Об одномерной динамике оптических импульсов в изотропном диэлектрике

А. Н. Бугай[1*] В. А. Халяпин[2†]

[1]*Объединенный институт ядерных исследований, Россия, 141980, Дубна, Московская область, ул. Жолио–Кюри, 6*

[2]*ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет», физический факультет, кафедра телекоммуникаций Россия, 236000, Калининград, Советский проспект, д.1*

БФУ им. И. Канта, факультет фундаментальной подготовки, кафедра физики Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, д. 14

Получена система уравнений, описывающая динамику параметров супергауссового импульса, распространяющегося в изотропном диэлектрике как в области нормальной, так и аномальной дисперсии групповой скорости.

PACS: 42.65.Tg УДК: 535.36

Ключевые слова: супергауссовый импульс, квазисолитон, суперконтинуум.

В настоящей работе предложен подход описания динамики импульсов, форма которых отличается от колоколообразной, при их распространении в области прозрачности диэлектрика. В качестве примера будем рассматривать эволюцию супергауссовых импульсов в изотропном диэлектрике с кубической нелинейностью или в квадратично-нелинейной среде в каскадном пределе, когда не выполняется условие синхронизма для оптического выпрямления или генерации второй гармоники. Уравнение, описывающее распространение квазимонохроматических импульсов в таком случае, представляет собой нелинейное уравнение Шрёдингера [1]

$$\frac{\partial\psi}{\partial z}+\frac{i\beta_2}{2}\frac{\partial^2\psi}{\partial\tau^2}-i\gamma\psi\left|\psi\right|^2=0. \qquad (1)$$

Здесь ψ — огибающая поля импульса, ω — центральная частота импульса, β_2 — коэффициент групповой дисперсии, γ — коэффициент при кубической нелинейности, $\tau=\eta-z/v_g$ — время в сопутствующей системе координат, v_g — групповая скорость импульса, z — ось, вдоль которой распространяется сигнал.

Анализ динамики параметров импульса проводится на основе метода моментов.

Определим моменты импульса с помощью следующих выражений [2]

$$E=\int_{-\infty}^{\infty}\left|\psi\right|^2d\tau, \qquad (2)$$

$$\tilde{C}=\frac{i}{2E}\int_{-\infty}^{\infty}\tau\left(\psi^*\frac{\partial\psi}{\partial\tau}-\psi\frac{\partial\psi^*}{\partial\tau}\right)d\tau, \qquad (3)$$

$$\sigma^2=\frac{1}{E}\int_{-\infty}^{\infty}\tau^2\left|\psi\right|^2d\tau, \qquad (4)$$

$$n=\frac{1}{2E}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{\left|\psi\right|^2}\left(\psi^*\psi_\tau+\psi\psi_\tau^*\right)\tau^2d\tau-\frac{1}{2}, \qquad (5)$$

где E — энергия импульса, σ — его длительность, $\tilde{C}$ — определяет модуляцию частоты, n — степень супергауссового импульса.

Огибающую поля запишем следующим образом

$$\psi=B\exp\left[-\frac{1}{2}\left|\frac{\tau}{\tau_p}\right|^{2n}+i\left(\varphi-\frac{C}{2}\left(\frac{\tau}{\tau_p}\right)^{2n}\right)\right]. \qquad (6)$$

Здесь B — амплитуда сигнала. Из (2)–(6) с учётом (6) и (1) получаем систему уравнений на параметры импульса

$$C=\frac{2\sigma\sigma_z}{\beta_2}, \qquad (7)$$

$$\frac{2\sigma_z^2}{\beta_2}+\frac{2\sigma\sigma_{zz}}{\beta_2}= =\left(\frac{\beta_2}{\sigma^2}+\frac{4\sigma_z^2}{\beta_2}\right)\frac{n\left(2n-1\right)\Gamma\left(\frac{2n-1}{2n}\right)\Gamma\left(\frac{3}{2n}\right)}{\left(\Gamma\left(\frac{1}{2n}\right)\right)^2}+ +\frac{\gamma}{2^{\frac{1}{2n}}}\frac{nE\sqrt{\Gamma\left(\frac{3}{2n}\right)}}{\sigma\Gamma\left(\frac{1}{2n}\right)\sqrt{\Gamma\left(\frac{1}{2n}\right)}}, \qquad (8)$$

$$n_z=-\frac{\beta_2C8n^3\left(n-1\right)\Gamma\left(\frac{4n-1}{2n}\right)}{\tau_p^2\Gamma\left(\frac{1}{2n}\right)}, \qquad (9)$$

где

$$B^2=nE\sqrt{\Gamma\left(\frac{3}{2n}\right)}/\sigma\Gamma\left(\frac{1}{2n}\right)\sqrt{\Gamma\left(\frac{1}{2n}\right)},$$

$$\sigma^2=\tau_p^2\Gamma\left(\frac{3}{2n}\right)/\Gamma\left(\frac{1}{2n}\right).$$

Уравнения (7)–(9) решались численно для супергауссовых импульсов с произвольными значениями n.

