

УДК 621.373.8

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ  
В КВАДРАТИЧНО-НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛАХ  
С УПРАВЛЯЕМОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

*В.Е. Лобанов, В.А. Черных, А.П. Сухоруков*

Аннотация

Изучена динамика распространения и взаимодействия предельно-коротких оптических импульсов в квадратично-нелинейных средах с модулированной дисперсией. Показано, что периодическая модуляция знака расстройки скоростей и коэффициента дисперсии третьего порядка позволяет подавить разбегание и декомпрессию импульсов, что существенно увеличивает эффективность их взаимодействия.

**Ключевые слова:** предельно короткий импульс, одноосный кристалл, квадратичная нелинейность, расстройка скоростей, дисперсия третьего порядка, управляемая дисперсия, модуляция

В последнее время предельно короткие импульсы (ПКИ), или импульсы, содержащие малое число осцилляций поля, нашли широкое применение в спектроскопии, медицине, диагностике материалов [1–4]. Одной из проблем, возникающей при работе с ПКИ, является сильное влияние дисперсионных эффектов, искажающих форму импульсов и снижающих эффективность взаимодействия. В настоящей работе предлагается компенсировать негативное влияние дисперсии путём модуляции параметров квадратично-нелинейной среды, таких, как расстройка скоростей, коэффициент дисперсии третьего порядка.

Воспользуемся для анализа распространения и взаимодействия ПКИ в одноосных кристаллах методом медленно меняющегося профиля, представив напряженность электрического поля обыкновенной и необыкновенных волн в виде

$$E_j(z, t) = e_j E_j(z, \theta), \quad j = 1, 2, \quad (1)$$

где  $z$  – продольная координата,  $\theta = \omega_0(t - z/c_2)$  – безразмерное сопровождающее время,  $c_2$  – скорость второй волны. Как было показано в работах [5–7], в этом приближении динамика взаимодействия волн в квадратично-нелинейной среде описывается системой двух связанных уравнений Кортевега–де Фриза (КдФ):

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_1}{\partial z} - \nu \frac{\partial E_1}{\partial \theta} &= \frac{\beta}{2} \frac{\partial E_2^2}{\partial \theta} + \frac{\alpha}{2} \frac{\partial E_1^2}{\partial \theta} + \Gamma_1 \frac{\partial^3 E_1}{\partial \theta^3} \\ \frac{\partial E_2}{\partial z} &= \beta \frac{\partial (E_1 E_2)}{\partial \theta} + \Gamma_2 \frac{\partial^3 E_2}{\partial \theta^3} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\nu = c_2^{-1} - c_1^{-1}$  – расстройка скоростей,  $\Gamma_j$  – коэффициент дисперсии третьего порядка,  $\alpha, \beta$  – коэффициенты квадратичной нелинейности.

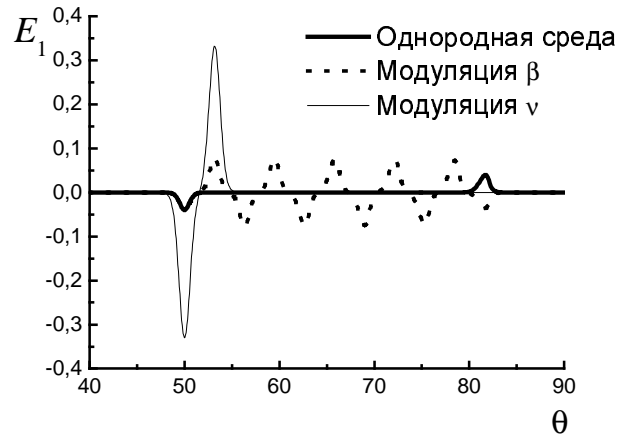


Рис. 1. Профиль импульса  $E_1$ , возбуждаемого видео-импульсом  $E_2$  в однородной среде с расстройкой скоростей (толстая сплошная линия), в слоистой среде с модуляцией коэффициента нелинейности (пунктирная линия) и с модуляцией расстройки (тонкая сплошная линия)

Вначале рассмотрим взаимодействие ПКИ, считая влияние дисперсии третьего порядка слабым. При синхронизме ( $\nu = 0$ ) процесс возбуждения импульсом накачки  $E_{20}(\theta)$  другой компоненты поляризации, как следует из (2), сопровождается эффектом дифференцирования квадрата поля накачки:

$$E_1 = \frac{\beta z}{2} \frac{\partial E_2^2}{\partial \theta};$$

полупериодный импульс возбуждает однопериодный сигнал, однопериодный – двухпериодный и т. д. Расстройка скоростей  $\nu$  приостанавливает процесс дифференцирования и разбивает возбуждаемые волны на два субимпульса, один из которых бежит со скоростью  $c_1$ , а другой – со скоростью  $c_2$ :  $E_1 = \beta [E_{20}^2(\theta + \nu z) - E_{20}^2(\theta)] / (2\nu)$  (рис. 1, толстая сплошная линия).

