

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Распространение и взаимодействие предельно коротких импульсов в квадратичных кристаллах с управляемой дисперсиейВ. Е. Лобанов^а, А. П. Сухоруков, В. А. Черных*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн. 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: ^аvallobanov@gmail.com*

Изучено распространение 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.

PACS: 42.65.Re; 42.65.Ky; 42.70.Mr.

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

Статья поступила 04.03.2008, подписана в печать 04.03.2008.

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, возникающих при работе с ПКИ, является сильное влияние дисперсионных эффектов, искажающих форму импульсов и снижающих эффективность взаимодействия. В настоящей работе предлагается компенсировать негативное влияние дисперсии путем модуляции параметров квадратично-нелинейной среды, таких как расстройка скоростей и 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

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

где z — продольная координата, $\theta = \omega_0(t - z/c_2)$ — безразмерное сопровождающее время, c_2 — скорость второй волны, $j = 1, 2$. Как было показано в работах [5–7], в этом приближении динамика взаимодействия волн в квадратично-нелинейной среде описывается системой двух связанных уравнений Кортевега-де-Вриза (КДВ):

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

где $\nu = c_2^{-1} - c_1^{-1}$ — расстройка скоростей, Γ_j — коэффициент дисперсии третьего порядка; α, β — коэффициенты квадратичной нелинейности.

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 (1), 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 ν приостанавливает процесс дифференцирования и разбивает возбуждаемые волны на два субимпульса, один из которых бежит со скоростью c_1 , а другой — со скоростью c_2 :

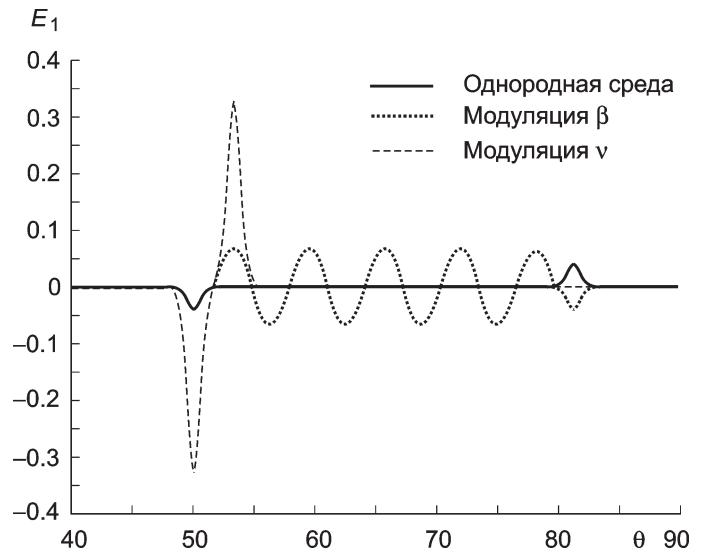


Рис. 1. Профиль импульса E_1 , возбуждаемого видеоп импульсом E_2 в однородной среде с расстройкой скоростей (сплошная линия), в слоистой среде с модуляцией коэффициента нелинейности (пунктирная линия) и с модуляцией расстройки (штриховая линия)

$E_1 = \beta [E_{20}^2(\theta + \nu z) - E_{20}^2(\theta)] / (2\nu)$ (рис. 1, сплошная линия).

Компенсировать влияние расстройки скоростей ν можно двумя способами. Первый метод 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 метод заключается в периодической модуляции расстройки $\nu(z)$ (рис. 1, штриховая линия). В таком случае возбуждаемый импульс то удаляется от импульса

накачки, то приближается к нему. В результате расстройки в среднем за период модуляции дисперсии равна нулю и поэтому она не оказывает существенного влияния на динамику генерации (рис. 1). 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 Γ_j в уравнениях (1). 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 ПКИ сменяется компрессией. Следовательно, при периодическом изменении знака Γ_j длительность ПКИ то увеличивается, то возвращается к первоначальному значению. Эффект локализации ПКИ в среде с управляемой дисперсией подтверждается результатами численного моделирования (рис. 2), и ему можно дать простое пояснение.

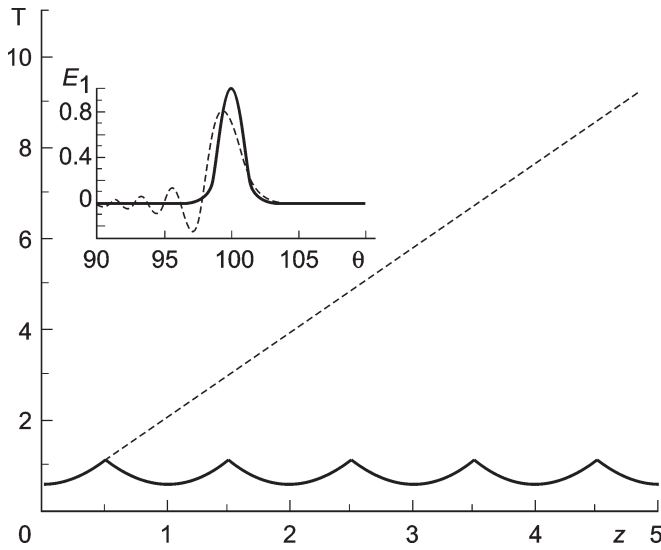


Рис. 2. Зависимость эффективной длительности возбуждаемого импульса от расстояния при наличии дисперсии третьего порядка в однородной среде (штриховая линия) и при модуляции коэффициента дисперсии в слоистой среде (сплошная линия). На врезке профиль распространяющегося импульса на половине периода модуляции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

В линейной среде уравнение КдВ с переменным коэффициентом дисперсии $\Gamma_j = \Gamma_0 f(z)$ сводится к уравнению с постоянным коэффициентом Γ_0 ; при этом роль координаты z выполняет переменная $\xi = \int f(z) dz$, т. е. профиль ПКИ $E_2(z, \theta) = E_2(\xi, \theta)$. Значение интеграла от периодической функции, параметра ξ , проходит через ноль 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).

