. The pulse laser power did not exceed 8.5 mW at the pulse duration of 4–5 ns, the temporal resolution of the system was 27 ps. In the experiments we have shown that the all-optical control of the carrier frequency of the input pulse $E(t)$ defines the value of the shaping of the output pulse: (i) the value of the compression of the output pulse (strobe-pulse), (ii) the value of the optical delay of the soliton, and (iii) the value of the heterodyning of the soliton carrier frequency.

Keywords: Self-induced transparency, Soliton, Quantum microwave photonics, Computer generated hologram.