

УДК 530.14

ОПТИЧЕСКИЙ ИМПУЛЬС С УПРАВЛЯЕМОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУКТУРОЙ ПОЛЯ

Дзедолик И.В.

*Таврический национальный университет им. В.И.Вернадского, Симферополь, Украина
E-mail: dzedolik@crimea.edu*

Рассмотрен метод управления поперечным распределением поля оптического импульса с помощью внешнего электрического поля. Импульс, возбужденный в оптическом волокне на ТЕ- либо ТМ-моды, проходит через диэлектрическую пленку, установленную в управляющем устройстве, в котором генерируется азимутальное либо радиальное электрическое поле. В результате нелинейного электро-оптического эффекта Погкельса внешнее электрическое поле взаимодействует в пленке с соответствующей компонентой электрического поля импульса, что приводит к изменению поперечного распределения поля импульса.

Ключевые слова: оптический импульс, диэлектрическая пленка, внешнее электрическое поле.

ВВЕДЕНИЕ

Управление формой и фазой оптических импульсов в настоящее время привлекает большое внимание в связи с задачами передачи больших объемов информации в волоконно-оптических линиях связи [1-3], кодирования-декодирования информации [4], а также в связи с использованием импульсов в датчиках физических величин, действие которых основано на изменении поперечного распределения поля импульса [5].

В данной работе предложен метод управления поперечным распределением поля импульса, прошедшего через тонкую диэлектрическую пленку, помещенную во внешнее электрическое поле. Внешнее электрическое поле может быть сгенерировано, например, с помощью импульсного магнитного поля в соленоиде, внутри которого перпендикулярно его оси размещена диэлектрическая пленка. В результате прохождения по виткам соленоида импульса тока генерируется вихревое электрическое поле, имеющее азимутальную компоненту. Силовые магнитные линии направлены по оси соленоида, а силовые электрические линии представляют собой концентрические окружности внутри соленоида. При этом направление силовых электрических линий определяется направлением тока в витках соленоида. Электромагнитный импульс, прошедший оптическое волокно, направляется на такую диэлектрическую пленку. Если на пленку падает импульс с распределением поля, описываемым ТЕ-моды [6] с одной (азимутальной) компонентой электрического поля и двумя (радиальной и продольной) компонентами магнитного поля, то азимутальная компонента ТЕ-моды [6] может быть либо сонаправлена с компонентой внешнего вихревого электрического поля, либо направлена противоположно. В результате эффекта Погкельса внешнее

электрическое поле оказывает влияние на азимутальную компоненту электрического поля импульса при прохождении им пленки и, таким образом, может изменить поперечное распределение поля импульса. Если импульс сформирован ТМ-модами, имеющими одну магнитную (азимутальную) и две электрические (радиальную и продольную) компоненты, то управлять формой и амплитудой импульса можно, например, с помощью системы, представляющей собой цилиндрический конденсатор, в котором перпендикулярно оси установлена диэлектрическая пленка. В таком цилиндрическом конденсаторе одна из обкладок представляет собой тонкую заряженную нить, а вторая – проводящий цилиндр. В этом случае внешнее электрическое поле в пленке будет направлено вдоль радиальных компонент электрического поля ТМ-моды. Меняя направление и величину внешнего электрического поля также можно управлять поперечным распределением поля импульса, прошедшего такое устройство. После прохождения управляющего устройства импульс может быть вновь введен в оптическое волокно.

1. УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ИМПУЛЬСА

Предположим, что импульс, прошедший оптическое волокно, падает на диэлектрическую пленку, расположенную перпендикулярно продольной оси z управляющего устройства (рис. 1).

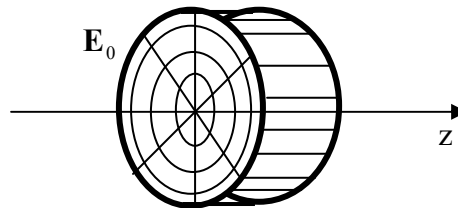


Рис.1. Тонкая диэлектрическая пленка, расположенная внутри управляющего устройства.

Динамика огибающей импульса $A(t,z)$, распространяющегося в диэлектрической среде или в оптическом волокне, достаточно полно исследована [1,2,5]. Поэтому в данной работе основное внимание уделено поперечной структуре поля импульса.