Компенсировать влияние расстройки скоростей  $\nu$  можно двумя способами. Первый является аналогом реализации квазисинхронных взаимодействий [8], и применительно к ПКИ он использует периодическую модуляцию коэффициента квадратичной нелинейности  $\beta(z)$  с пространственным периодом, равным длине когерентного взаимодействия  $d = T/|\nu|$ , где  $T$  – длительность ПКИ [9]. При этом мощность генерируемого импульса возрастает с расстоянием, но вместо одного импульса с удвоенным числом осцилляций формируется несколько субимпульсов (рис. 1, пунктирная линия).

Второй способ заключается в периодической модуляции расстройки  $\nu(z)$ . В таком случае возбуждаемый импульс то удаляется от импульса накачки, то приближается к нему. В результате расстройка в среднем за период модуляции дисперсии равна нулю, и поэтому она не оказывает существенного влияния на динамику генерации (рис. 1, тонкая сплошная линия). Здесь не требуется точно задавать значение периода модуляции: чем меньше толщины доменов, тем лучше идет компенсация расстройки.

Интересные эффекты возникают при учете дисперсии третьего порядка  $\Gamma_j$  в уравнениях (2). Даже в линейном режиме применение ПКИ на практике существенно ограничено из-за сильного дисперсионного расплывания. Важно заметить, что при изменении знака коэффициента дисперсии третьего порядка декомпрессия

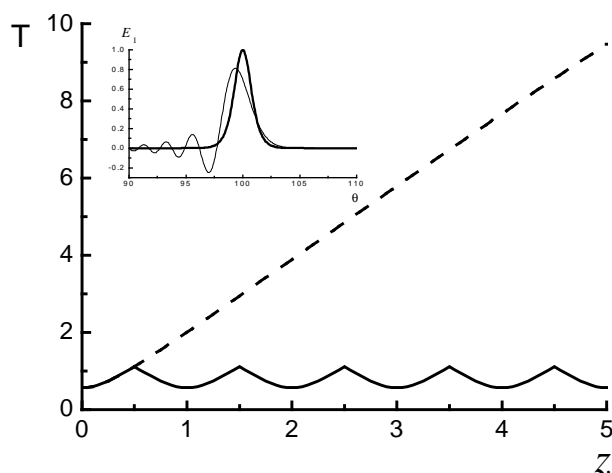


Рис. 2. Зависимость эффективной длительности импульса от расстояния при наличии дисперсии третьего порядка в однородной среде (штриховая линия) и при модуляции коэффициента дисперсии в слоистой среде (сплошная линия). На врезке – профиль распространяющегося импульса на половине периода модуляции коэффициента дисперсии третьего порядка, в середине,  $z = 0.5$ , (тонкая линия), в начале,  $z = 0$ , и на конце домена,  $z = 1$ , (толстая линия)

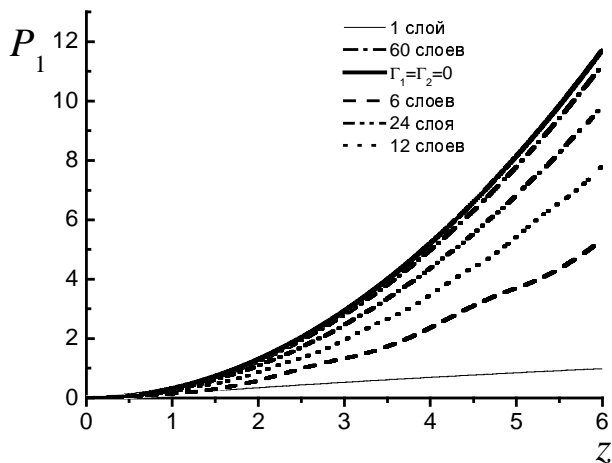


Рис. 3. Зависимость энергии генерируемого импульса  $E_1$  от расстояния в однородной среде без дисперсии и при различных периодах модуляции коэффициента дисперсии третьего порядка

ПКИ сменяется компрессией. Следовательно, при периодическом изменении знака  $\Gamma_j$  длительность ПКИ то увеличивается, то возвращается к первоначальному значению. Эффект локализации ПКИ в среде с управляемой дисперсией подтверждается результатами численного моделирования (рис. 2).

Этому эффекту можно дать простое объяснение. В линейной среде уравнение КдФ с переменным коэффициентом дисперсии  $\Gamma_j = \Gamma_0 f(z)$  сводится к уравнению с постоянным коэффициентом  $\Gamma_0$ ; при этом роль координаты  $z$  выполняет переменная  $\xi = \int f(z) dz$ , то есть профиль ПКИ  $E_2(z, \theta) = E_2(\xi, \theta)$ . Значение