Управляемой дисперсией можно воспользоваться и для реализации эффективных нелинейных процессов с участием ПКИ. Подавление дисперсионного расплывания в слоистой среде со знакопеременными коэффициен-

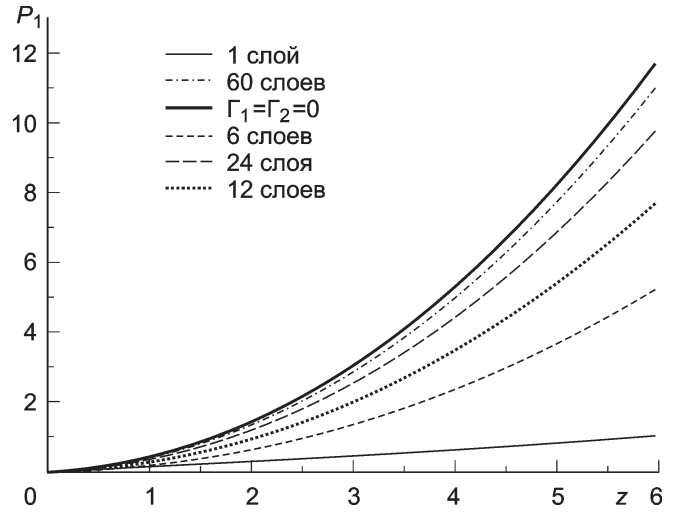


Рис. 3. Зависимость энергии возбуждаемого импульса E_1 от расстояния в квадратично-нелинейной среде без дисперсии и при различных периодах модуляции коэффициента дисперсии третьего порядка

тами дисперсии $\Gamma_j(z)$ можно эффективно использовать для увеличения эффективности параметрической генерации ПКИ (рис. 3).

Таким образом, модуляция знаков расстройки скоростей и коэффициента дисперсии третьего порядка позволяет существенно ослабить влияние дисперсии и увеличить эффективность генерации и взаимодействия ПКИ. Аналитические оценки подтверждаются результатами численного моделирования. Это позволяет нам считать квадратично-нелинейные кристаллы с управляемой дисперсией перспективными средами для нелинейной оптики предельно коротких импульсов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 09-02-01028, 08-02-00717) и программы Президента РФ поддержки ведущих научных школ (грант НШ-671.2008.2).

Список литературы

1. Ведерко А.В., Дубровская О.Б., Марченко В.Ф., Сухоруков А.П. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. **33**, № 3. С. 4.
2. Маймистов А.И. // Оптика и спектроскопия. 1994. **76**, № 4. С. 636.
3. Козлов С.А., Сазонов С.В. // ЖЭТФ. 1997. **111**, № 2. С. 404.
4. Brabec T., Krausz F. // Rev. Mod. Phys. 2000. **72**. P. 545.
5. Дубровская О.В., Сухоруков А.П. // Изв. РАН. Сер. физ. 1992. **56**, № 12. С. 184.
6. Карамзин Ю.Н., Поташников А.С., Сухоруков А.П. // Изв. РАН. Сер. Физ. 1996. **60**, № 12. С. 29.
7. Сазонов С.В., Соболевский А.Ф. // ЖЭТФ. 2003. **123**, № 6. С. 1160.
8. Zhu Y., Ming N. // Opt. and Quant. Electronics. 1999. **31**. P. 1093.
9. Черных В.А., Сухоруков А.П. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. **69**, № 12. С. 1786.

Propagation and interaction of extremely short pulses in quadratic crystals with managed dispersion**V. E. Lobanov^a, A. P. Sukhorukov, V. A. Chernykh***Department of Photonics and Microwave Physics, Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: ^avallobanov@gmail.com.*

Propagation of few-cycle pulses containing few field oscillations in quadratically nonlinear media with managed dispersion is studied. It is shown that periodic modulation of velocity mismatch sign and the third-order dispersion coefficient sign allows suppressing walk-off and pulse decompression that essentially increases efficiency of extremely short pulses interactions.

PACS: 42.65.Re; 42.65.Ky; 42.70.Mp.

Keywords: few-cycle pulse, uniaxial crystal, quadratic nonlinearity, velocity mismatch, managed dispersion, modulation.*Received 4 March 2008.*English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2009)*Сведения об авторах*

1. Лобанов Валерий Евгеньевич — к. ф.-м. н., ст. преподаватель; тел.: 939-33-17, e-mail: vallobanov@gmail.com.
2. Черных Владислав Анатольевич — мл. научн. сотр.; тел.: 939-33-17, e-mail: slawka@mail.ru.
3. Сухоруков Анатолий Петрович — д. ф.-м. н., профессор, зав. кафедрой; тел.: 939-44-18, e-mail: apmsu@gmail.com.