Электрическое поле несущей гармоники импульса $\mathbf{E}(t, \mathbf{r}) = \mathbf{E}(\mathbf{r}_\perp) \exp(-i\omega t + i\beta z)$ в диэлектрической пленке описывается уравнением

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \nabla(\nabla \mathbf{E}) + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_1 \pm 4\pi\chi_2 E_0 + 4\pi\chi_3 \mathbf{E}^* \mathbf{E}$ - нелинейная диэлектрическая проницаемость, ε_1 ее линейная часть, χ_2 - квадратичная восприимчивость пленки, которая описывает нелинейный электро-оптический эффект Поккельса, χ_3 - кубическая

восприимчивость пленки, E_0 - компонента внешнего электрического поля. В цилиндрической системе координат уравнение (1) приобретает вид

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} - \beta^2 \right) \mathbf{E} - \left(\mathbf{1}_r \frac{\partial}{\partial r} + \mathbf{1}_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \mathbf{1}_z i\beta \right) \left(\frac{\partial E_r}{\partial r} + \frac{E_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_\varphi}{\partial \varphi} + i\beta E_z \right) + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \mathbf{E} = 0. \quad (2)$$

2. ИМПУЛЬС, СФОРМИРОВАННЫЙ НА ТЕ-МОДЕ

ТЕ-мода лазерного излучения имеет одну компоненту электрического поля - азимутальную E_φ . Для азимутальной компоненты электрического поля уравнение (2) запишем в виде

$$\frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_\varphi}{\partial r} + (\alpha_1 \pm \alpha_2 E_{0\varphi}) E_\varphi + \alpha_3 E_\varphi^3 = 0, \quad (3)$$

где $\alpha_1 = \omega^2 c^{-2} \varepsilon_1 - \beta^2$, $\alpha_2 = 4\pi\omega^2 c^{-2} \chi_2$, $\alpha_3 = 4\pi\omega^2 c^{-2} \chi_3$. Решения уравнения (3), полученные численными методами для различных величин параметров $\alpha_1 + \alpha_2 E_{0\varphi}$, характеризующих отклик среды на внешнее управляющее электрическое поле, представлены на рис. 2.

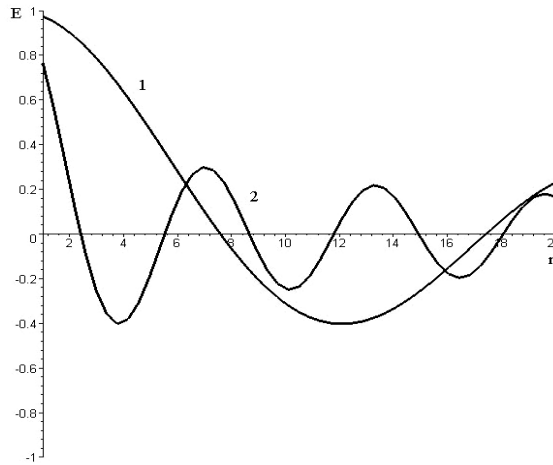


Рис.2. Величина азимутальной компоненты ТЕ-моды электрического поля импульса в зависимости от напряженности внешнего электрического поля E_0 : кривая 1 - $\alpha_1 + \alpha_2 E_{0\varphi} = 0.1 \text{ cm}^{-2}$, кривая 2 - $\alpha_1 + \alpha_2 E_{0\varphi} = 1 \text{ cm}^{-2}$, $\alpha_3 = 0.001 \text{ cm}^{-2}$.

Из рис. 2 следует, что пространственный период азимутальной компоненты электрического поля при увеличении напряженности внешнего электрического поля уменьшается. При этом на продольной оси z амплитуда азимутальной компоненты электрического поля не равна нулю при любой напряженности внешнего электрического поля, оптический вихрь в пленке при падении на нее ТЕ-моды не генерируется.