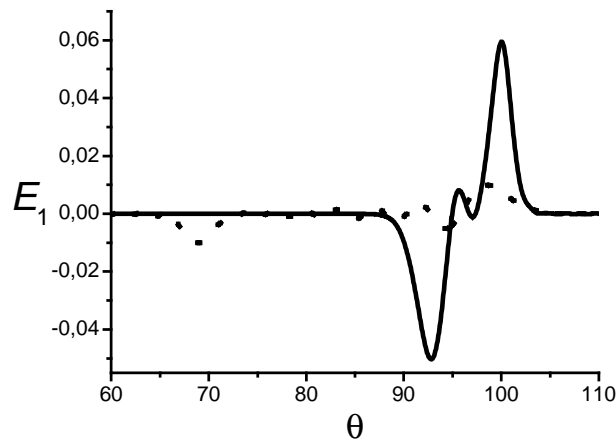


Рис. 4. Профиль генерируемого импульса в однородной диспергирующей среде (штриховая линия) и в кристалле с модулированными дисперсионными коэффициентами (4 слоя, сплошная линия)

интеграла от периодической функции, параметра  $\xi$ , проходит через нуль через каждый период модуляции дисперсии; поэтому профиль импульса и его длительность восстанавливаются в этих сечениях среды  $E_2(\theta, z) = E_2(\theta, z - L)$  (рис. 2, врезка).

Подавление дисперсионного расплывания в слоистой среде со знакопеременными коэффициентами дисперсии  $\Gamma_j(z)$  можно эффективно использовать для увеличения эффективности параметрической генерации ПККИ (рис. 3).

Обобщая все вышеизложенное, можно сделать вывод, что реализация управляемой дисперсии, то есть одновременная модуляция знаков расстройки скоростей и коэффициента дисперсии третьего порядка, позволяет существенно ослабить влияние дисперсии и увеличить эффективность генерации и взаимодействия ПККИ. Аналитические оценки подтверждаются результатами численного моделирования (рис. 4). Это позволяет нам считать такие квадратично-нелинейные кристаллы с управляемой дисперсией перспективными средами для нелинейной оптики предельно коротких импульсов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 06-02-16801, 08-02-00717) и грантами президента РФ (НШ-671.2008.2, МК-1496.2007.2). В.Е. Лобанов благодарит за финансовую поддержку Фонд некоммерческих программ «Династия».

### Summary

*V.E. Lobanov, V.A. Chernykh, A.P. Sukhorukov.* Propagation and Interaction of Few-Cycle Pulses in Quadratic Crystals with Managed Dispersion.

Propagation and interaction dynamics of the few-cycle pulses in quadratic nonlinear media with managed dispersion is studied. Periodic modulation of velocity mismatch sign and the third-order dispersion coefficient sign are shown to allow suppressing walk-off and pulse decompression that essentially increase efficiency of extremely short pulses' interactions.

**Key words:** few-cycle pulse, uniaxial crystal, quadratic nonlinearity, velocity mismatch, third-order dispersion, managed dispersion, modulation .

## Литература

1. *Ведерко А.В., Дубровская О.Б., Марченко В.Ф., Сухоруков А.П.* О солитонах с малым числом периодов во времени или в пространстве // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. – 1992. – Т. 33, № 3. – С. 4–20.
2. *Маймистов А.И.* О распространении ультракоротких световых импульсов в нелинейной среде // Оптика и спектроскопия. – 1994. – Т. 76, № 4. – С. 636–640.
3. *Козлов С.А., Сазонов С.В.* Нелинейное распространение импульсов длительностью в несколько колебаний светового поля в диэлектрических средах // ЖЭТФ. – 1997. – Т. 111, № 2. – С. 404–418.
4. *Brabec T., Krausz F.* Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics // Rev. Mod. Phys. – 2000. – V. 72. – P. 545–591.
5. *Дубровская О.В., Сухоруков А.П.* О взаимодействии оптических импульсов с малым числом периодов в средах с квадратичной нелинейностью // Изв. РАН. Сер. физ. – 1992. – Т. 56, № 12. – С. 184–188.
6. *Карамзин Ю.Н., Потапшиков А.С., Сухоруков А.П.* Взаимодействие предельно коротких электромагнитных импульсов в средах с квадратичной нелинейностью // Изв. РАН. Сер. Физ. – 1996. – Т. 60, № 12. – С. 29.
7. *Сазонов С.В., Соболевский А.Ф.* О нелинейном распространении предельно коротких импульсов в оптически одноосных средах // ЖЭТФ. – 2003. – Т. 123, № 6. – С. 1160–1178.
8. *Zhu Y., Ming N.* Dielectric superlattices for nonlinear optical effects // Opt. and Quant. El. – 1999. – V. 31. – P. 1093–1128.
9. *Черных В.А., Сухоруков А.П.* Удвоение частоты и дифференцирование огибающей сверхкороткого импульса при влиянии расстройки скоростей // Изв. РАН. Сер. физ. – 2005. Т. 69, № 12. – С. 1786–1788.

Поступила в редакцию  
10.03.08

---

**Лобанов Валерий Евгеньевич** – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

E-mail: [vallobanov@gmail.com](mailto:vallobanov@gmail.com)

**Черных Владислав Анатольевич** – младший научный сотрудник физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

E-mail: [slawka@mail.ru](mailto:slawka@mail.ru)

**Сухоруков Анатолий Петрович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой фотоники и физики микроволн (радиофизики) физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

E-mail: [apsmsu@gmail.com](mailto:apsmsu@gmail.com)