*E-mail: bugay_aleksandr@mail.ru

†E-mail: slavasxi@gmail.com

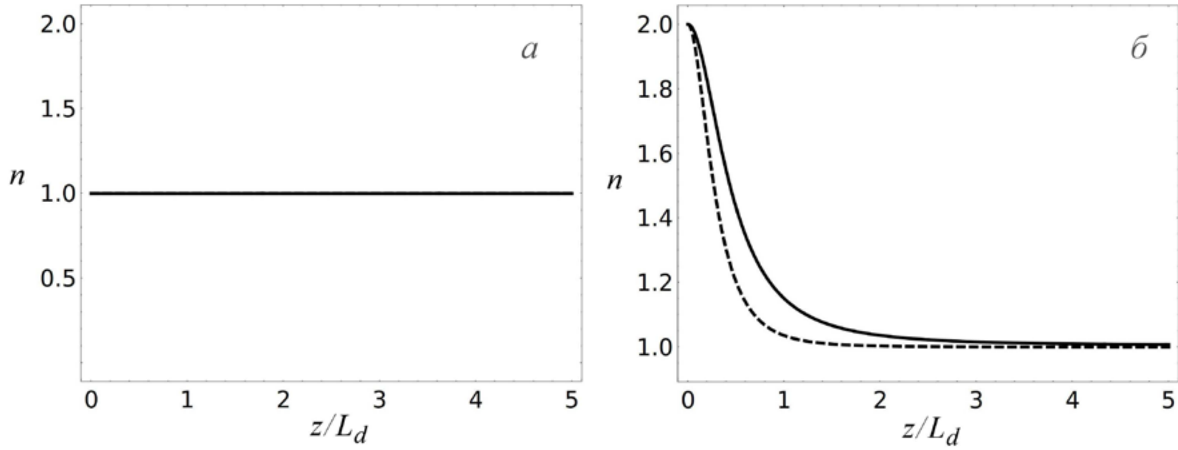

Рис. 1: Эволюция показателя супергауссовости $n(z)$ при $\gamma = 0$ (штриховая линия) и $\gamma \neq 0$ (сплошная линия). (*а*) — гауссов импульс ($n = 1$), (*б*) — супергауссов импульс ($n = 2$). Здесь L_d — характерная длина дисперсионного расплывания.

Последующее сравнение приближенного решения вида (6) с численным решением исходного уравнения (1) выявило хорошее совпадение данных результатов. Так рис. 1 описывает эволюцию гауссового импульса и супергауссового с $n = 2$. Из графиков следует, что гауссовый на входе импульс остается таковым в то время как супергаусовый импульс стремиться к гауссовой форме.

Известно, что в дальней зоне дисперсии (без учета нелинейности) профиль импульса приобретает устойчивую форму, определяемую спектром входного импульса. Такой импульс называется «спектрон» [3]. Отсюда следует, что при больших n импульс разобьется на серию импульсов (что аналогично дифракции на щели). По этой причине система (7)–(9) справедлива для супергауссовых импульсов с n, незначительно отличающимся от единицы.

Из (8) следует, что установившийся режим ($\sigma = \mathrm{const}$) возможен только в области аномальной дисперсии групповой скорости ($\beta_2 > 0$). В этом случае формируется солитон, когда мощность импульса превышает критическую. В области нормальной дисперсии групповой скорости ($\beta_2 < 0$) длительность импульса будет увеличиваться, он будет испытывать модуляцию и его спектральная ширина будет расти, т. е. будет происходить генерация спектрального суперконтинуума.

Предложенный подход представляется возможным обобщить на более сложные задачи, в частности, применить к решению проблемы генерации терагерцового излучения при оптическом выпрямлении с оптической накачкой, обладающей сложной временной формой или фазовой модуляцией [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-02-00199а).

---

[1] *Кившарь Ю.С., Агравал Г.П.* Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов. М.: Наука. (2005).

[2] *Santhanam J.* Opt.Commun. A. **222**. P. 413. (2003).

[3] *Дьяков Ю.Е., Никитин С.Ю.* Задачи по статистической радиофизике и оптике. М.: Изд-во МГУ. (1985).

[4] *Сазонов С.В., Сухоруков А.П., Устинов Н.В.* Письма в ЖЭТФ. **100**, № 10. С. 703. (2014).

On the one-dimensional dynamics of optical pulses in isotropic dielectric

A.N. Bugay[1,a], **V.A. Khalyapin**[2,b]

[1]*Joint Institute of Nuclear Research, Dubna 141980, Russia*

[2]*Kaliningrad State Technical University, faculty of fundamental preparation, Faculty of Physics, Kaliningrad 236000, Russia Kaliningrad, Immanuel Kant Baltic Federal University, Department of physics, Faculty of telecommunications, Kaliningrad, 236041 Russia*

E-mail: [a]bugay_aleksandr@mail.ru, [b]slavasxi@gmail.com

The system of equations describing the dynamics of parameters of supergaussian pulse propagating in isotropic dielectric within region of normal or abnormal group velocity dispersion is derived.

PACS: 42.65.Tg

Keywords: supergaussian pulse, quasisoliton, supercontinuum.

Received 27.07.2015.

Сведения об авторах

1. Халяпин Вячеслав Анатольевич — кандидат. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики; тел.: 8(906) 216-55-58, e-mail: slavasxi@gmail.com.
2. Бугай Александр Николаевич — канд. физ.-мат. наук, начальник сектора; тел.: (495) 216-21-47, e-mail: bugay_aleksandr@mail.ru.