3. ИМПУЛЬС, СФОРМИРОВАННЫЙ НА ТМ-МОДЕ

Компоненты электрического поля ТМ-моды в управляющем устройстве удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{aligned} \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_r}{\partial \varphi^2} + \frac{E_r}{r^2} - i\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + (\alpha_1 \pm \alpha_2 E_{0r}) E_r + \alpha_3 (E_r^2 + E_z^2) E_r &= 0, \\ \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} - i\beta \frac{\partial E_r}{\partial r} - i\beta \frac{E_z}{r} + \frac{\omega^2 \epsilon_1 E_z}{c^2} + \alpha_3 (E_r^2 + E_z^2) E_z &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Предположим, что волновой фронт импульса квазиплоский. Тогда продольной компонентой электрического поля в системе уравнений (4) можно пренебречь $|E_z| \ll |E_r|$, и рассматривать только одно уравнение для радиальной компоненты электрического поля

$$\frac{\partial^2 E_r}{\partial \varphi^2} + [1 + (\alpha_1 \pm \alpha_2 E_{0r}) r^2] E_r + \alpha_3 r^2 E_r^3 = 0. \quad (5)$$

Решение нелинейного уравнения (5) имеет форму кноидальной волны

$$E_r = b_2 \operatorname{cn} \left\{ \alpha_3 (b_1^2 + b_2^2) r^2 / 2 \right\}^{1/2} \varphi - K(\tilde{k}), \tilde{k} \quad (6)$$

где « cn » эллиптический косинус Якоби, $K(\tilde{k})$ эллиптический интеграл первого рода, $\tilde{k} = b_2 (b_1^2 + b_2^2)^{-1/2}$ модуль эллиптического интеграла,

$$\begin{aligned} b_1^2 &= 2a^2 \left\{ \left[2a^2 \alpha_3 r^2 + [1 + (\alpha_1 \pm \alpha_2 E_{0r}) r^2]^2 \right]^{1/2} - 1 - (\alpha_1 \pm \alpha_2 E_{0r}) r^2 \right\}^{-1}, \\ b_2^2 &= (\alpha_3 r^2)^{-1} \left\{ \left[2a^2 \alpha_3 r^2 + [1 + (\alpha_1 \pm \alpha_2 E_{0r}) r^2]^2 \right]^{1/2} - 1 - (\alpha_1 \pm \alpha_2 E_{0r}) r^2 \right\}, \\ a^2 &= (\partial E / \partial \varphi)_0^2 + [1 + (\alpha_1 \pm \alpha_2 E_{0r}) r^2] E^2(\varphi = 0) + \alpha_3 r^2 E^4(\varphi = 0) / 2. \end{aligned}$$

Выражение (6) приобретает форму солитона, когда модуль эллиптического косинуса равен единице $\tilde{k} = 1$, $b_1(a = 0) = 0$,

$$E_r = b_2(0) \operatorname{cosh}^{-1} [\sqrt{\alpha_3 / 2b_2} r \varphi], \quad (7)$$

где параметр $b_2(0)$ взят при $a = 0$.

В линейном случае, когда $\alpha_3 \rightarrow 0$, уравнение (5) имеет вид

$$\frac{\partial^2 E_r}{\partial \varphi^2} + [1 + (\alpha_1 \pm \alpha_2 E_{0r}) r^2] E_r = 0. \quad (8)$$

Решение линейного уравнения (8) запишем в форме

$$E(r, \varphi) = A \exp\{\pm i[1 + (\alpha_1 \pm \alpha_2 E_{0r})r^2]^{1/2} \varphi\}, \quad (9)$$

где $A = \text{const}$ амплитуда. На рис. 3 и рис. 4 представлена интенсивность электрического поля (9) $I \sim \cos^2\{[1 + (\alpha_1 \pm \alpha_2 E_{0r})r^2]^{1/2} \varphi\}$ импульса в линейном случае при увеличении напряженности внешнего электрического поля E_{0r} для значений параметров $\alpha_1 + \alpha_2 E_{0r} = 0.1 \text{ cm}^{-2}$ и $\alpha_1 + \alpha_2 E_{0r} = 1 \text{ cm}^{-2}$.

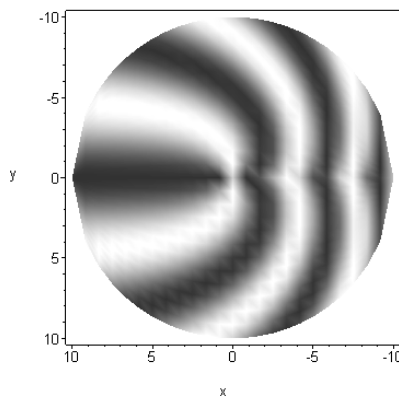


Рис.3. Интенсивность электрического поля импульса при $\alpha_1 + \alpha_2 E_{0r} = 0.1 \text{ cm}^{-2}$.

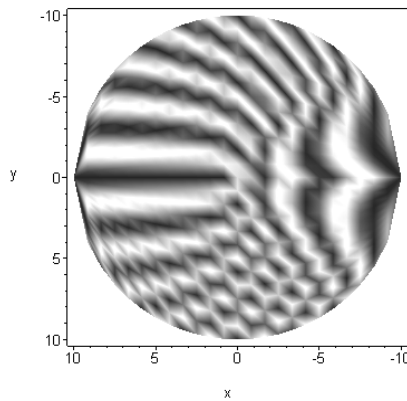


Рис.4. Интенсивность электрического поля импульса при $\alpha_1 + \alpha_2 E_{0r} = 1 \text{ cm}^{-2}$.

ВЫВОДЫ

Импульсы с заданной поперечной структурой поля применяются в оптических датчиках физических величин, в линиях связи и передачи информации, в частности для кодирования информации. Управление поперечным распределением поля оптического импульса, распространяющегося в диэлектрической среде, вызывает

интерес как с теоретической, так и с прикладной точек зрения. Внешнее электрическое поле меняет диэлектрическую проницаемость среды, и, таким образом, с его помощью можно легко управлять распределением поля импульса, прошедшего через такую среду. В последнем случае с помощью варьирования внешнего электрического поля можно повысить «информационную емкость» отдельного импульса. Также вызывает интерес топологическая структура поперечного распределения поля импульса – возникают ли в импульсе линии сингулярности поля и как их динамика зависит от внешнего электрического поля? Таким образом, совершенствование методов управления и исследования поперечной топологической структуры поля оптических импульсов перспективны в плане проведения теоретических и экспериментальных работ и их приложений.

Список литературы

1. Ахманов С.А., Вислоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. – М.: Наука, 1988. – 312 с.
2. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов. М.: Физматлит, 2005. – 648 с.
3. Qi X., Zhang X., Wei H., Plant D.V. Linearity of perturbations in fiber-optic transmission lines and its applications to nonlinear compensations // J. Opt. Soc. Am. B. – V.23, No.10. 2006. – P.2032-2039.
4. Martinez-Herrero R., Mejias P.M. Propagation of light fields with radial or azimuthal polarization distribution at a transverse plane // Opt. Exp. – V.16, No.12. – 2008. – P.9021-9033.
5. Дзедолик И.В. Поляритоны в оптических волокнах и диэлектрических резонаторах. – Симферополь: ДИАЙПИ, 2007. – 320 с.
6. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.

Дзедолик І.В. Оптичний імпульс з керованою поперечною структурою поля // Учені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. - 2008. - Серія «Фізика» - Т. 21 (60). - № 1. - С. 3 - 8.

Розглянуто метод керування поперечним розподілом поля оптичного імпульсу за допомогою зовнішнього електричного поля. Імпульс, який був збуджений у оптичному волокні на ТЕ- або ТМ-моді, проходить крізь діелектричну плівку, яка встановлена у керуючому пристрої, у якому генерується азимутальне або радіальне електричне поле. У результаті нелінійного електро-оптичного ефекту Поккельса зовнішнє електричне поле взаємодіє у плівці з відповідною компонентою електричного поля імпульсу, що призводить до змінення поперечного розподілу поля імпульсу.

Ключеві слова: оптичний імпульс, діелектрична плівка, зовнішнє електричне поле.

Dzedolik I.V. Optical pulse with control transversal structure of field // Uchenye zapiski Tavricheskogo Natsionalnogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. - 2008. - Series "Physics". – V. 21 (60). - № 1. – P. 3 - 8.

The method of control of transversal distribution pulse field by external electric field is considered. The pulse is excited in a optical fiber on TE- or TM-mode and then it passes through the dielectric film based in the control device with azimuthal or radial electric field. In the result of nonlinear electro-optical Pockels effect the external electric field interacts with corresponding component of pulse field that leads to changing of transversal field of the pulse.

Keywords: optical pulse, dielectric film, external electric field.

Поступила в редакцію 7.11.2008 г.